

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Zavod za elektrostrojarstvo i automatizaciju

**PREPISANO**

Ime Prezime

JMBAG

**IZVJEŠTAJ ZA 3. LABORATORIJSKU VJEŽBU**

**Jednofazni diodni ispravljač u mosnom spoju**

Praktikum učinske elektronike

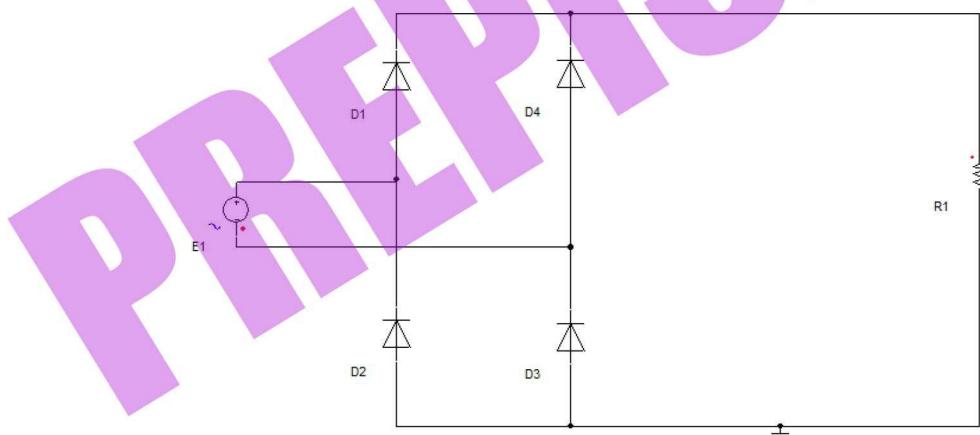
**PREPISANO**

Zagreb, 2012. / 2013.

## Seminar

Predmet proučavanja treće laboratorijske vježbe je jednofazni diodni ispravljač u mosnom spoju opterećen različitim vrstama trošila (djelatnim, induktivnim i kapacitivnim). Ispravljač je sklop koji izmjenični napon izvora pretvara u napon s pozitivnom istosmjernom komponentom na strani trošila. Ispravljač je punovalni jer ispravlja i pozitivnu i negativnu poluperiodu napona izvora. U vježbi promatramo strujno-naponske odnose na mrežnoj strani i na strani trošila.

Simulacijski dio vježbe započinjemo opterećenjem ispravljača djelatnim trošilom, kao što je prikazano na Slika 1.



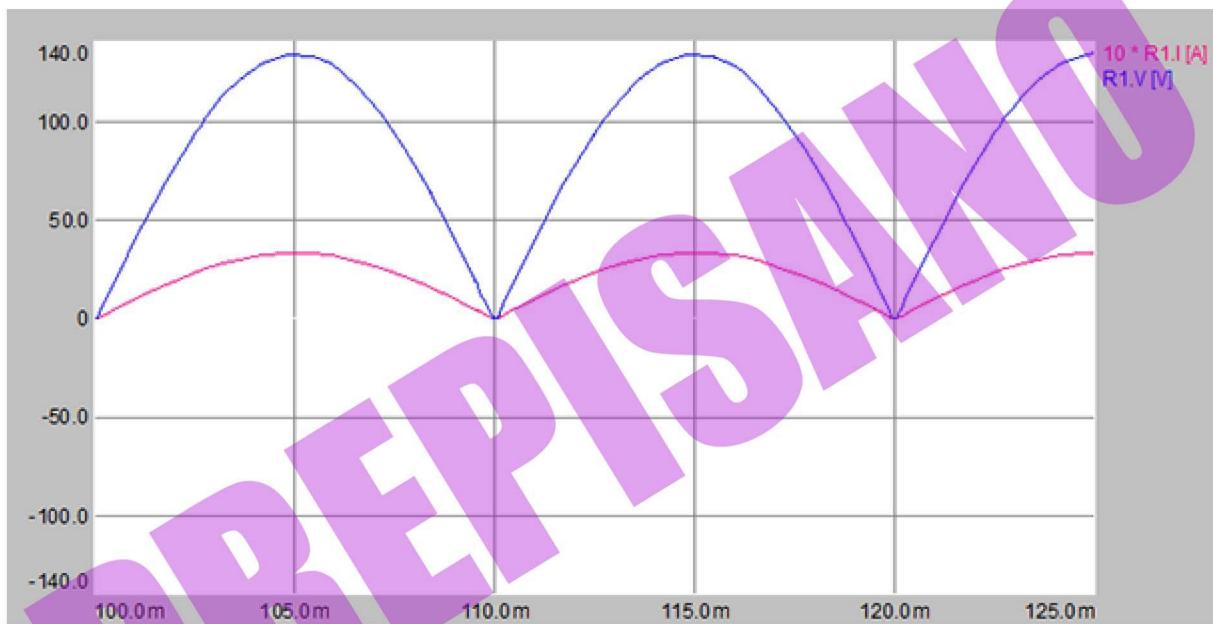
Slika 1

U simulaciji je korišten otpornik  $R = 20 \Omega$  i sinusni izvor napona efektivne vrijednosti  $U_{rms} = 96$  V kako bi što točnije simulirali stvarnu laboratorijsku vježbu na pultu. Na Slika 2 je prikazan simulirani odziv napona sekundara transformatora (E1.EMF) i struje mreže (E1.I) pomnožene faktorom 10 za lakšu uočljivost na grafu.



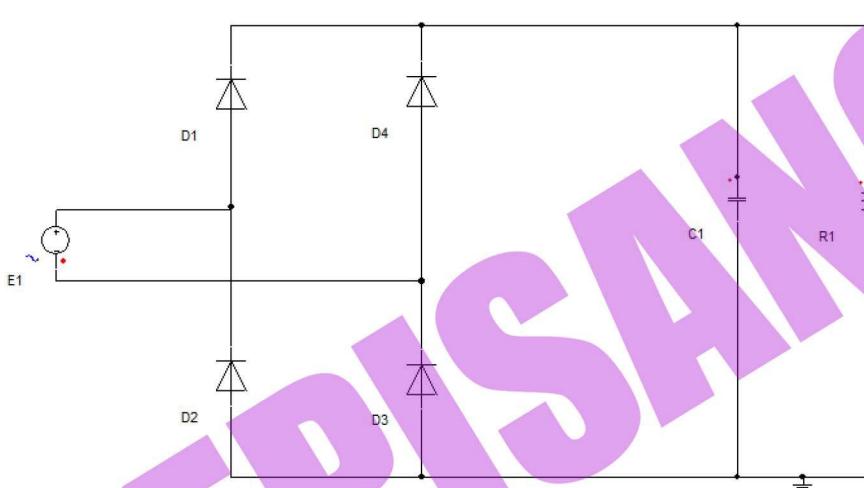
Slika 2

Na Slika 3 prikazani su punovalno ispravljeni napon i struja trošila.



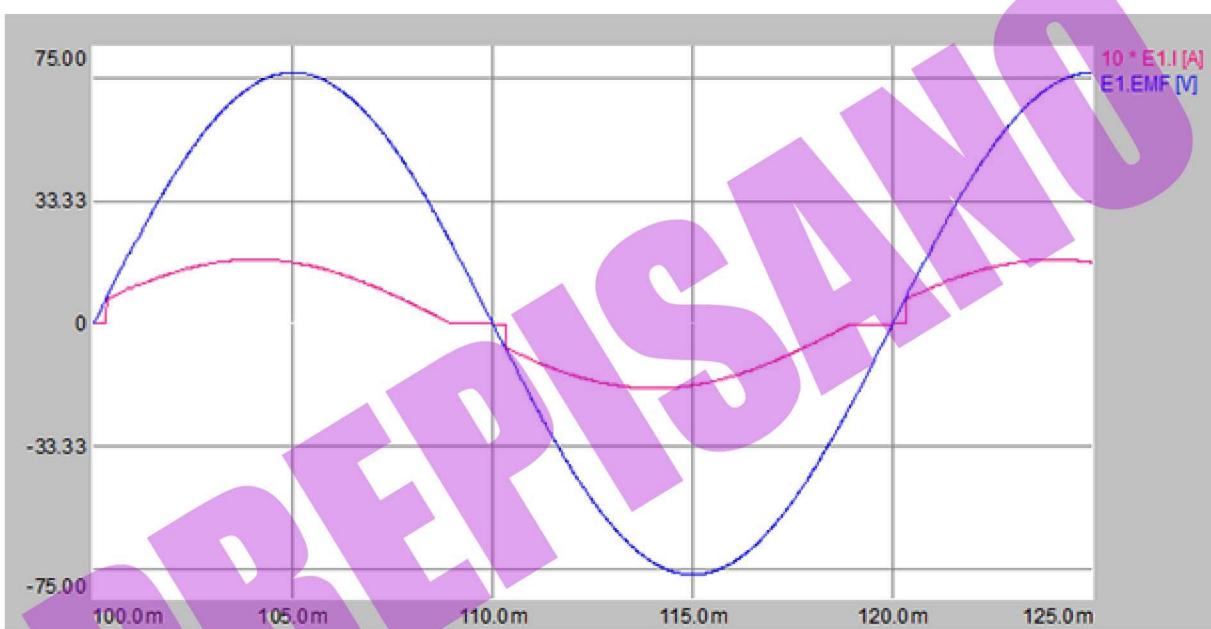
Slika 3

Za daljnja mjerena koristimo sinusni izvor napona efektivne vrijednosti 48.2 V. Paralelno otporu sada dodajemo kondenzator  $C = 25 \mu F$  i ponavljamo simulaciju kao što je prikazano na Slika 4.



Slika 4

Slika 5. prikazuje napon i struju mreže kada je na ispravljač priključeno kapacitivno trošilo. Slika 6. u tom slučaju prikazuje napon i struju kondenzatora. Kada počne rasti napon mreže, kondenzator se puni pozitivnom strujom  $i_c$ , koja se smanji na 0 kada napon mreže postigne vršnu vrijednost. Napon na kondenzatoru sada je veći od napona mreže i struja počinje teći u suprotnom smjeru. Struja kroz mrežu pada dok ne poprimi vrijednost 0, a tada diode prestaju voditi. Preostali napon na kondenzatoru tjera struju kroz otpornik i na njemu se troši energija. Struja će kroz mrežu početi teći kada absolutni iznos napona mreže premaši vrijednost napona kondenzatora.

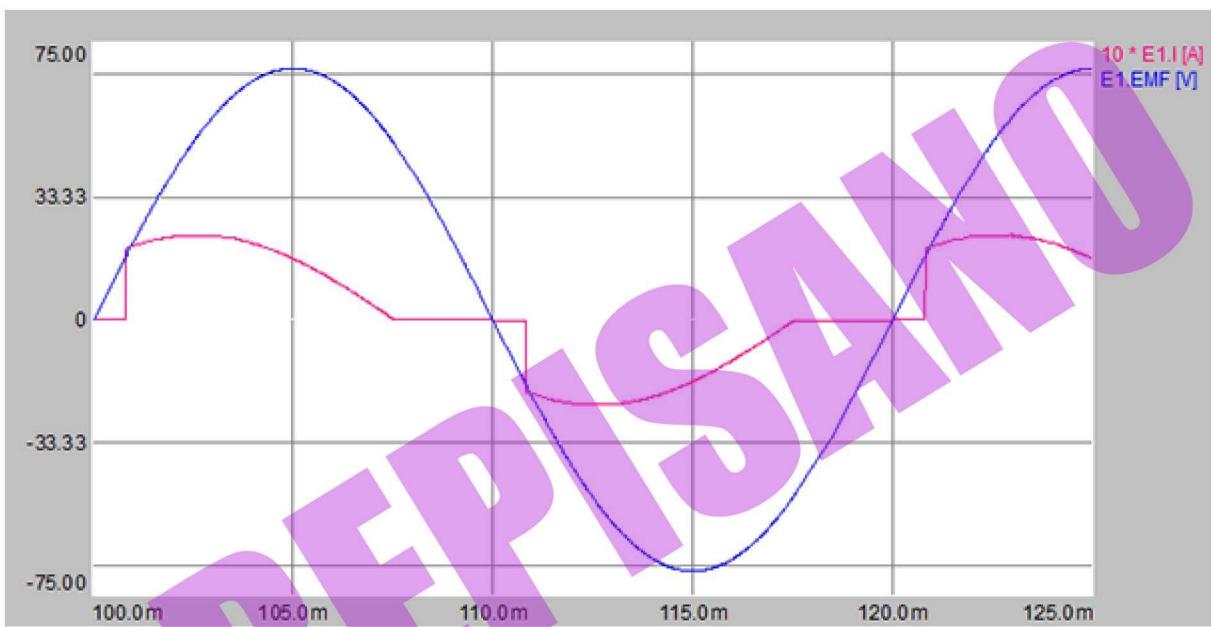


Slika 5

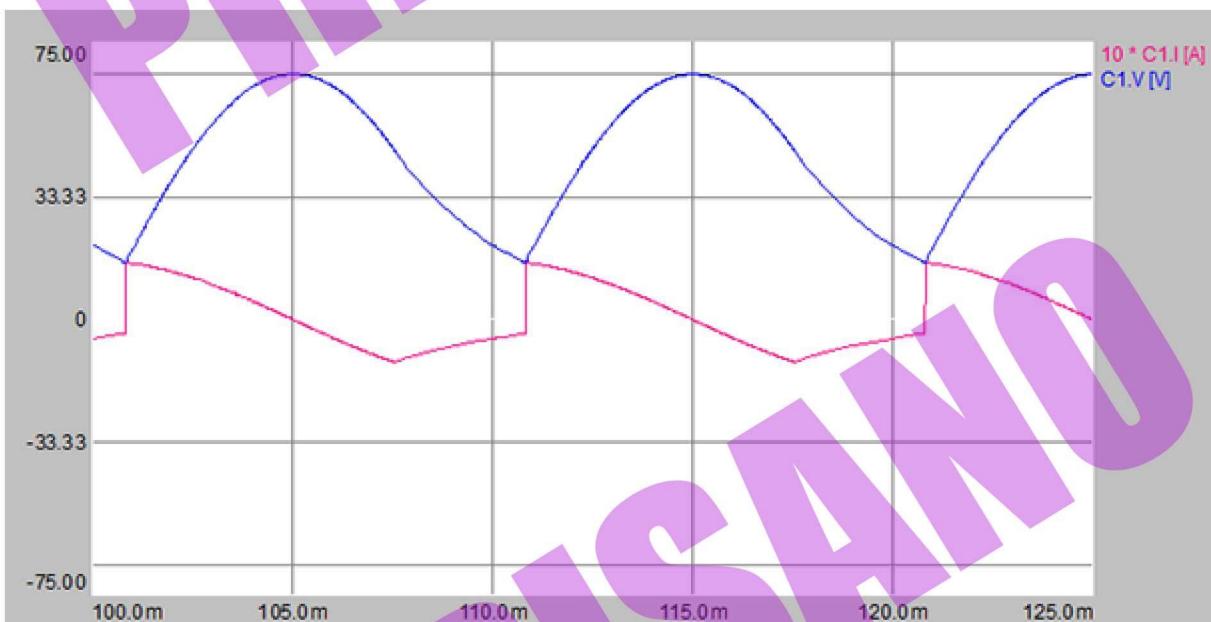


Slika 6

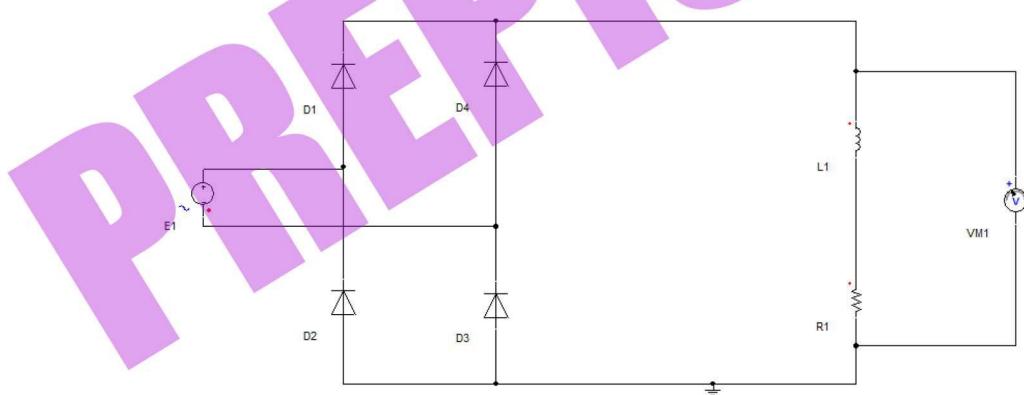
U simulaciji je sada kondenzator podešen na vrijednost  $C = 75 \mu\text{F}$ . Slika 7 prikazuje nove strujno-naponske odnose na mrežnoj strani, a Slika 8 na strani trošila. Kondenzator ima veći kapacitet pa je izraženiji efekt smanjivanja valovitosti napona i struja kondenzatora je većeg iznosa.



Slika 7

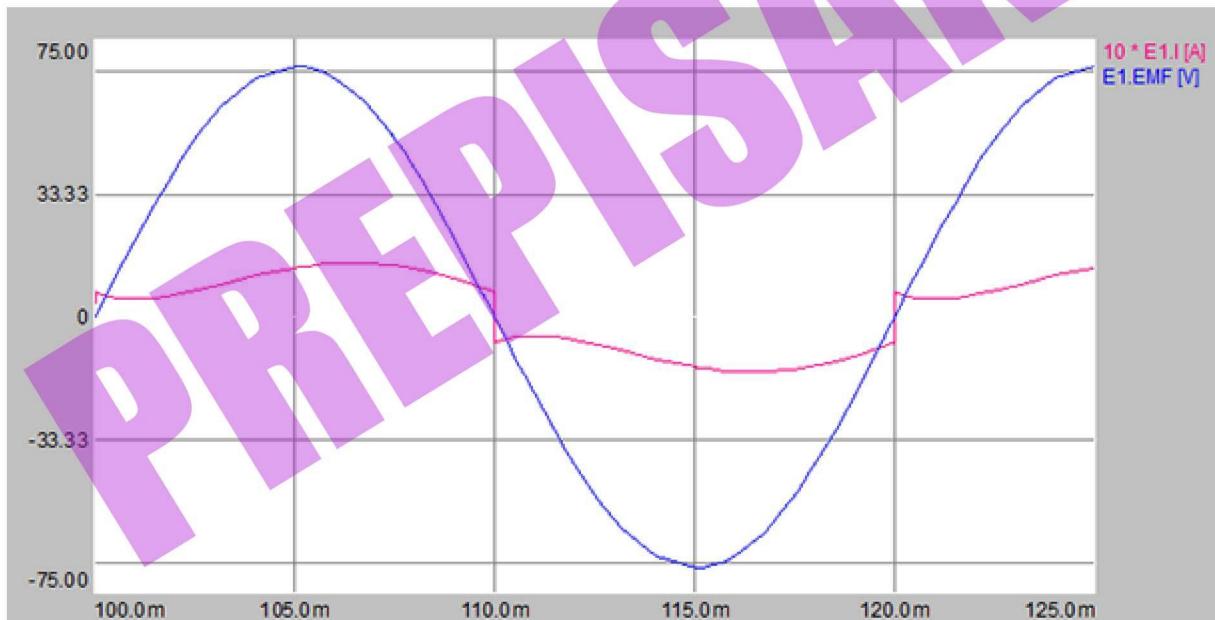


Slika 8

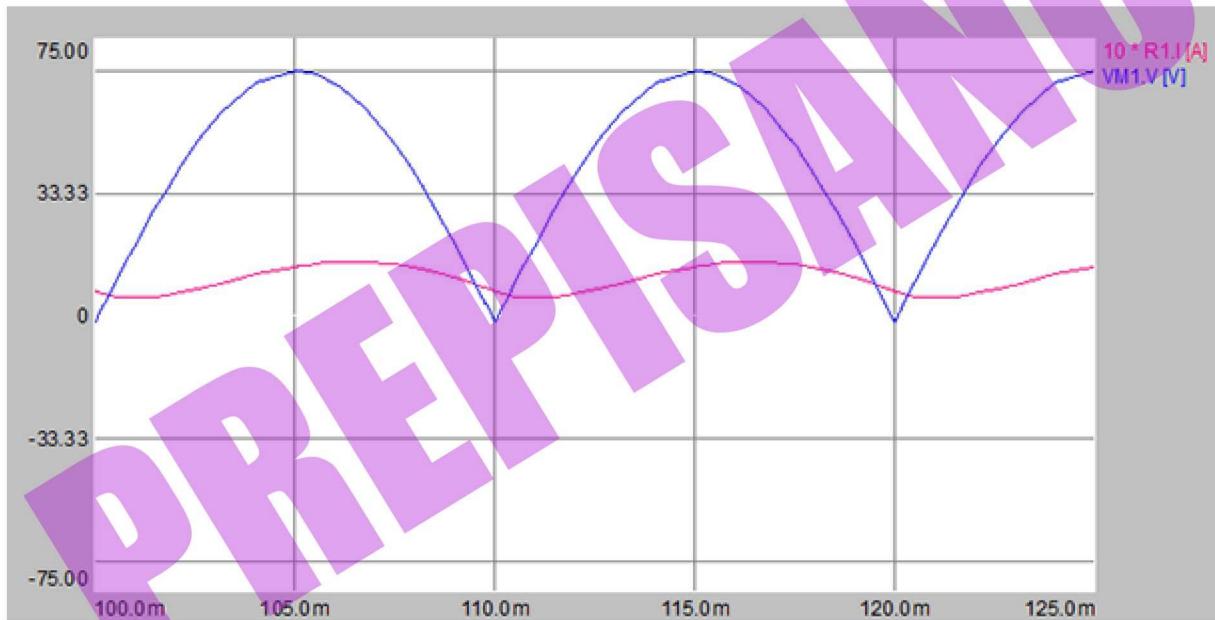


Slika 9

Slika 9 prikazuje novu simulacijsku shemu s induktivnim trošilom. Otporu je u seriju dodan induktivitet iznosa  $L = 70 \text{ mH}$ . Voltmetar na služi za mjerjenje napona trošila, odnosno kombinacije induktiviteta i otpora. Slika 10 prikazuje napon i struju na mrežnoj strani, a Slika 11 na strani trošila. Zbog jako induktivnog trošila, struja trošila kasni u fazi za naponom, a valni oblik struje mreže bliži je pravokutnom nego sinusnom obliku.



Slika 10



Slika 11

# Laboratorij

## Tim:

Grupa BROJ:

Studenti

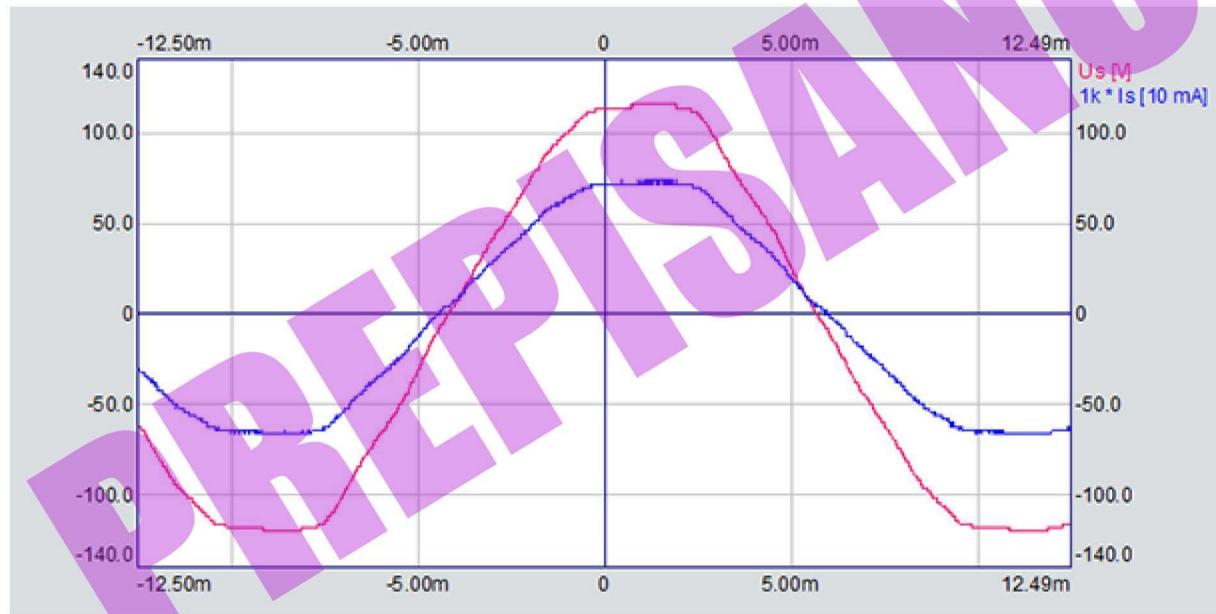
Radno mjesto: pult BROJ

## Popis opreme:

- 4 zavodske diode za učinsku elektroniku
- mjerni otpornik 8022 (shunt):  $R = 0.01 \Omega \pm 0.25\%$ ;  $I_n = 10 A$ ;  $P_n = 100 mW$
- otpornik  $R = 390 \Omega$ ;  $P = 12 W$
- otpornik  $R = 40 \Omega$ ;  $P = 100 W$  (dva otpornika  $R = 20 \Omega$  spojena u seriju)
- kondenzator  $C = 25 \mu F \pm 10\%$ ; (tri komada, prvo korišten jedan, a zatim tri spojena u paralelu)
- zavojnica  $L = 70 mH$
- element I4 za lakše spajanje mjernog otpornika u strujni krug
- sklopka koja odjednom uklapa ili isklapa tri voda
- mrežni izvor napona efektivne vrijednosti 48.2 V (u nekim mjerenjima 96 V) na sekundaru transformatora
- osciloskop TDS2002
- prijenosno računalo Lenovo

## Vježba:

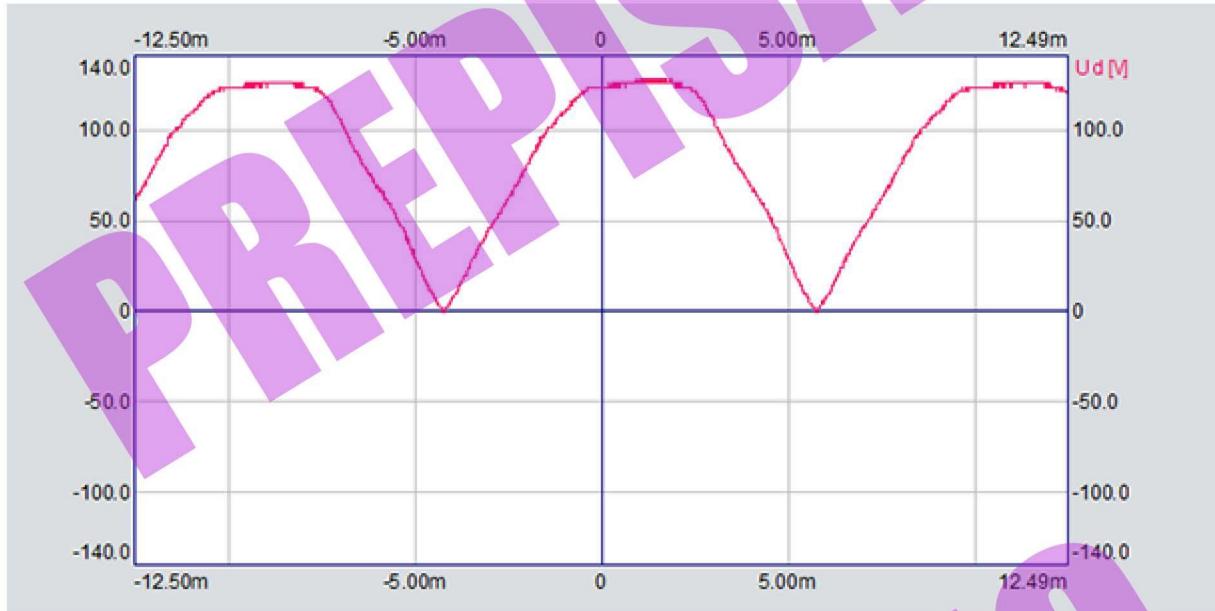
Pri mjerenuju u laboratoriju zbog sigurnosnih razloga koristimo transformator koji snižava mrežni napon s 220V na 96 V. Taj napon koristimo za vježbu s djelatnim trošilom.



Slika 12

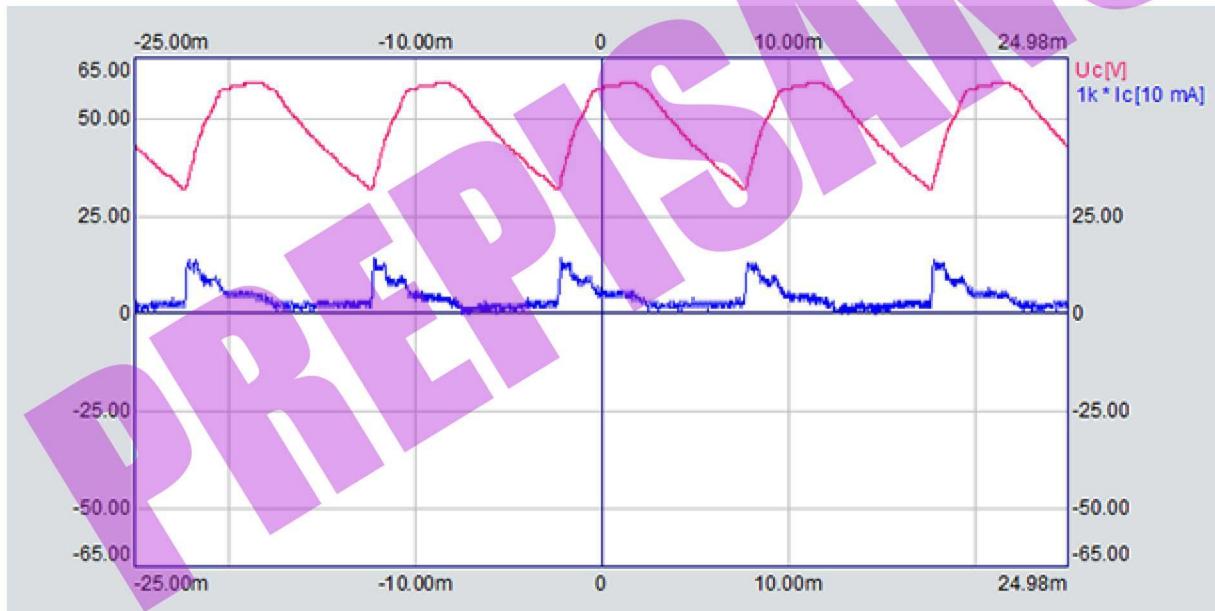
Slika 12 prikazuje napon i struju mreže, vidljivo je da napon nema čisti sinusni valni oblik, već je zagađen višim harmonicima, zbog čega je „ravan“ blizu vršne vrijednosti i „neravan“ u okolini nul-točke. Struju mjerimo tako što u granu u kojoj želimo mjeriti struju spojimo u seriju mjerni otpornik 8022, i zatim na osciloskopu snimamo napon na otporniku. Njegov otpor je  $R = 0.01 \Omega$  pa je vrijednost na osciloskopu 100 puta manja od stvarne vrijednosti struje. To je na grafu naglašeno zapisom struje kao  $I_s$  [10 mA].

Slika 13 prikazuje ispravljeni napon na trošilu pri gornjim uvjetima, vidljivo je da nema čisti sinusni valni oblik kao ni napon mreže.



Slika 13

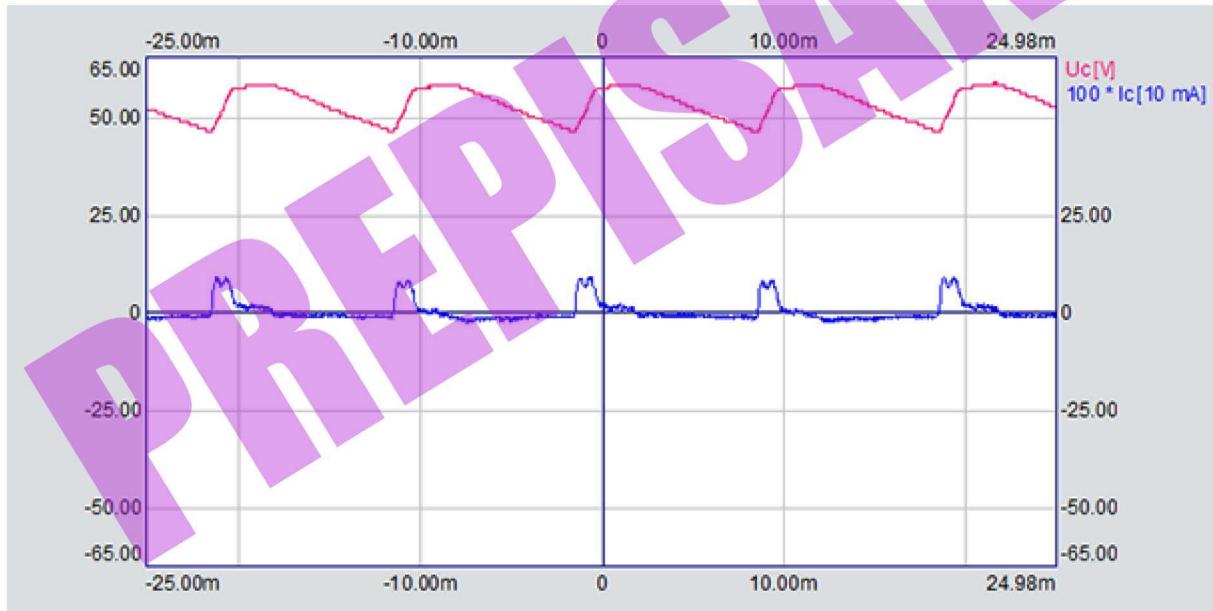
Za sljedeće mjerjenje dodajemo kondenzator  $C = 25 \mu F$  u paralelu otporniku.



Slika 14

Slika 14 prikazuje napon i struju kondenzatora. Napon je zbog kondenzatora i načina rada opisanog u seminaru smanjene valovitosti, a na odzivu struje vidi se jak šum jer mjerimo napon na otporniku malog otpora, pa je i taj napon u rasponu od 0 mV do 100 mV.

U sljedećem mjerenu smo umjesto jednog koristili tri kondenzatora u paraleli, što daje ukupan kapacitet  $C = 75 \mu\text{F}$ . Slika 15 prikazuje napon i struju kroz takvu cjelinu kondenzatora. Zbog jačeg kapaciteta napon je sada konstantniji, a struja jača.



Slika 15

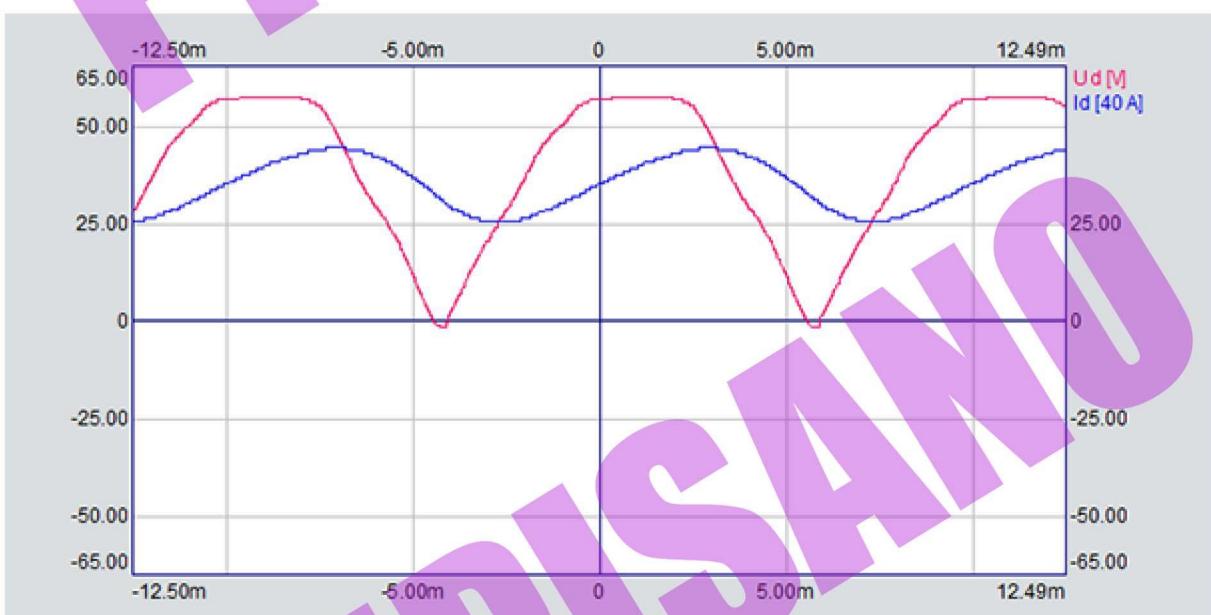
U posljednjoj vježbi promatramo ponašanje kruga s induktivnim trošilom pa zato otporniku dodajemo u seriju zavojnicu  $L = 70 \text{ mH}$ . Trošilo je sada jako induktivnog karaktera, što se vidi u odzivima struje. Slika 16 prikazuje napon i struju na mrežnoj strani. Napon je ostao nepromijenjen, a struja ima gotovo pravokutan valni oblik.

Slika 17 prikazuje napon i struju trošila i vidimo da jaki induktivitet ispravlja struju kroz trošilo i smanjuje joj valovitost. Pri mjerenu struje trošila nismo morali koristiti mjerni otpornik, s kojim bi šum na odzivu bio velik, već smo iskoristili otpornik  $R = 40 \Omega$  i mjerili napon na njemu, pritom pazeci na faktor pretvorbe iz napona u struju. To je na grafu naznačeno notacijom  $\text{Id} [40 \text{ A}]$ .

Sva mjerena izvode se na način da osciloskopom TDS 2002 mjerimo željene valne oblike napona, a zatim osciloskop priključimo na prijenosno računalo i u programskom okruženju Wavestar spremimo izlaz s osciloskopa u .csv datoteku. Tu datoteku kasnije možemo otvoriti i analizirati u programu DAY, alatu za obradu podataka unutar programskog okruženja Simplorer.



Slika 16

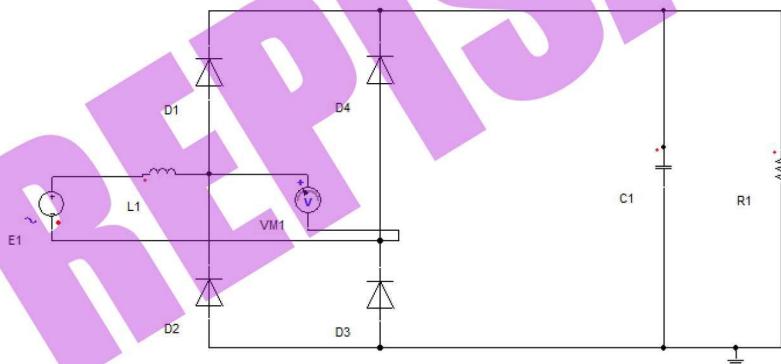


Slika 17

## Domaća zadaća

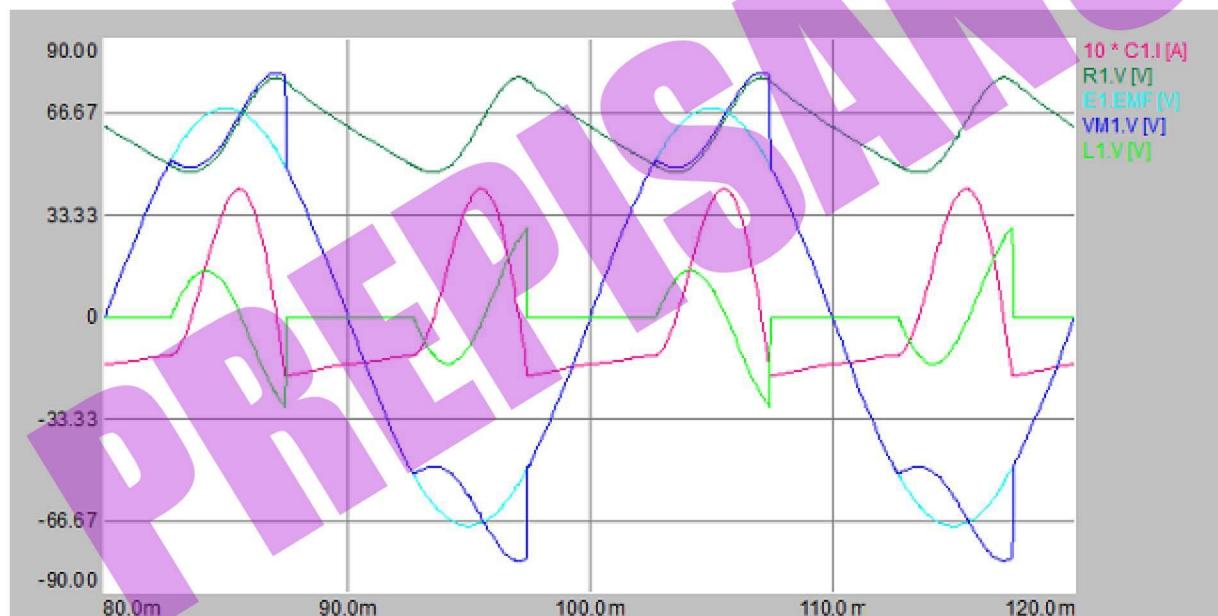
Mnogi elektronički uređaji koriste ispravljače s kondenzatorima kako bi stabilizirali napon za trošilo. Time preko struje unose u mrežu više harmonike, primjerice u trenutku početka punjenja kondenzatora. Za induktivitete je impedancija velika pri visokim frekvencijama, pa se događaju veći padovi napona koji tako izobličavaju struju mreže.

Slika 18 prikazuje simulacijsku shemu za simuliranje pojave onečišćenja valnog oblika napona mreže višim harmonicima. Izvor daje sinusni napon efektivne vrijednosti  $U_{rms} = 48.2$  V, a vrijednosti ostalih elemenata su  $R = 40 \Omega$ ,  $C = 300 \mu F$  i  $L = 5 \text{ mH}$ .



Slika 18

Slika 19 prikazuje valne oblike od interesa za promatranje ove pojave. Tamnozelenom bojom prikazan je napon na otporu, kojeg je stabilizirao kondenzator. Struja koja puni kondenzator, prikazana crvenom bojom, teče i kroz induktivitet te na njemu stvara pad napona, na grafu označen svijetlozelenom, pri velikim promjenama struje. Taj pad napona utječe na izmjereni napon mreže na voltmetru prikazan tamnoplavom bojom, te on odstupa od idealnog sinusnog napona prikazanog svjetloplavom bojom.



Slika 19

U drugom dijelu zadaće potrebno je napraviti FFT analizu frekvencijskog sastava napona sekundara transformatora. Korištenjem alata DAY analiziramo jednu periodu napona trajanja 20 ms i u obzir uzimamo frekvencijske komponente čija je amplituda veća od 0.25% maksimalne amplitude napona. Slika 20 daje tablični prikaz frekvencijskih komponenti i njihovih amplituda i faza.

	f [Hz]	CH 1	Phi [rad]	Phi [deg]	%(Max)
Minimum	50.00000	163.68239m	492.24354m	28.20348	268.27330m
Maximum	950.00000	61.01330	6.15661	352.74762	100.00000
0	50.00000	61.01330	4.46516	255.83493	100.00000
1	150.00000	917.54634m	2.56392	146.90184	1.50385
2	250.00000	1.49384	492.24354m	28.20348	2.44838
3	350.00000	826.96698m	6.15661	352.74762	1.35539
4	450.00000	537.05123m	4.47276	256.27045	880.21996m
5	550.00000	540.18693m	2.21320	126.80713	885.35934m
6	650.00000	569.74495m	5.56648	318.93570	933.80455m
7	750.00000	163.68239m	712.13988m	40.80261	268.27330m
8	950.00000	190.56179m	1.00115	57.36140	312.32829m

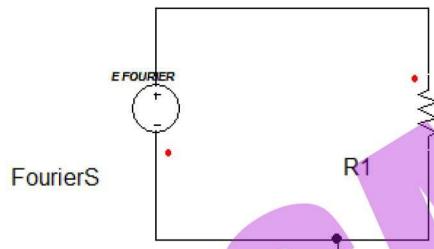
Slika 20

Slika 21 prikazuje iste podatke kao i tablica, ali na grafičkom prikazu. Idealni sinusni napon bi imao samo komponentu na 50 Hz.



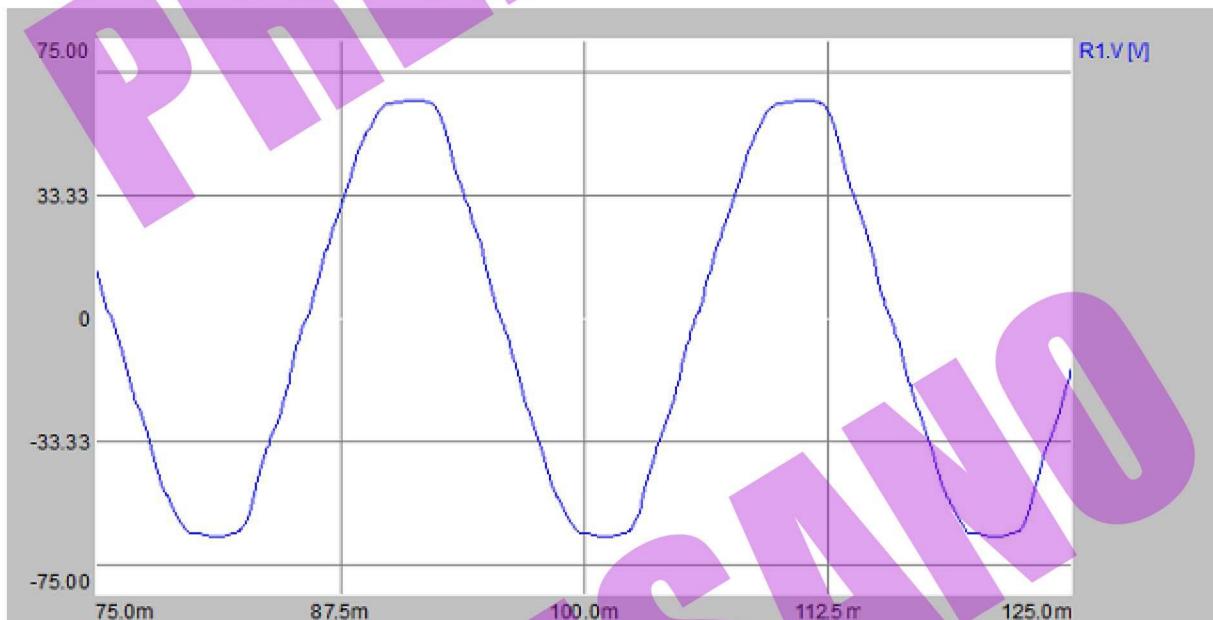
Slika 21

Programom DAY možemo spremiti tablicu FFT analize u .mdx formatu te ju kasnije učitati u programu Simplorer Schematic kao podatke o izvoru *Fourier source*. Slika 22 prikazuje simulacijsku shemu s Fourierovim izvorom i jednim otpornikom.



Slika 22

Slika 23 prikazuje napon na otporniku dobiven korištenjem Fourierova izvora s podacima FFT analize stvarnog mrežnog napona te on sada sliči stvarnom obliku napona u laboratoriju.



Slika 23

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Zavod za elektrostrojarstvo i automatizaciju

**PREPISANO**

Ime Prezime

JMBAG

**IZVJEŠTAJ ZA 4. LABORATORIJSKU VJEŽBU**

**Poluvalni upravljivi ispravljač**

Praktikum učinske elektronike

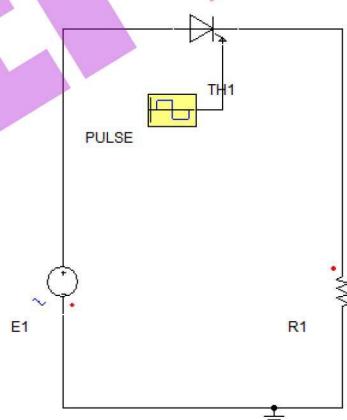
**PREPISANO**

Zagreb, 2012. / 2013.

## Seminar

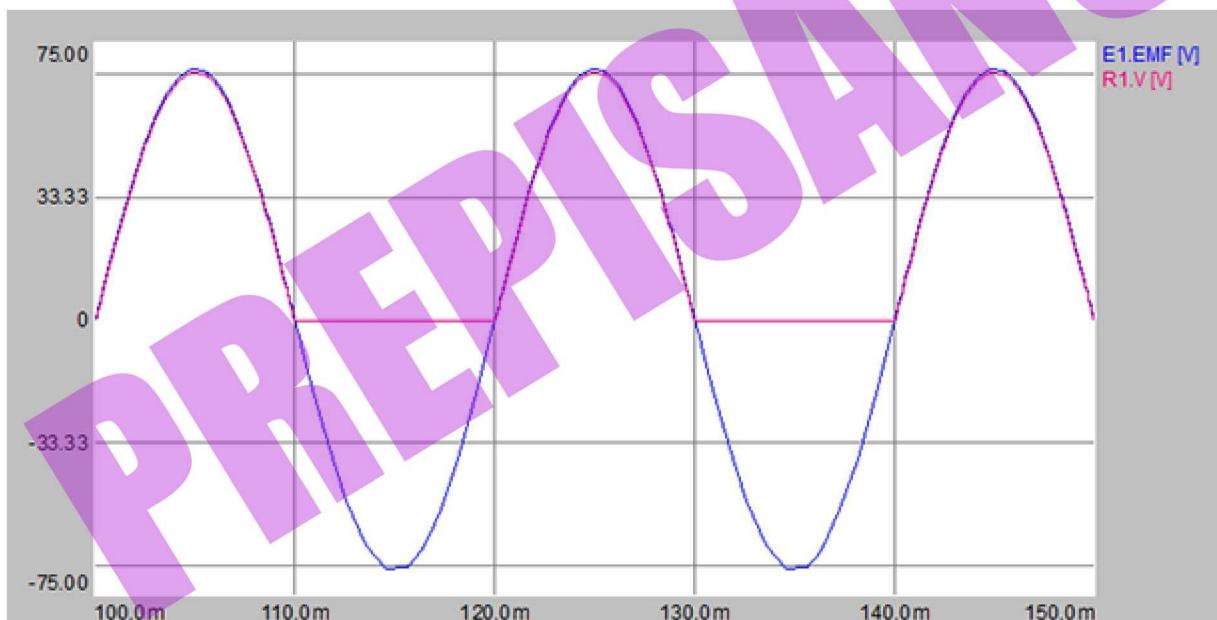
Četvrta laboratorijska vježba proučava poluvalni upravljivi ispravljač u krugu koji se sastoji od mrežnog izvora napona, tiristora na koji je doveden naponski upravljački impuls i djelatnog ili induktivnog trošila s i bez poredne diode. Poluvalni ispravljač koristi samo jedan tiristor te na trošilo šalje pozitivan napon samo u pozitivnoj poluperiodi napona izvora. U negativnoj poluperiodi napona izvora tiristor na sebe preuzima sav napon – kažemo da se nalazi u stanju zapiranja. Tiristor će provesti struju ako se nalazi u stanju blokiranja (ako mu dovedemo pozitivan napon) i ako mu na upravljačku elektrodu (Gate) dovedemo pozitivan naponski impuls. Tiristor će iskllopiti tek kad struja padne na 0 A.

Slika 1 prikazuje simulacijsku shemu poluvalnog upravljivog ispravljača s djelatnim trošilom,  $R = 20 \Omega$ . Na upravljačku elektrodu tiristora doveden je blok Pulse, kojim možemo birati kut upravljanja  $\alpha$ , ovisno o faznom pomaku impulsa u odnosu na napon izvora.



Slika 1

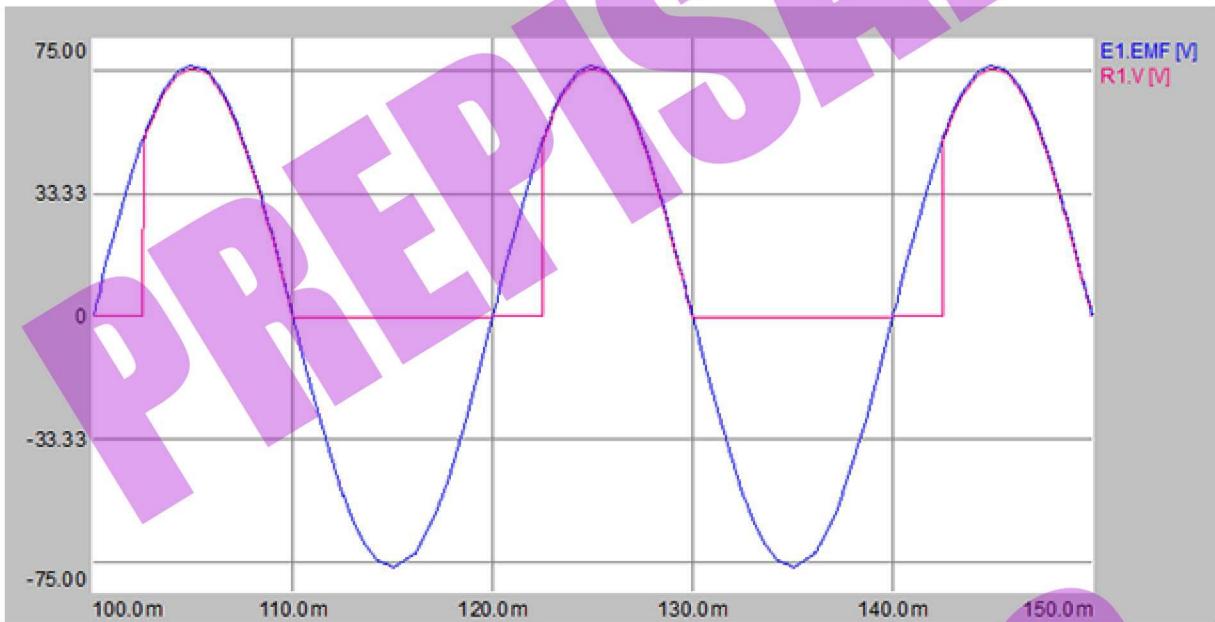
Izvor je podešen na sinusni valni oblik efektivne vrijednosti 48.2 V.



Slika 2

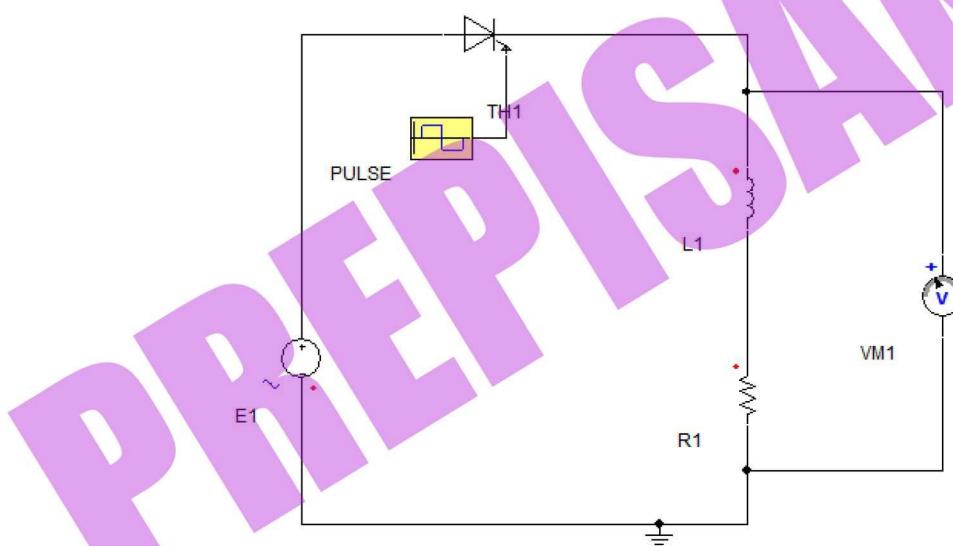
Slika 2 prikazuje napon izvora i trošila pri kutu upravljanja  $\alpha = 0^\circ$ . Tiristor uklapa čim krene pozitivni poluval napona izvora te isklapa kad krene negativni poluval napona izvora, a napon trošila je čisti poluvalno ispravljeni sinusni napon.

Slika 3 prikazuje napon izvora i trošila pri kutu upravljanja  $\alpha = 45^\circ$ . Tiristor uklapa 2.5 ms nakon početka pozitivnog poluvala napona izvora. Do tada je tiristor na sebi držao sav napon pa je napon na otporu bio jednak nuli. Tiristor isklapa kad struja trošila padne na nulu, jednako kao i u prethodnom slučaju.



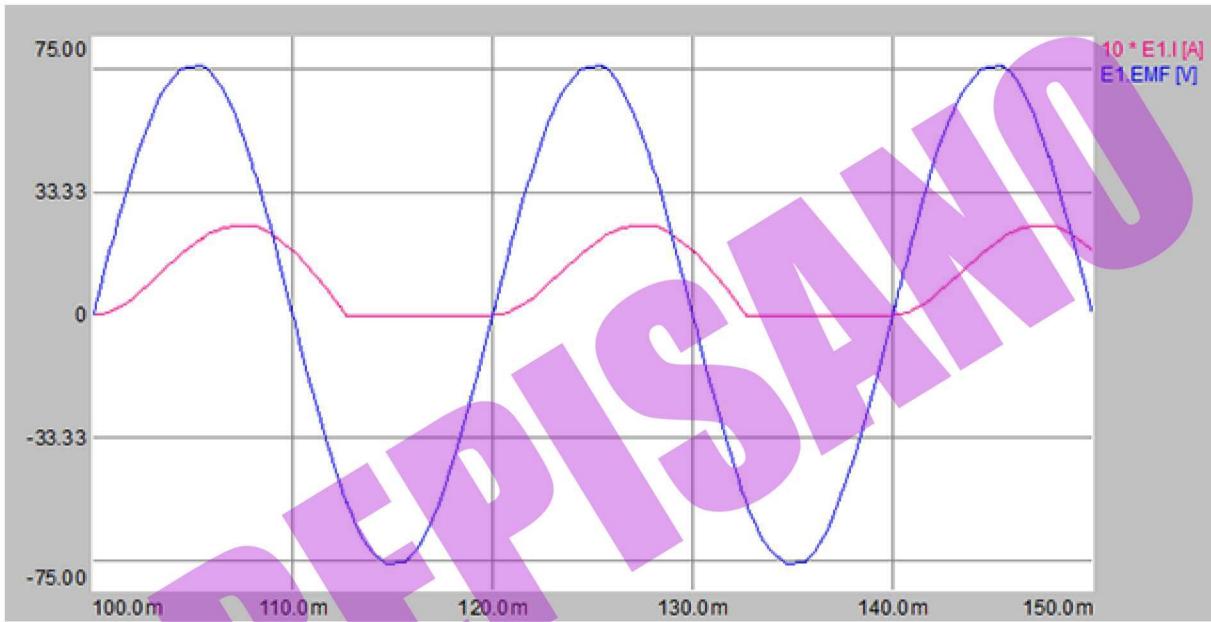
Slika 3

U sljedećoj vježbi otporu dodajemo induktivitet  $L = 70 \text{ mH}$  u seriju i voltmetrom mjerimo napon trošila kao napon kombinacije otpora i induktiviteta.



Slika 4

Slika 5 prikazuje napon i struju izvora, a Slika 6 napon i struju trošila pri kutu upravljanja  $0^\circ$ .



Slika 5

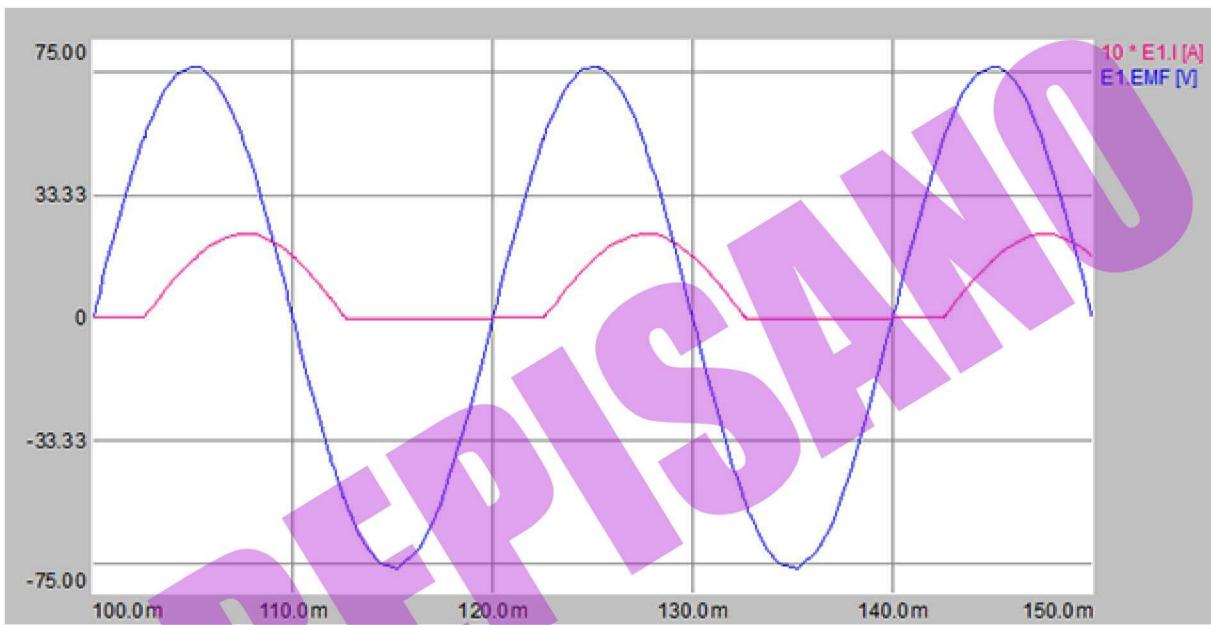
Zbog induktiviteta struja kasni u fazi za naponom. To znači da kada napon izvora padne na nulu, struja još uvijek teče u krugu te tiristor još uvijek vodi. Zato se na naponu trošila vidi negativni dio dok struja pada na nulu prolazeći kroz otpor i tako trošeći akumuliranu energiju.



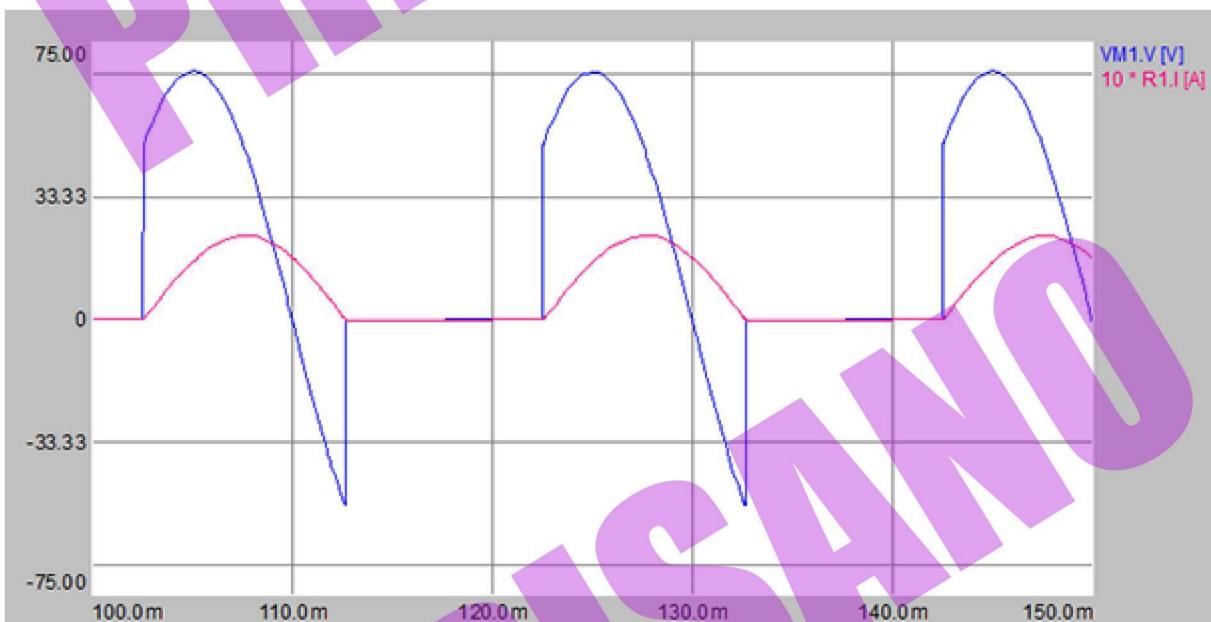
Slika 6

Slika 7 prikazuje napon i struju izvora, a Slika 8 napon i struju trošila za kut upravljanja  $45^\circ$ .

Kut upravljanja vidi se na valnom obliku napona trošila, koji skoči na vrijednost napona izvora  $2.5 \text{ ms}$  nakon prolaska napona izvora kroz nulu. I u ovom slučaju tiristor isklapa nakon što struja padne na nulu tako što se potroši energija akumulirana u induktivitetu.



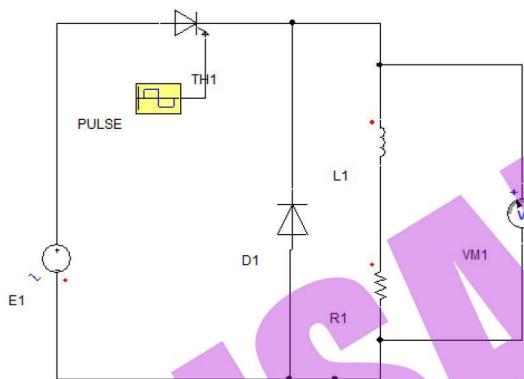
Slika 7



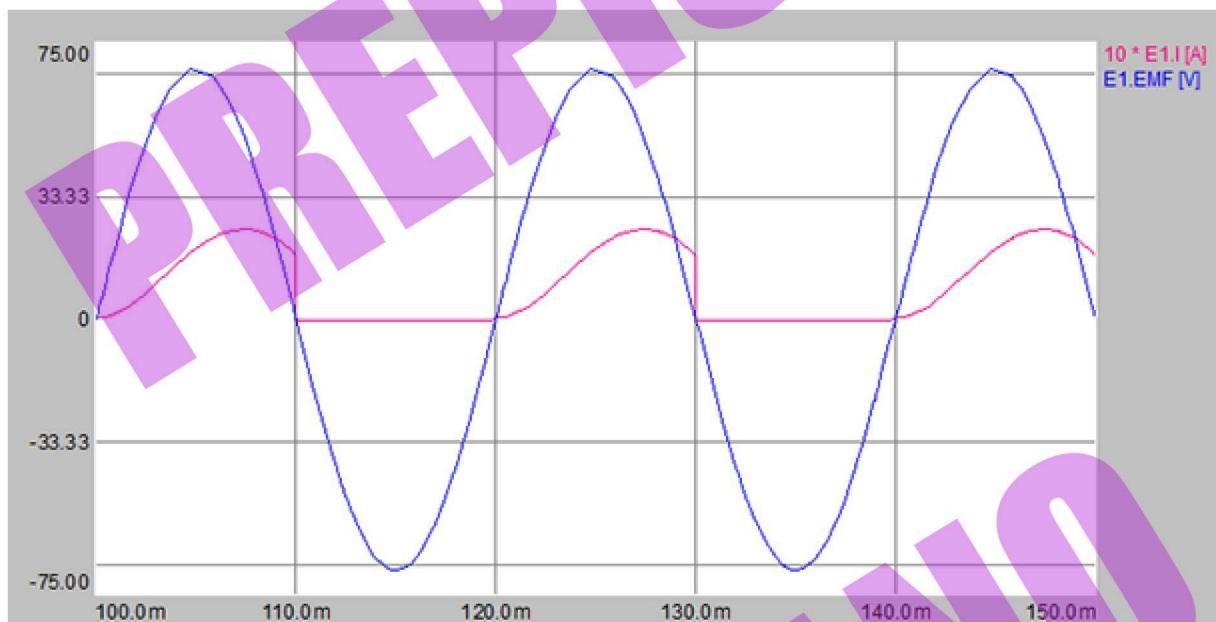
Slika 8

U sljedećoj vježbi u paralelu trošilu dodajemo porednu diodu. Poredna dioda pruža put struji koja teče iz induktiviteta zbog akumulirane energije te ta struja sada ne teče kroz tiristor. To za posljedicu ima trenutačno isklapanje tiristora kada napon izvora kreće u negativnu poluperiodu. Tada napon na diodi postane pozitivan i ona može voditi struju iz induktiviteta.

Slika 9 prikazuje simulacijsku shemu takvog sklopa s porednom diodom. Slika 10 prikazuje napon i struju izvora na koji je priključen sklop s porednom diodom pri kutu upravljanja  $0^\circ$ . Struja izvora trenutačno pada na 0 kada tiristor prestane voditi, odnosno kada dioda provede.



Slika 9



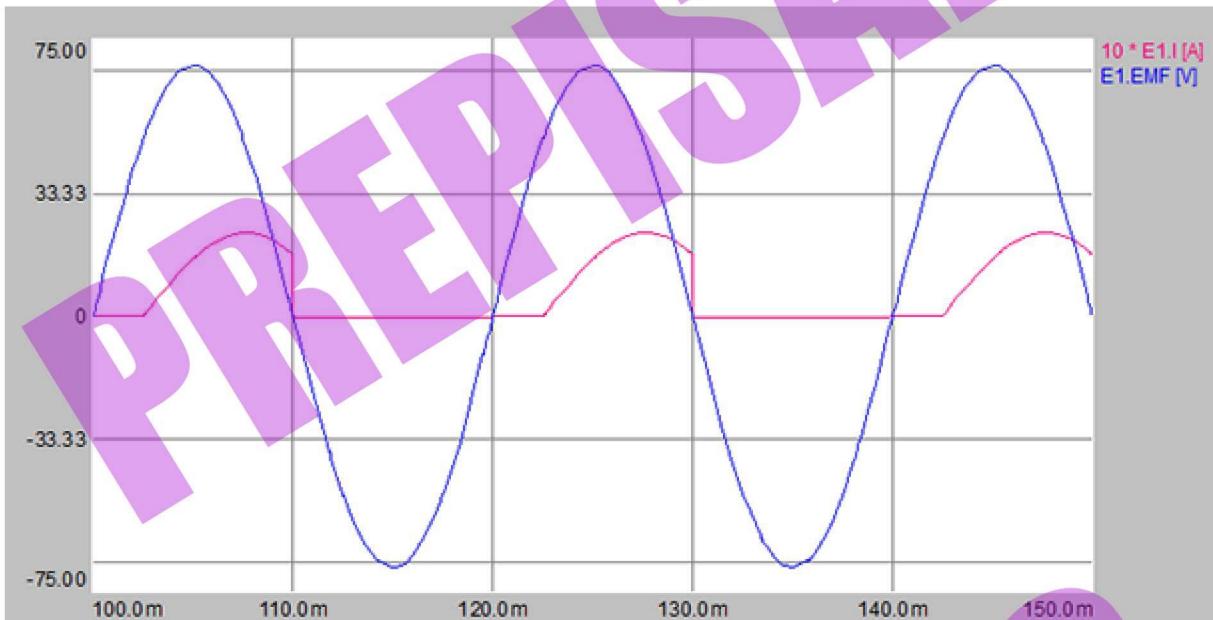
Slika 10



Slika 11

Slika 11 prikazuje napon i struju trošila u sklopu s porednom diodom pri kutu upravljanja  $0^\circ$ . Tiristor je isklasio odmah čim je napon izvora krenuo u negativnu poluperiodu, što znači da on tada na sebi drži zaporni napon. Zbog toga napon na trošilu nikada nije negativan. Struja trošila u poluperiodi u kojoj je napon trošila nula pada prema nuli, trošeći energiju na otporu.

Slika 12 prikazuje napon i struju izvora na koji je priključen sklop s porednom diodom pri kutu upravljanja  $45^\circ$ . Odnosi u krugu su slični kao u prethodnom slučaju, osim što tiristor uklapa tek 2.5 ms nakon početka pozitivne poluperiode napona izvora.



Slika 12

Slika 13 prikazuje napon i struju trošila, vrijede jednake opaske kao u prethodnom slučaju, osim što se vidi uklapanje tiristora 2.5 ms nakon početka pozitivnog poluvala napona izvora.



Slika 13

# Laboratorij

## Tim:

Grupa BROJ:

Studenti

Radno mjesto: pult BROJ

## Popis opreme:

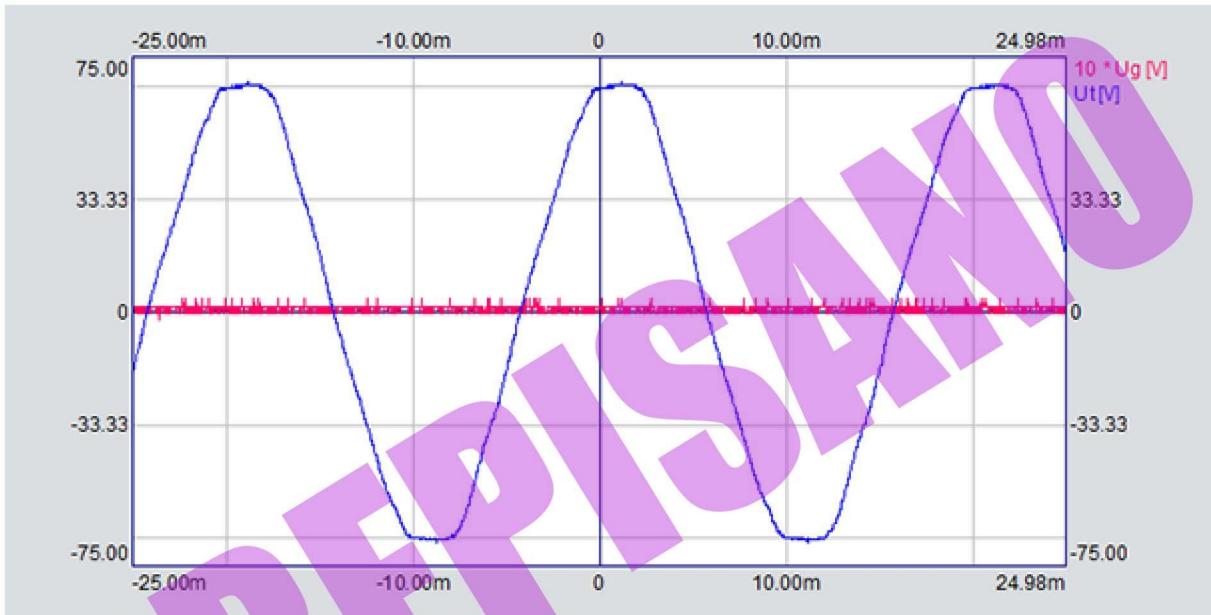
- zavodska dioda za učinsku elektroniku
- zavodski tiristor za učinsku elektroniku
- mjerni otpornik 8022 (shunt):  $R = 0.01 \Omega \pm 0.25\%$ ;  $I_n = 10 A$ ;  $P_n = 100 mW$
- otpornik  $R = 20 \Omega$ ;  $P = 200 W$
- zavojnica  $L = 70 mH$
- element I4 za lakše spajanje mjernog otpornika u strujni krug
- mrežni izvor napona efektivne vrijednosti 48.2 V na sekundaru transformatora
- generator impulsa za upravljački signal tiristora
- osciloskop TDS2002
- prijenosno računalno Lenovo

## Vježba:

Prije početka mjerena potrebno je podesiti uređaj za sinkronizaciju koji generira naponske impulse koji se dovode na upravljačku elektrodu tranzistora. Generator se napaja izmjeničnim naponom efektivne vrijednosti 220 V, a sklop kao izvor koristi transformator koji taj napon snižava na efektivnu vrijednost 48.2 V. U prvom dijelu vježbe koristimo djelatno trošilo s otpornikom  $R = 20 \Omega$ . Za ispravnu sinkronizaciju potrebno je provjeriti na koju fazu koristi priključak od 220 V, u našem slučaju to je faza R, i na nju se spaja transformator. Također je potrebno provjeriti koji je pozitivan a koji negativan pol priključka uređaja. Ako tranzistor ne uklapa za bilo koji kut  $\alpha$  od  $0^\circ$  do  $180^\circ$ , to znači da se ti impulsi događaju za vrijeme negativne poluperiode napona izvora. U tom slučaju potrebno je zamijeniti priključke uređaja na izvoru od 220 V.

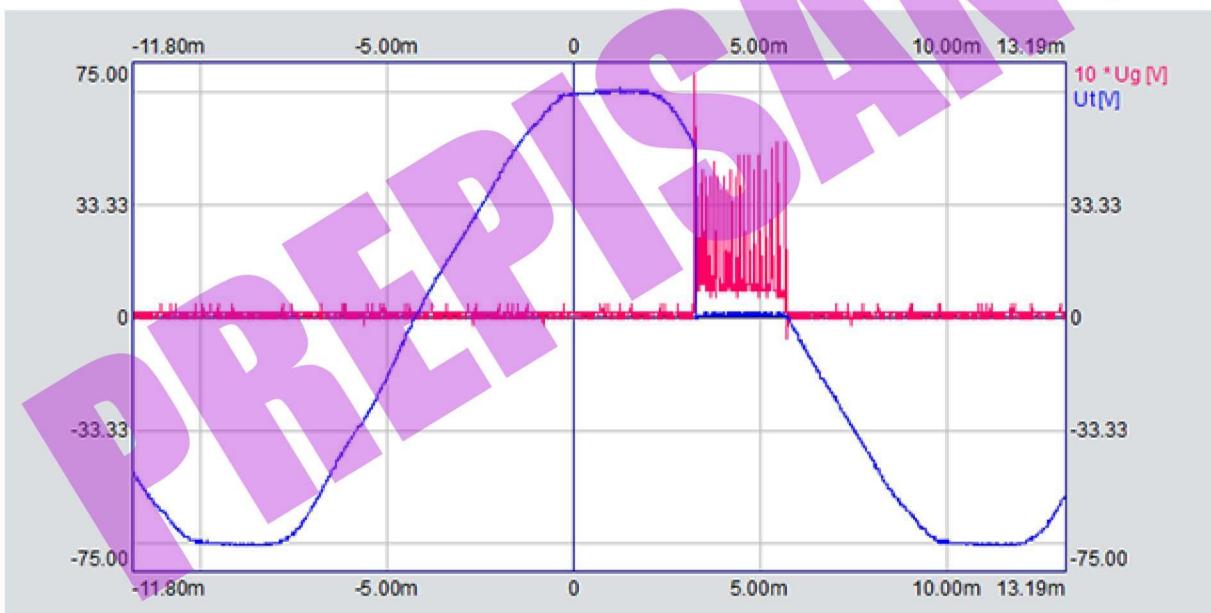
Pri mjerenu nam se potkrala pogreška kada smo trebali snimiti sliku napona na tiristoru i napona na upravljačkoj elektrodi tiristora za kuteve upravljanja  $\alpha = 0^\circ$  i  $\alpha = 45^\circ$ , jer smo zabunom snimili slike za kuteve  $\alpha = 180^\circ$  (Slika 14) i  $\alpha = 135^\circ$  (Slika 15).

Tako na Slika 14 vidimo da tiristor na sebe preuzima napon izvora kroz cijeli period i da taj napon nije čistog sinusnog oblika, a razlozi te pojave proučeni su u trećoj laboratorijskoj vježbi. Kut upravljanja veći od  $180^\circ$  nema smisla jer tada je napon na tiristoru ionako zaporni (negativan) umjesto blokirni (pozitivan) pa on ne bi proveo struju. U ovom slučaju bi upravljački impuls došao na kraju pozitivne periode, točno u trenutku kada napon postaje negativan pa tiristor nikada ne vodi.



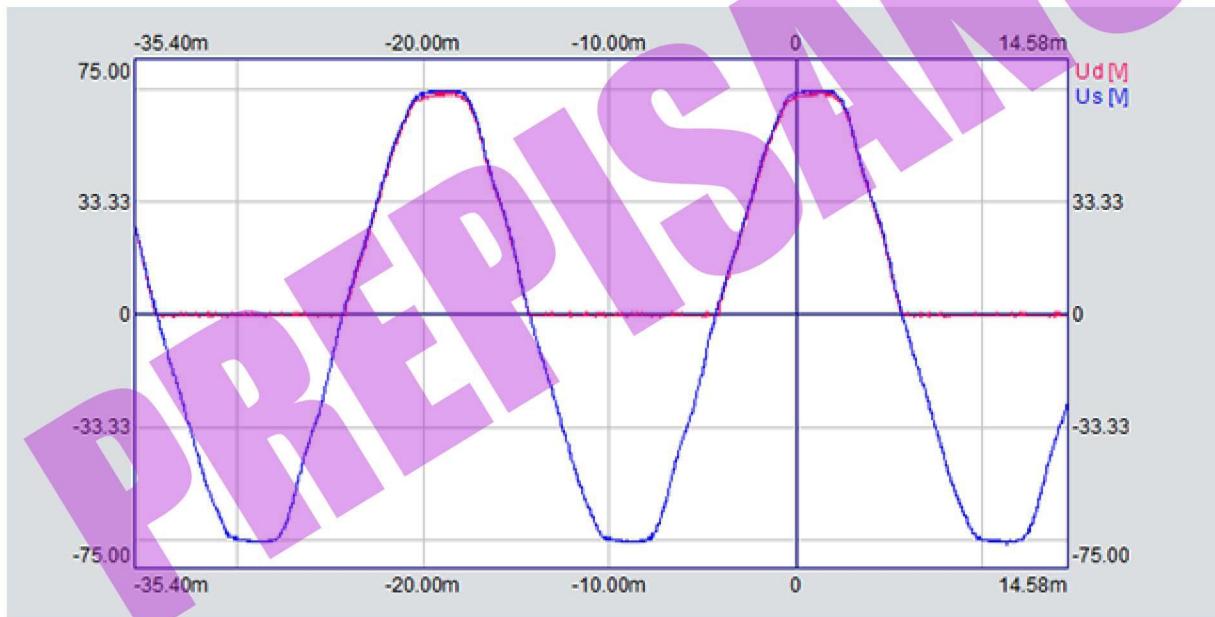
Slika 14

Na Sliku 15 vidimo da upravljački impuls dolazi 7.5 ms nakon što napon izvora krene u pozitivnu poluperiodu, što odgovara kutu upravljanja  $\alpha = 135^\circ$ . Do tog trenutka tiristor je na sebi držao blokirni napon, a onda je počeo voditi, pa je zato na njemu napon blizu nuli, iako je naravno veći od nule jer se radi o realnom tiristoru. Kada bi snimili slike za kuteve upravljanja  $\alpha = 0^\circ$  i  $\alpha = 45^\circ$ , vidjeli bi da za kut od  $0^\circ$  upravljački impuls traje kroz cijelu pozitivnu poluperiodu napona izvora, a za to vrijeme napon tiristora je blizu nuli, on vodi struju i prenosi napon izvora na djelatno trošilo. Za kut  $45^\circ$  slika bi bila slična slici za kut  $135^\circ$ , osim što bi tiristor počeo voditi 2.5 ms nakon što napon izvora krene u pozitivnu poluperiodu.



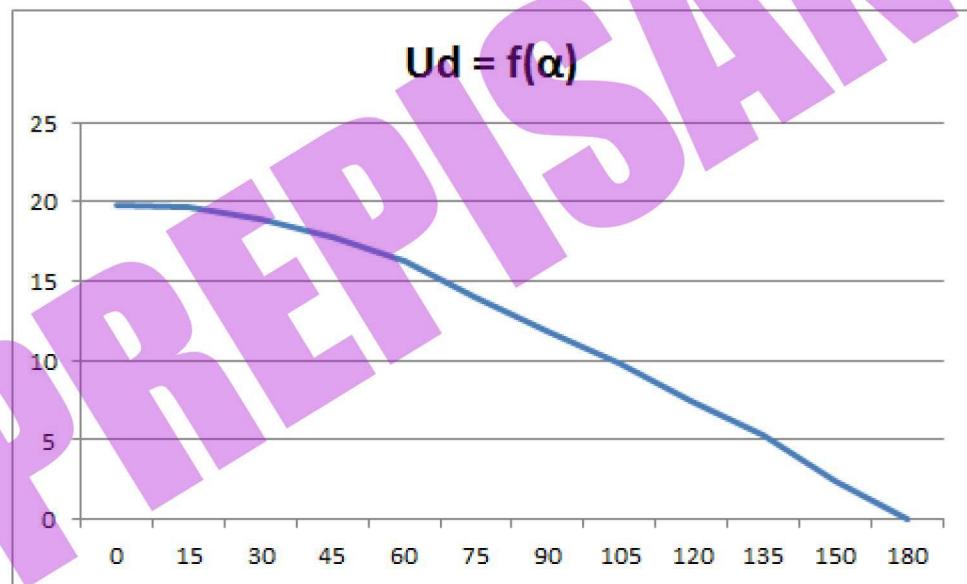
Slika 15

Slika 16 prikazuje napon na izvoru i napon na trošilu za kut upravljanja  $\alpha = 0^\circ$ . Tiristor je uklopio odmah na početku perioda i pozitivan napon s izvora se prenosi na napon na otporniku, umanjen za mali napon na tiristoru. Tijekom negativne poluperiode struja kroz tiristor pada na nulu i on je za vrijeme trajanja negativne poluperiode napona izvora u stanju zapiranja.



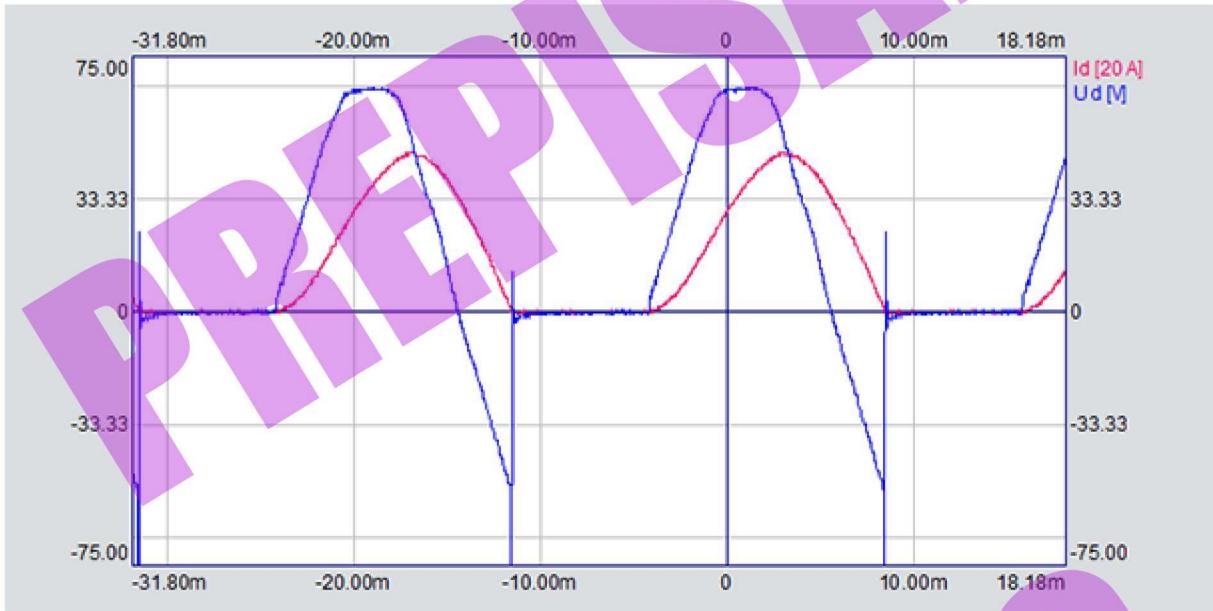
Slika 16

Pomoću osciloskopa smo funkcijom *Measure* izmjerili srednje vrijednosti napona trošila za kuteve upravljanja od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  u koracima od  $15^\circ$ . Te vrijednosti smo u programu Microsoft Excel nacrtali na graf koji prikazuje upravljačku karakteristiku sklopa, odnosno ovisnost napona trošila o kutu upravljanja  $\alpha$ . Upravljačka karakteristika sklopa prikazana je na Slika 17.



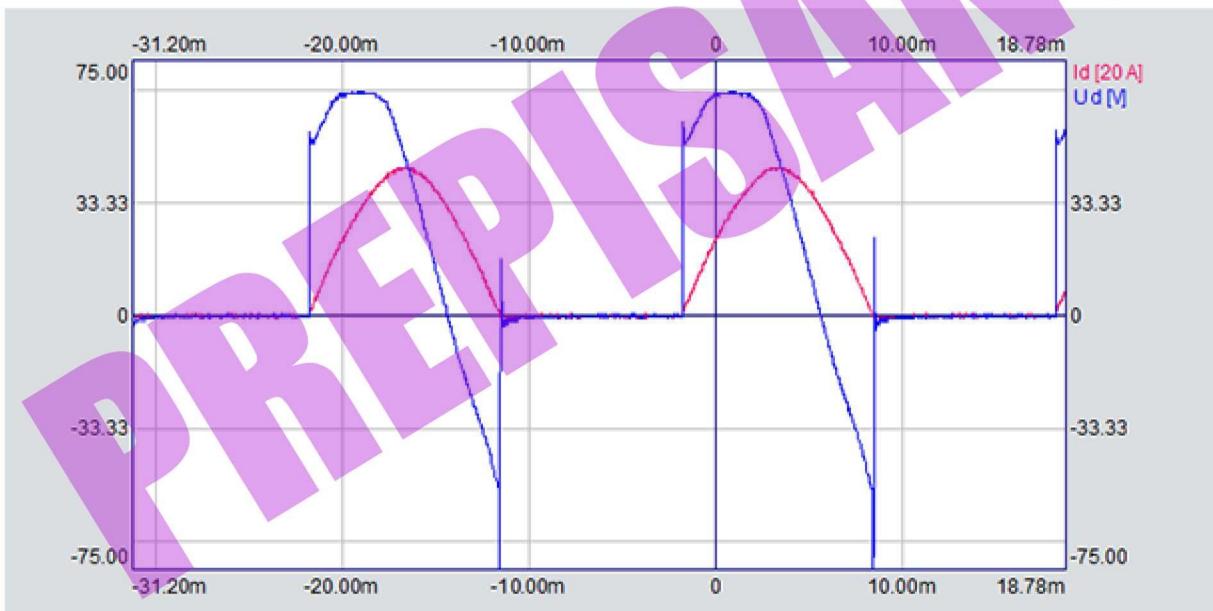
Slika 17

U drugom dijelu vježbe otporniku u seriju dodajemo zavojnicu induktiviteta  $L = 70 \text{ mH}$ . Trošilo je sada jako induktivnog karaktera, što se vidi u odzivu struje. Slika 18 prikazuje napon i struju trošila induktivnog karaktera pri kutu upravljanja  $\alpha = 0^\circ$ . Struja zbog induktiviteta kasni u fazi za naponom. Kada napon izvora padne na nulu, u zavojnici još postoji akumulirana energija koja stvara struju. Tiristor isklapa tek kada struja padne na nulu, a pošto zavojnica još uvijek ima energije, struja teče kroz tiristor koji je još neko vrijeme u stanju vođenja. Za to vrijeme se na trošilo prenosi negativan napon s izvora. Kada struja padne na nulu, tiristor isklapa i na sebe preuzima zaporni napon.



Slika 18

Slika 19 prikazuje napon i struju trošila za induktivno trošilo i kut upravljanja  $\alpha = 45^\circ$ . Tiristor prelazi iz blokiranja u vođenje 2.5 ms nakon što napon izvora postane pozitivan.

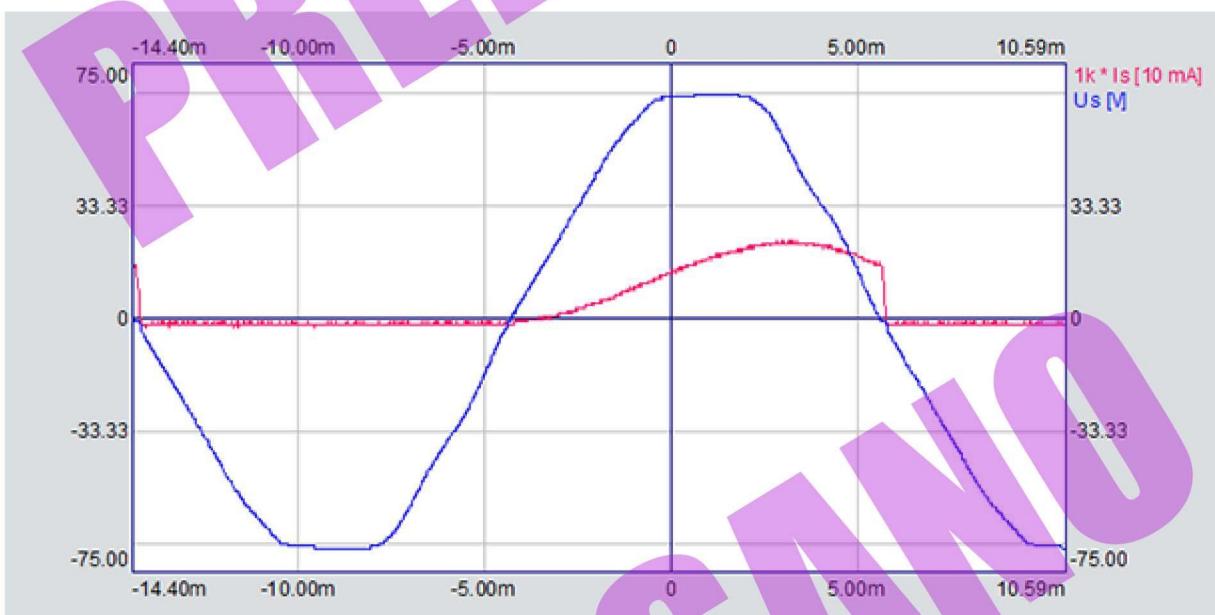


Slika 19

Nakon toga odziv je sličan kao i ranije, energija iz zavojnice se troši, u krugu teče struja i tiristor isklapa tek kada struja padne na nulu. U ovoj vježbi struju trošila mjerimo tako što na osciloskopu snimamo napon na otporniku  $R = 20 \Omega$ , pa je stvarna vrijednost struje 20 puta manja od prikazane na osciloskopu. Pri mjerenu struje izvora u seriju s njim spajamo mjerni otpornik  $R = 0.01 \Omega$  i mjerimo napon na njemu, u tom slučaju je vrijednost struje 100 puta veća od prikazane na osciloskopu. U DAY alatu vrijednost napona s ociloskopa dodatno je pomnožena s 1000 kako bi bila srazmjerna u odnosu na napon, što znači da je stvarna vrijednost struje 10 puta manja od prikazane na grafu.

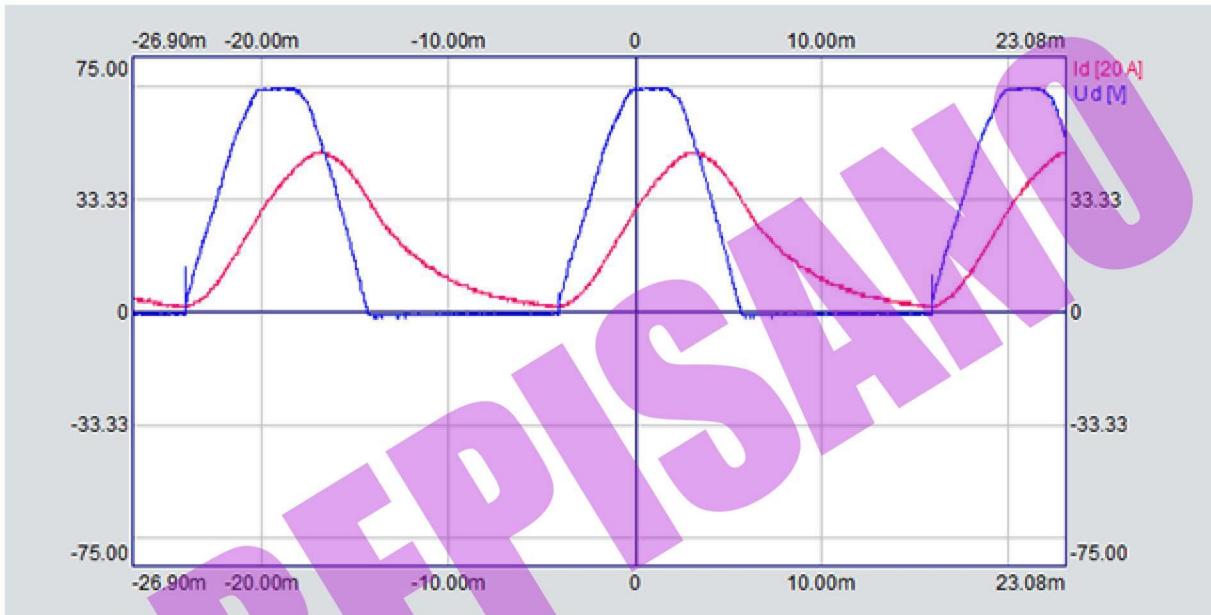
U posljednjem dijelu vježbe trošilu smo u paralelu dodali porednu diodu. Uloga poredne diode je da pruža put struji koja nastaje zbog akumulirane energije iz zavojnice, kada napon izvora postane negativan.

Slika 19 prikazuje napon i struju izvora, u trenutku kad napon postane negativan, struja odmah pada na nulu, jer sva struja trošila prolazi kroz diodu.



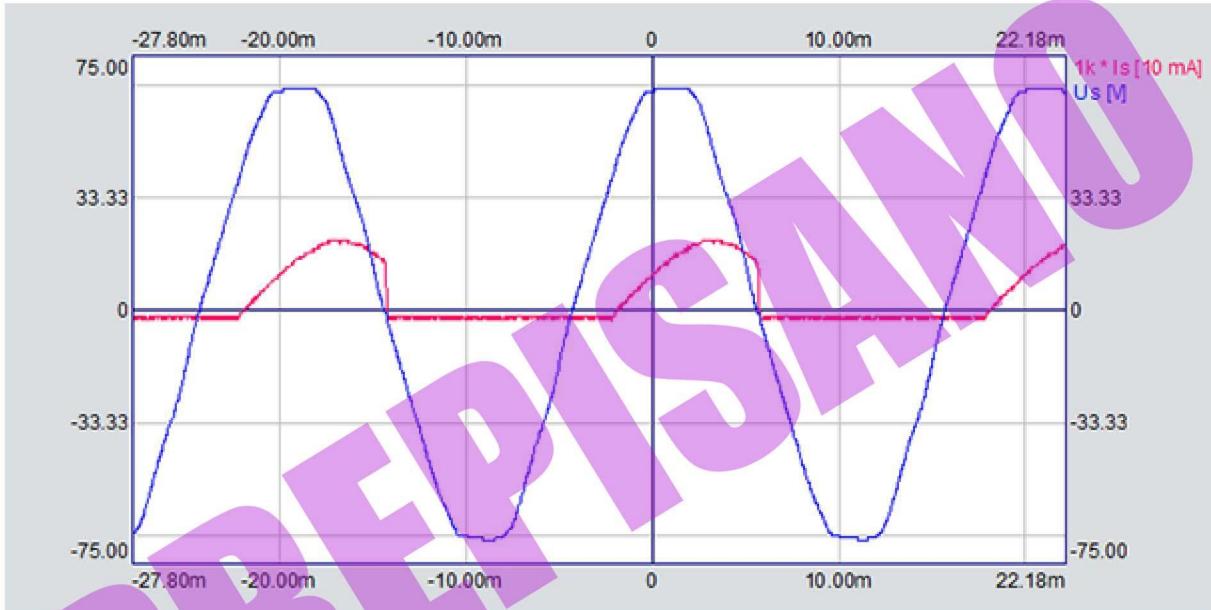
Slika 20

Slika 21 prikazuje napon i struju trošila u sklopu s porednom diodom i induktivnim trošilom za kutu upravljanja  $\alpha = 0^\circ$ . Tiristor odmah počinje voditi, struja kazni za naponom zbog induktiviteta, a kada napon izvora padne na nulu, struja još uvijek teče. Kada napon izvora postane negativan, dioda više nije zaporno polarizirana i sada kroz nju može teći struja. Kroz nju teče sva struja trošila, struja kroz tranzistor pada na nulu i on na sebe preuzima zaporni napon s izvora. Trošilo je kratko spojeno i kroz njega teće struja zbog energije iz zavojnice, koja se ne stigne sva potrošiti do sljedeće periode napona izvora.



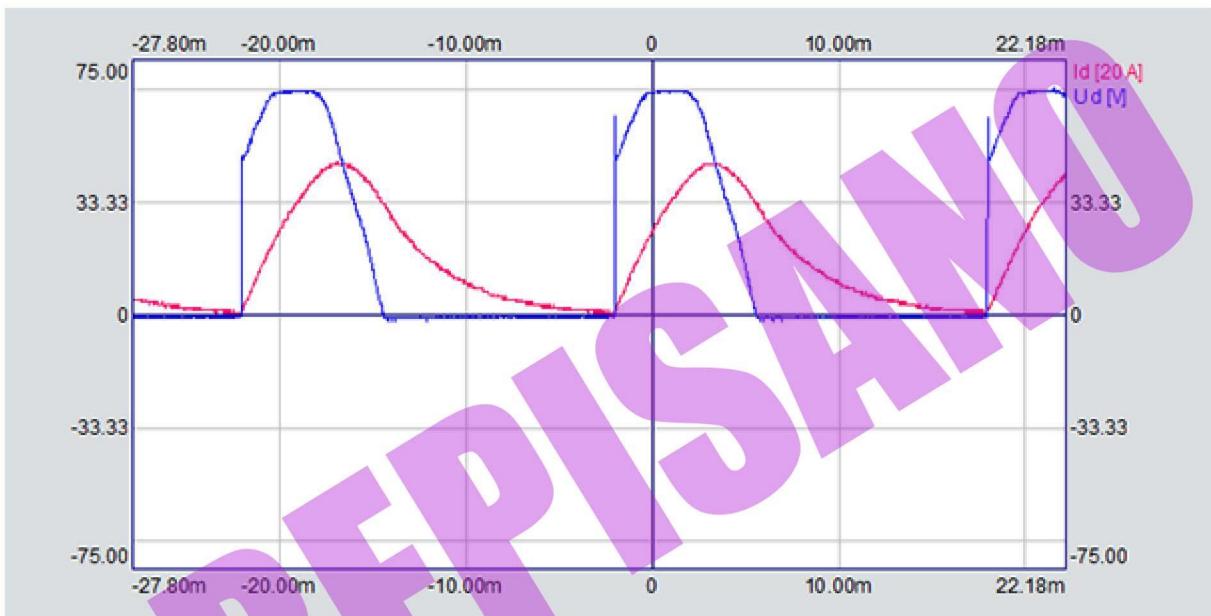
Slika 21

Slika 22 prikazuje napon i struju izvora u sklopu s porednom diodom i induktivnim trošilom za kut upravljanja  $45^\circ$ . Vidljiv je već poznati oblik struje izvora koja počinje teći tek kada tiristor uklopi, 2.5 ms nakon početka pozitivnog poluvala napona izvora. Struja prestaje teći kada napon izvora postane negativan i tako propusno polarizira porednu diodu kroz koju teče sva struja zbog energije akumulirane u zavojnicama.



Slika 22

Slika 23 prikazuje napon i struju trošila u sklopu s porednom diodom i induktivnim trošilom za kut upravljanja  $45^\circ$ . Tiristor uklapa 2.5 ms nakon početka pozitivnog poluvala napona izvora, struja kasni za naponom, kada napon padne na nulu struja i dalje teče kroz diodu.



Slika 23

Sva mjerena izvode se na način da osciloskopom TDS 2002 mjerimo željene valne oblike napona, a zatim osciloskop priključimo na prijenosno računalo i u programskom okruženju Wavestar spremimo izlaz s osciloskopa u .csv datoteku. Tu datoteku kasnije možemo otvoriti i analizirati u programu DAY, alatu za obradu podataka unutar programskog okruženja Simplorer.

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Zavod za elektrostrojarstvo i automatizaciju

**PREPISANO**

Ime Prezime

JMBAG

**IZVJEŠTAJ ZA 5. LABORATORIJSKU VJEŽBU**

**Usmjerivač u jednofaznom mosnom spoju**

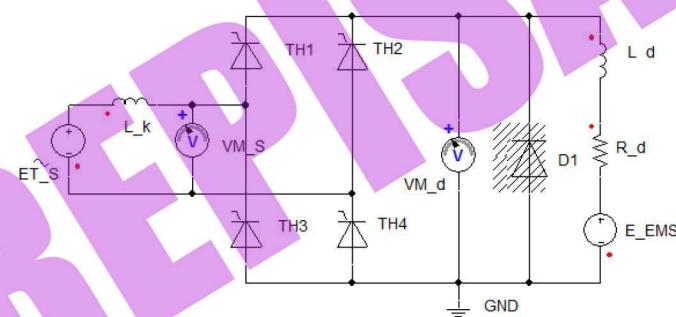
Praktikum učinske elektronike

**PREPISANO**

Zagreb, 2012. / 2013.

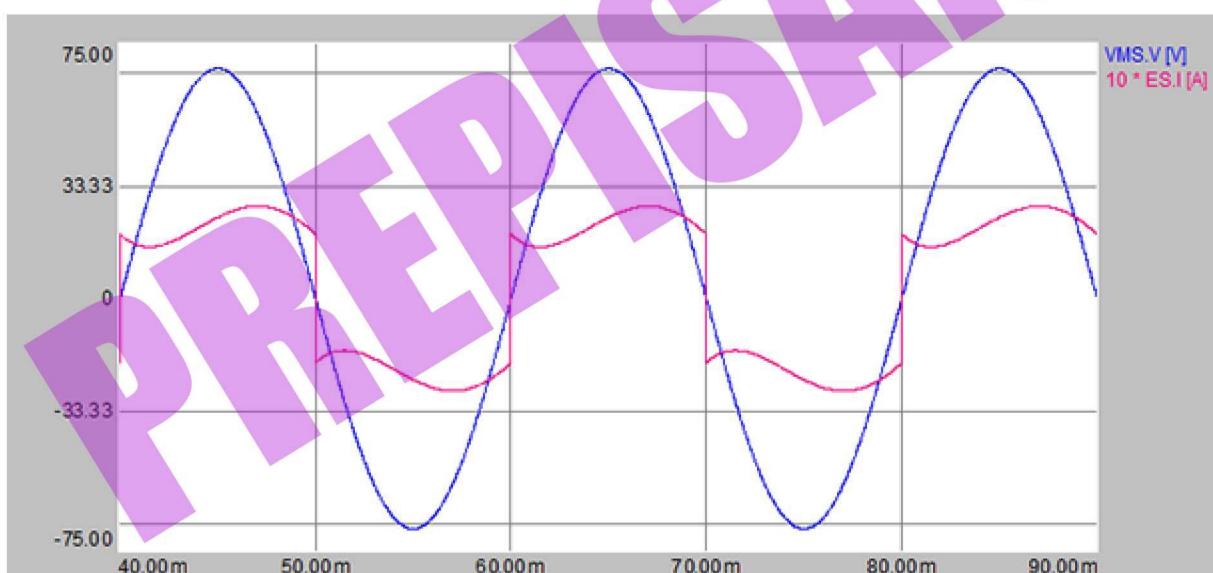
## Seminar

U petoj laboratorijskoj vježbi proučavamo usmjerivač u jednofaznom mosnom spoju. Usmjerivač je punovalni upravljeni ispravljač, a upravlja se sinkroniziranim naponskim impulsima na upravljačkim elektrodama para tiristora T1 i T4, i para T2 i T3. T1 i T4 vode kada je napon izvora pozitivan, a T2 i T3 kada je negativan. Uz kut upravljanja veći od  $90^\circ$  moguće je postići izmjenjivački način rada (trošilo predaje energiju mreži) samo ako je trošilu u seriju spojen izvor elektromotorne sile suprotnog napona od napona izvora. U ovoj vježbi ne razmatramo sklop s porednom diodom.



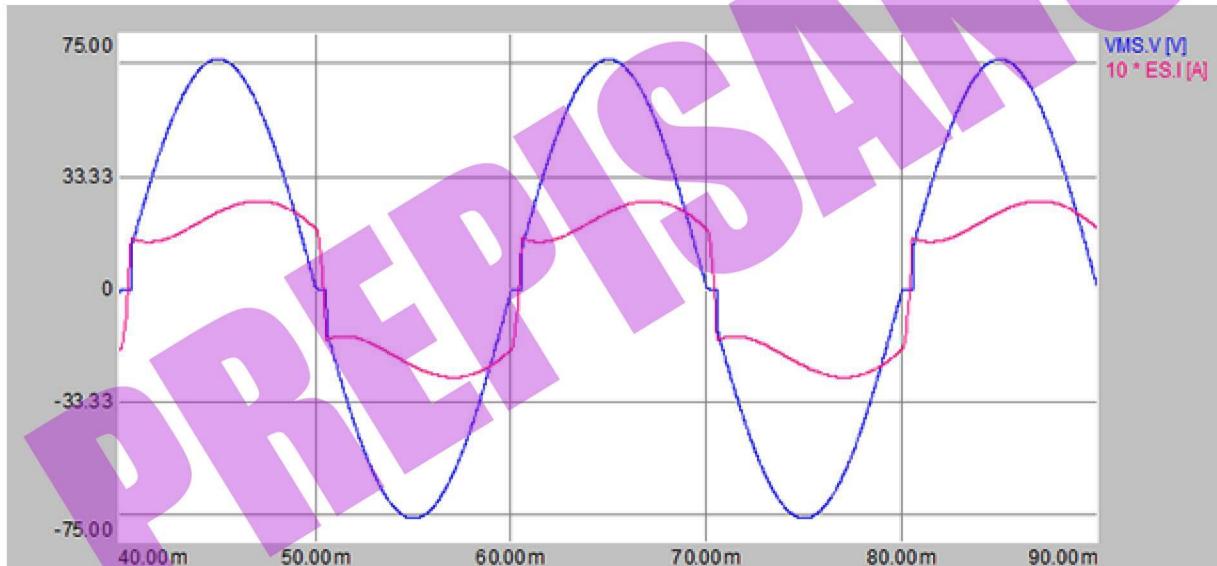
Slika 1

Slika 1 prikazuje simulacijsku shemu usmjerivača u Simplorer Schematicu. Voltmetar  $VM_d$  mjeri napon trošila koje se sastoji od induktiviteta  $L = 70 \text{ mH}$ , otpora  $R = 20 \Omega$  i izvora protuelektromotorne sile koji je za početna mjerena postavljen na 0 V (kratko spojen). Izvor je simuliran sinusnim valnim oblikom efektivne vrijednosti 48.2 V. U modelu usmjerivača moguće je odabrati realni ili idealni usmjerivač. Idealni usmjerivač kratko spaja komutacijski induktivitet i zanemaruje napon praga tiristora i njegov dinamički otpor. Realni usmjerivač simulira komutacijski induktivitet  $L = 1 \text{ mH}$ , napon praga tiristora od 1 V i dinamički otpor tiristora  $50 \text{ m}\Omega$ . U modelu se može birati način zadavanja kuta upravljanja, ručno ili promjenom po rampi zadanog nagiba. Voltmetar mjeri napon na spoju idealnog izvora i komutacijskog induktiviteta, to je napon kojeg „vidi“ usmjerivač kad se priključi na mrežu.



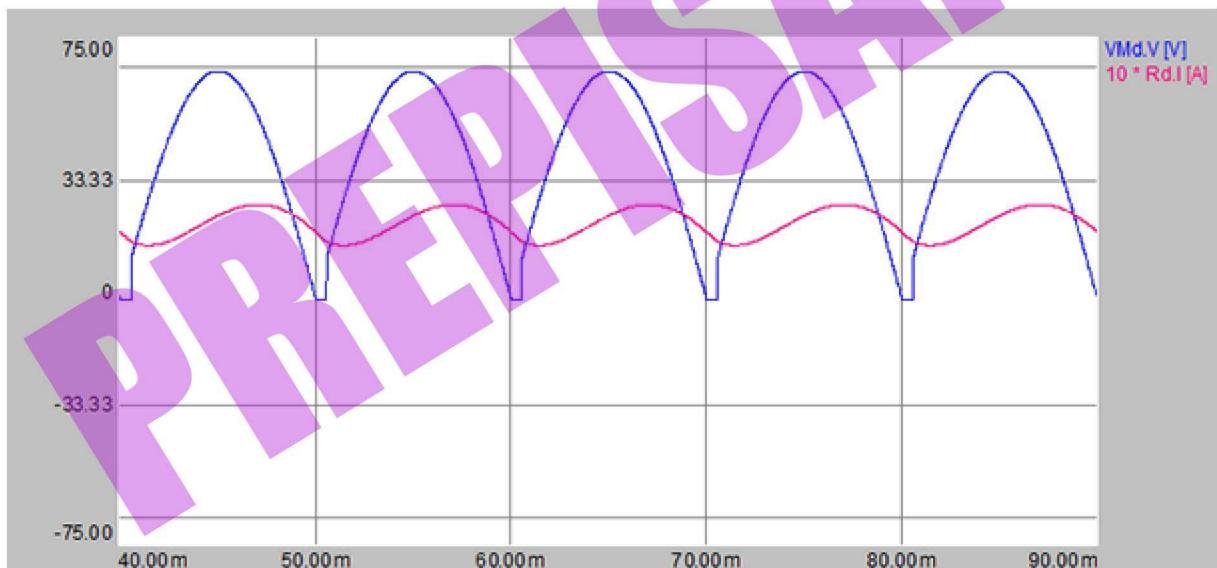
Slika 2

Slika 2 prikazuje napon i struju mreže u slučaju idealnog, a Slika 3 realnog usmjerivača pri kutu upravljanja  $\alpha = 0^\circ$ . Kod realnog usmjerivača struje ne mijenja vrijednost trenutačno pri promjeni polariteta napona, već pada ili raste kroz mali vremenski interval. Kod realnog usmjerivača primjetno je da je napon u nuli kroz neko kratko vrijeme kada vode oba para tiristora.



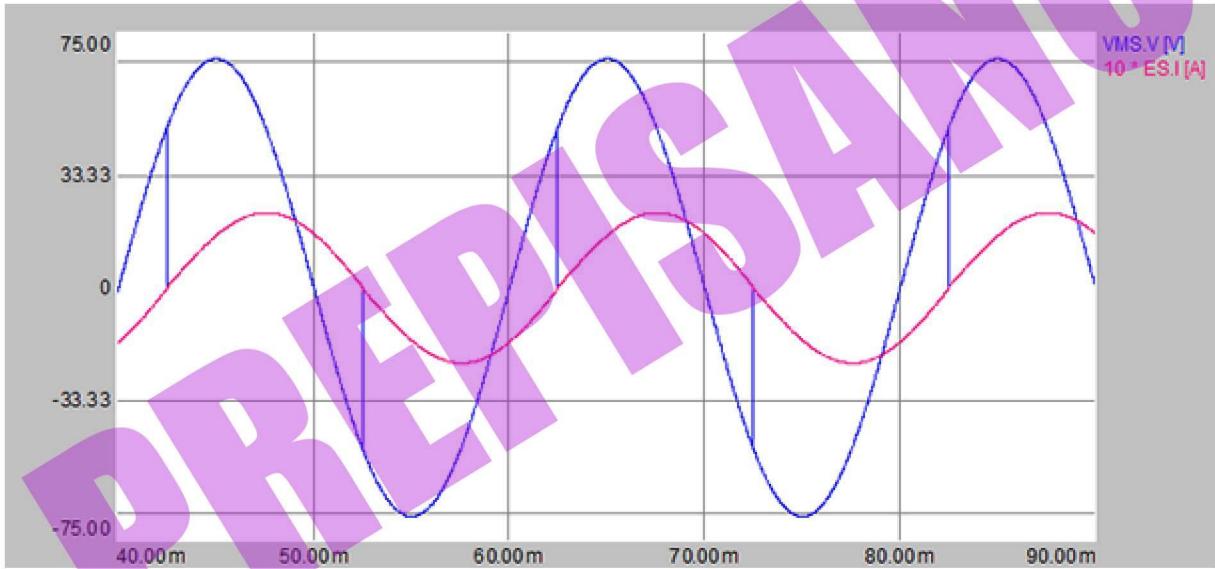
Slika 3

Slika 4 prikazuje napon i struju trošila uz realan usmjerivač pri kutu upravljanja  $\alpha = 0^\circ$ . Veliki induktivitet pomaže u ispravljanju i stabiliziranju struje trošila, koja kasni za naponom. Napon ima oblik punovalno ispravljenog napona, čija vrijednost postaje 0 V i traje neko kratko vrijeme pri promjeni para tiristora koji vode, jer u tom vremenskom intervalu vode oba para. Maksimalna vrijednost napona trošila je nešto manja od maksimalne vrijednosti napona izvora jer se na tiristorima događa mali pad napona.



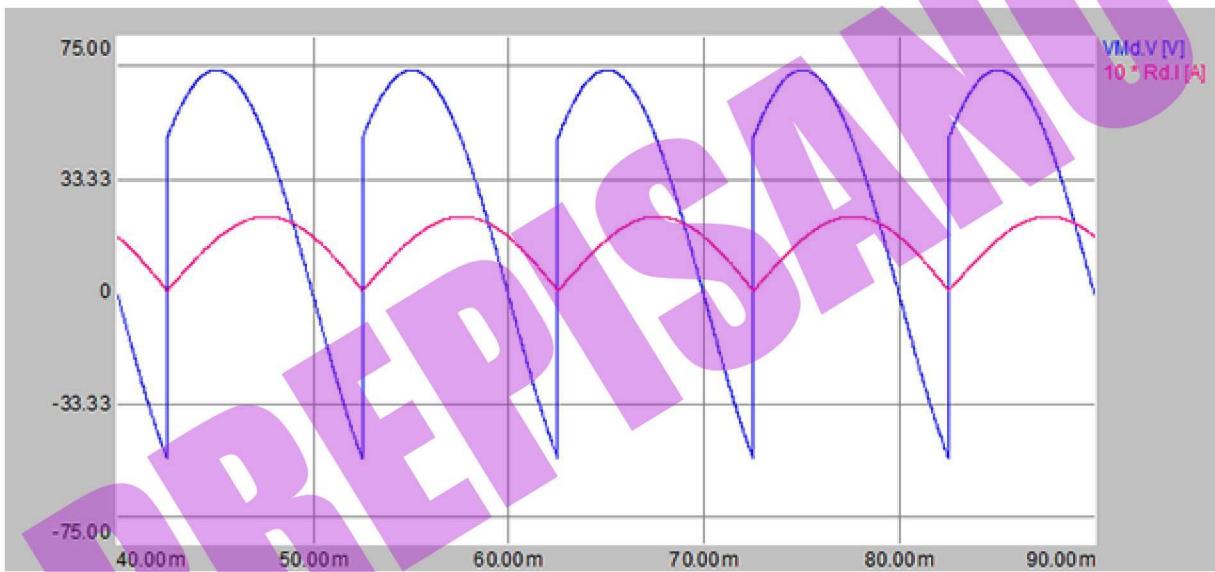
Slika 4

Slika 5 prikazuje napon i struju mreže uz realan usmjerivač pri kutu upravljanja  $45^\circ$ . U trenutku kada bi se trebao promijeniti par tiristora koji vode, određen kutem upravljanja, u ovom slučaju 2.5 ms nakon početka pozitivnog poluvala napona izvora, napon mreže trenutačno pada na 0 V dok vode oba para tiristora i tako kratko spajaju izvor.



Slika 5

Slika 6 prikazuje napon i struju trošila za realni usmjerivač pri kutu upravljanja  $\alpha = 45^\circ$ . Taj kut je blizu graničnog kuta, kada struja trošila postaje isprekidana, ali ovdje to još nije slučaj. Negativni napon se prenosi na trošilo dok je struja još uvijek pozitivna, a u trenutku zamjene para tiristora napon postaje pozitivan a struja nastavlja rasti.



Slika 6

# Laboratorij

Tim:

Grupa BROJ:

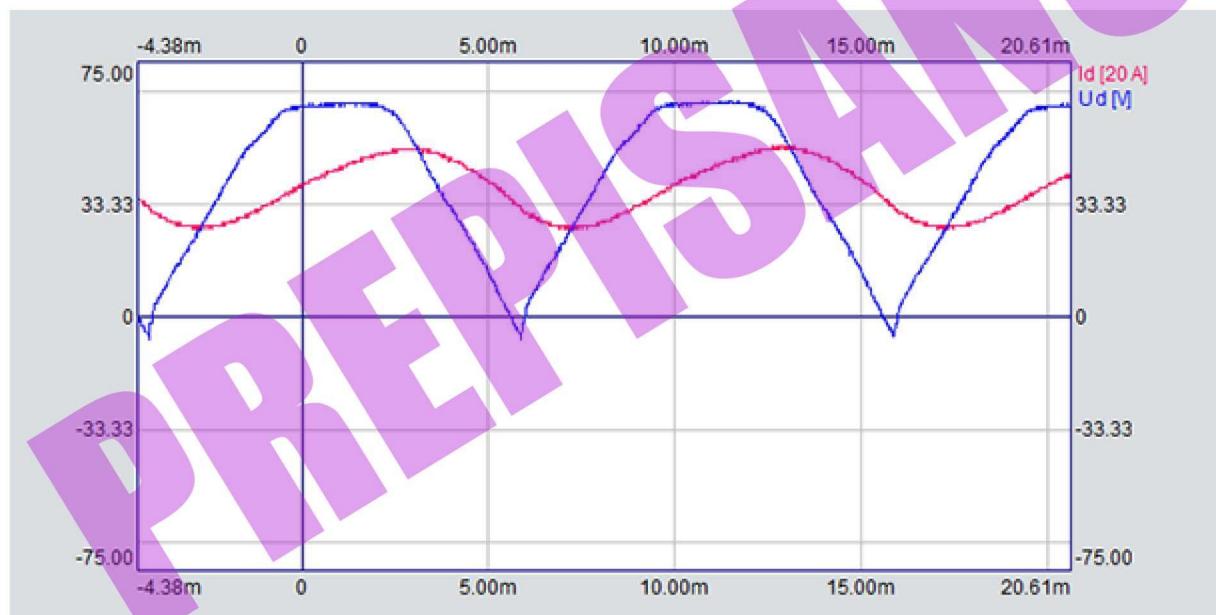
Studenti

Radno mjesto: pult BROJ

## Popis opreme:

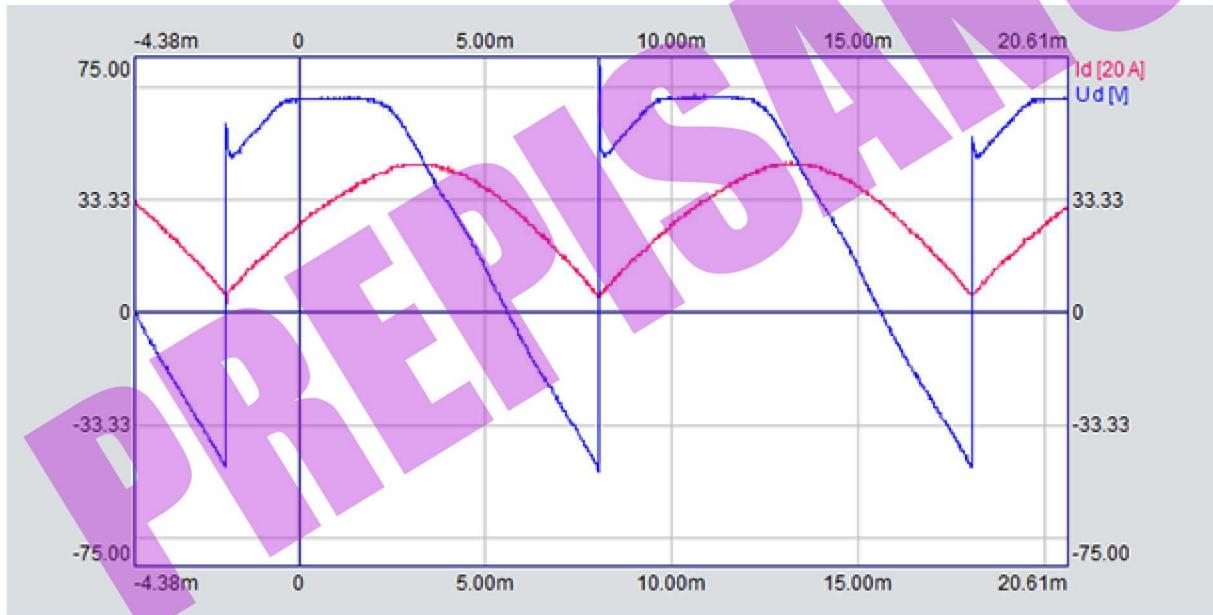
- 4 zavodska tiristora za učinsku elektroniku
- mjerni otpornik 8022 (shunt):  $R = 0.01 \Omega \pm 0.25\%$ ;  $I_n = 10 \text{ A}$ ;  $P_n = 100 \text{ mW}$  (dva komada)
- otpornik  $R = 20 \Omega$ ;  $P = 200 \text{ W}$
- zavojnica  $L = 70 \text{ mH}$
- element I4 za lakše spajanje mjernog otpornika u strujni krug
- mrežni izvor napona efektivne vrijednosti 48.2 V na sekundaru transformatora
- generator impulsa za upravljački signal tiristora
- osciloskop TDS2002
- prijenosno računalno Lenovo

Prije početka mjeranja potrebno je podesiti uređaj za sinkronizaciju koji generira naponske impulse koji se dovode na upravljačku elektrodu tranzistora. Generator se napaja izmjeničnim naponom efektivne vrijednosti 220 V, a sklop kao izvor koristi transformator koji taj napon snižava na efektivnu vrijednost 48.2 V. U vježbi koristimo jako induktivno trošilo, sastavljeno od zavojnice  $L = 70 \text{ mH}$  i otpornika  $R = 20 \Omega$ . Za ispravnu sinkronizaciju potrebno je provjeriti koju fazu koristi priključak od 220 V, u našem slučaju to je faza R, i na nju se spaja transformator. Također je potrebno provjeriti koji je pozitivan a koji negativan pol priključka uređaja i po potrebi ih zamijeniti.



Slika 7

Slika 7 prikazuje napon i struju trošila pri kutu upravljanja  $0^\circ$ . Napon je punovalno ispravljen, a kratkotrajno poprima negativne vrijednosti. Ovdje se stvarna slika razlikuje od simulacije. Struja trošila je ispravljena i stabilizirana zbog induktivnog karaktera trošila. Struju trošila mjerimo tako da na osciloskopu snimamo napon na otporniku  $R = 20 \Omega$ , jer je na njemu struja proporcionalna naponu. Struju mreže mjerimo mjernim otpornikom  $R = 0.01 \Omega$ .



Slika 8

Slika 8 prikazuje napon i struju trošila u sklopu s usmjerivačem pri kutu upravljanja  $45^\circ$ . Srednja vrijednost struje i napona trošila pada uz povećanje kuta upravljanja od  $0^\circ$  prema graničnom kutu.

Jednadžba za određivanje kuta upravljanja pomoću osciloskopa je:

$$U_{davg} = \frac{2 U_s}{\pi} \cos \alpha$$

Pri kutu upravljanja  $0^\circ$ ,  $U_{davg} = 40$  V. Namjestimo kut upravljanja na neku vrijednost, osciloskopom i funkcijom *Measure* izmjerimo srednju vrijednost napona trošila  $U_{davg}$  i sada možemo odrediti kut upravljanja:

$$\alpha = \arccos \left( \frac{U_{davg}}{40} \right)$$

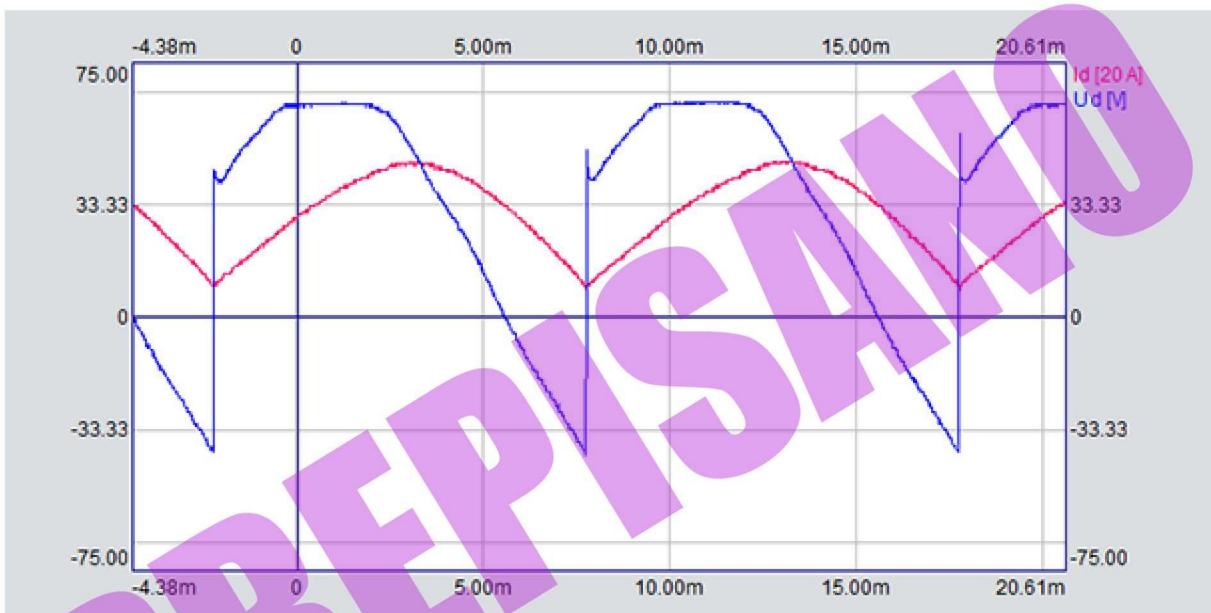
Traženje graničnog kuta upravljanja započinjemo promjenom kuta upravljanja dok struja ne postane isprekidana, odnosno dok ne dotakne nulu u najnižoj točki, kao što je prikazano na Slika 9. Sada izmjerimo srednju vrijednost napona trošila koja iznosi 25.3 V i prema gornjoj jednadžbi slijedi  $\alpha_{gr} = 50.77^\circ$ .

Dalnjim povećanjem kuta upravljanja smanjuju se srednje vrijednosti napona i struje trošila, ali oboje ostaju pozitivni pa to nije izmjenjivački način rada, čak ni za  $\alpha > 90^\circ$ .



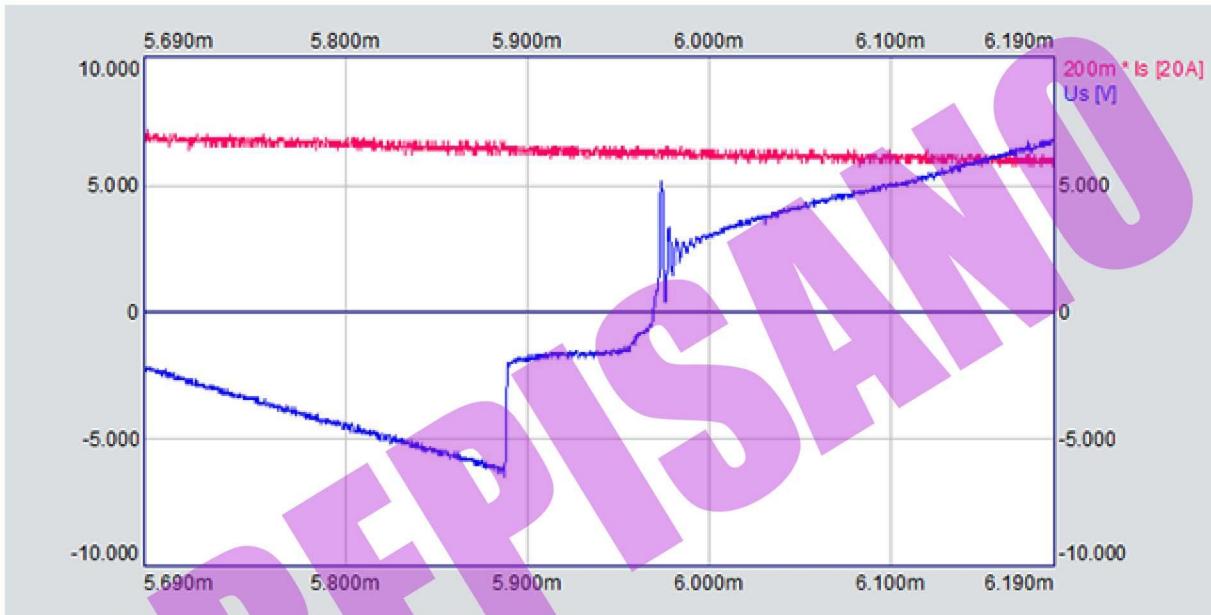
Slika 9

Slika 10 prikazuje napon i struju trošila za kut upravljanja za koji srednja vrijednost struje trošila iznosi 1.5 A. Struju mjerimo na otporniku  $R = 20 \Omega$ , što znači da na njemu napon mora biti  $U_r = 20 * 1.5 = 30$  V. Postavimo kut upravljanja za taj napon na otporniku, izmjerimo napon trošila koji sada iznosi  $U_{davg} = 31$  V, i po gornjoj formuli dobijemo traženi kut upravljanja  $\alpha = 39.19^\circ$ .



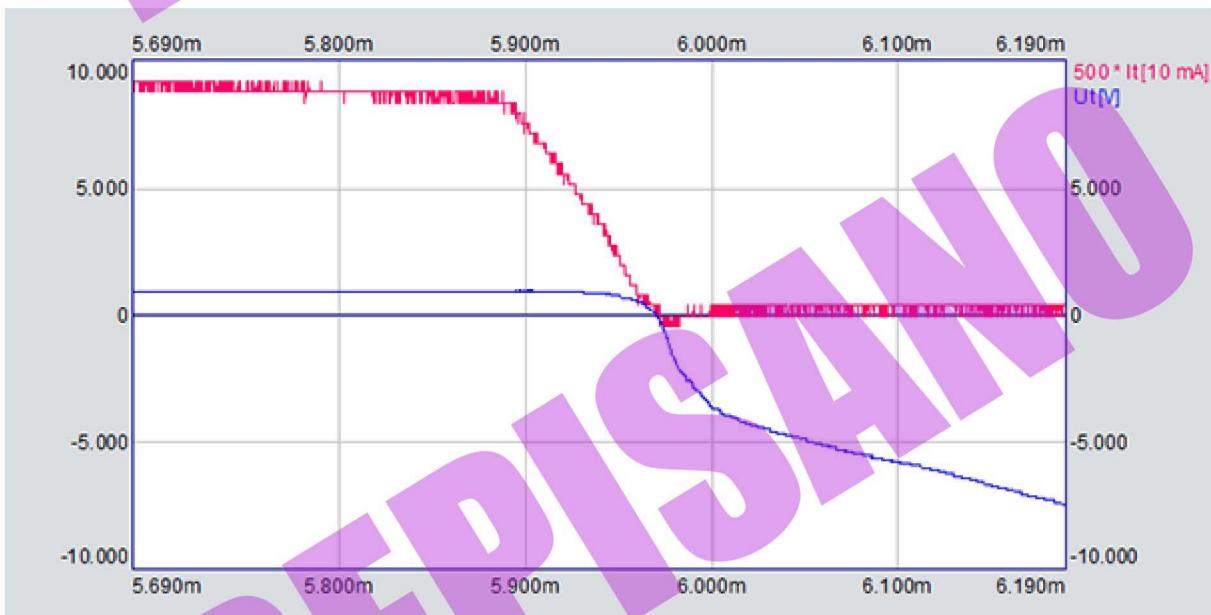
Slika 10

Slika 11 prikazuje komutaciju u sklopu, koju vidimo na naponu izvora u jako kratkom vremenskom intervalu, od 5.89 ms do 5.96 ms, što je približno 70  $\mu$ s. Pri promjeni para tiristora koji vode, to se ne događa trenutačno, već oba para vode kroz taj mali vremenski interval i tada je izvor kratko spojen. Na slici je krivo označena skala struje, treba biti  $I_s$  [10 mA] umjesto  $I_s$  [20 A].



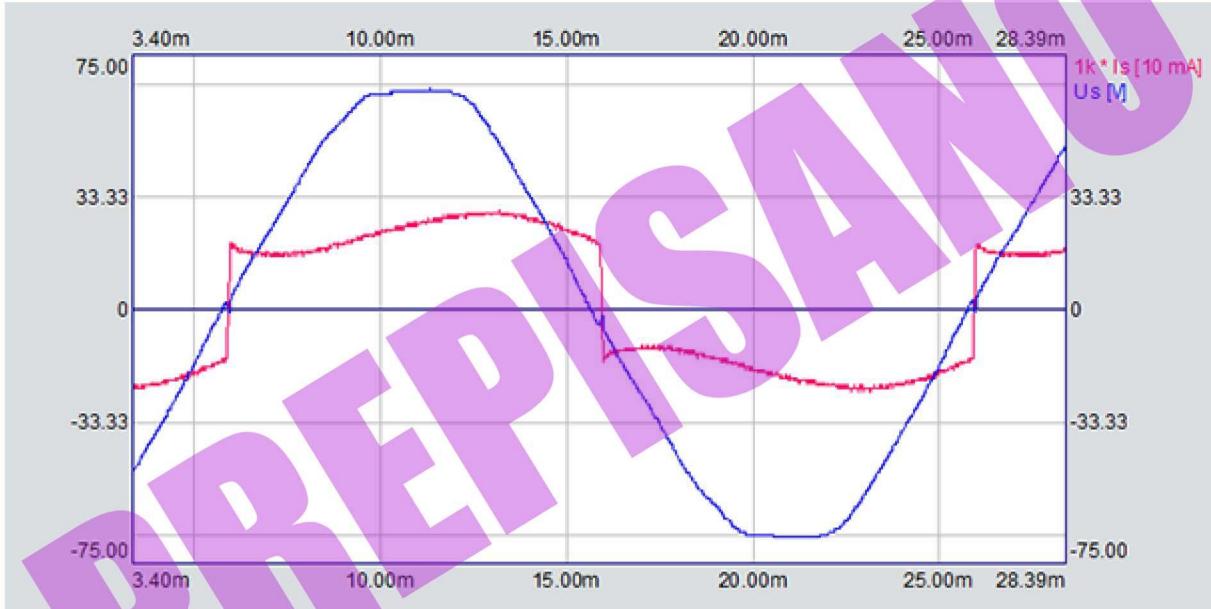
Slika 11

Slika 12 prikazuje komutacijski detalj na tiristoru. U trenutku  $t = 5.9$  ms tiristor treba prestati voditi jer je proveo drugi par tiristora. Struja sada pada na nulu tijekom sljedećih  $90\ \mu\text{s}$ . U tom intervalu vodi i drugi par tiristora.



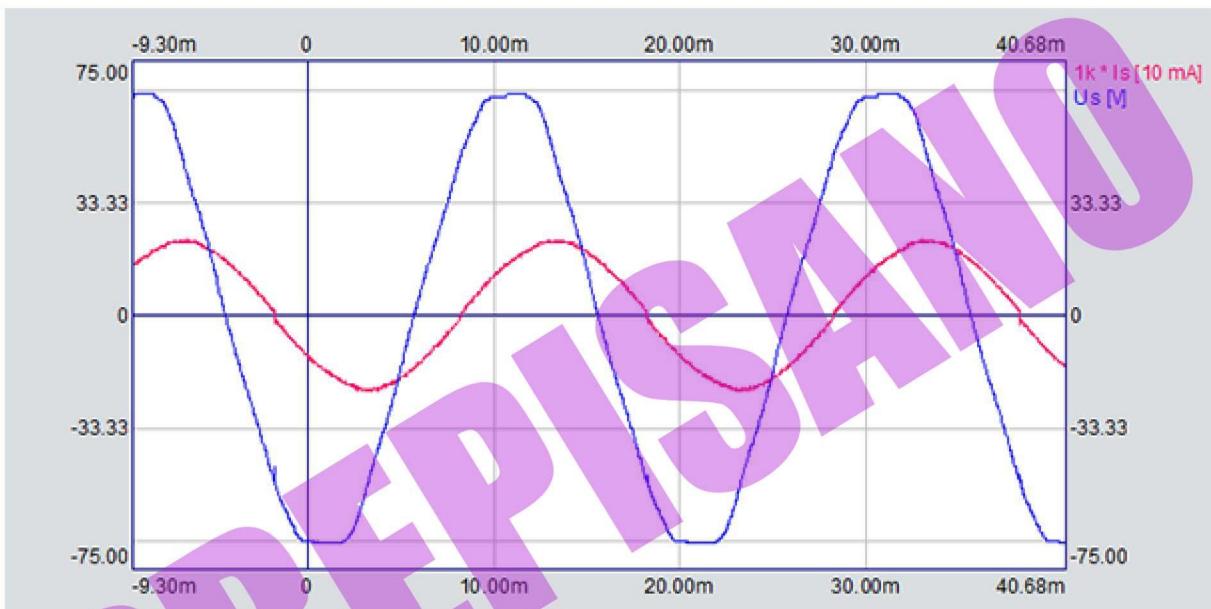
Slika 12

Slika 13 prikazuje napon i struju izvora za kut upravljanja  $0^\circ$ . Struja je gotovo pravokutnog oblika zbog induktivnog trošila.



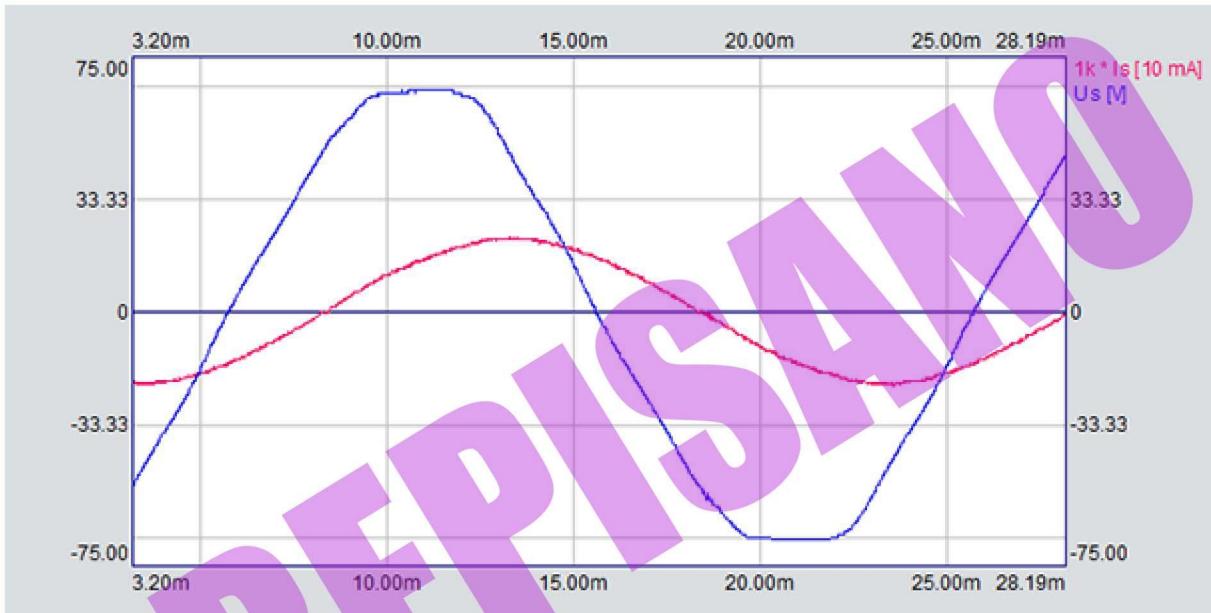
Slika 13

Slika 14 prikazuje napon i struju izvora pri kutu upravljanja  $45^\circ$ . Kut je blizu graničnog kuta, ali struja još uvijek ima mali skok u odzivu.



Slika 14

Slika 15 prikazuje napon i struju izvora pri graničnom kutu upravljanja. Struja nema skokova ni viših harmonika i sada ima sinusni valni oblik.



Slika 15

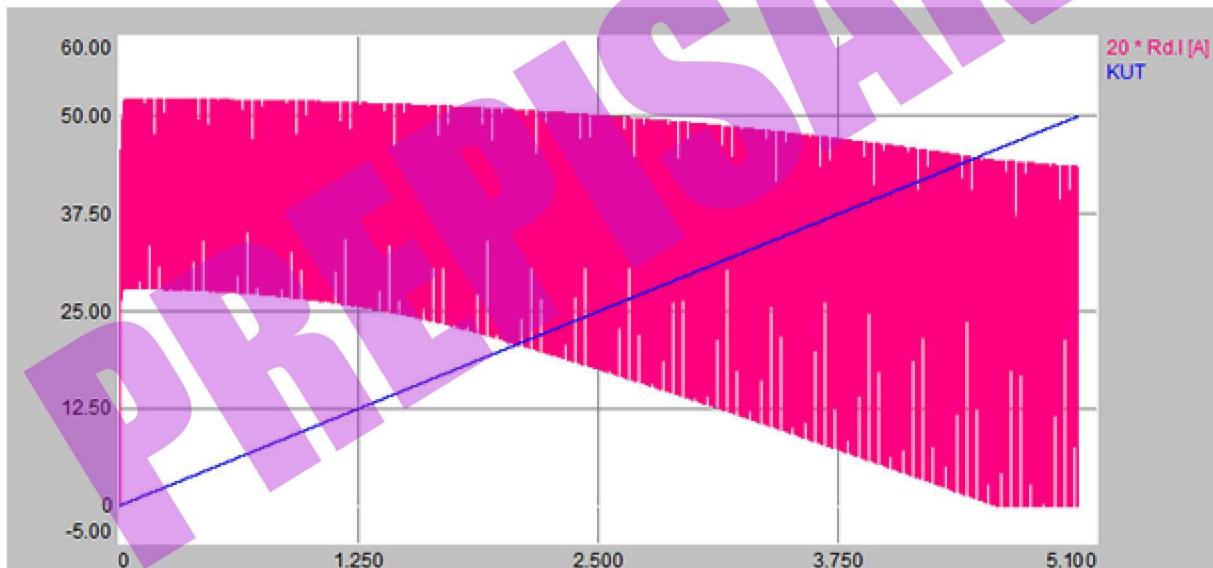
Sva mjerena izvode se na način da osciloskopom TDS 2002 mjerimo željene valne oblike napona, a zatim osciloskop priključimo na prijenosno računalo i u programskom okruženju Wavestar spremimo izlaz s osciloskopa u .csv datoteku. Tu datoteku kasnije možemo otvoriti i analizirati u programu DAY, alatu za obradu podataka unutar programskog okruženja Simplorer.

## Domaća Zadaća

Potrebno je prvo računski odrediti granični kut upravljanja prema:

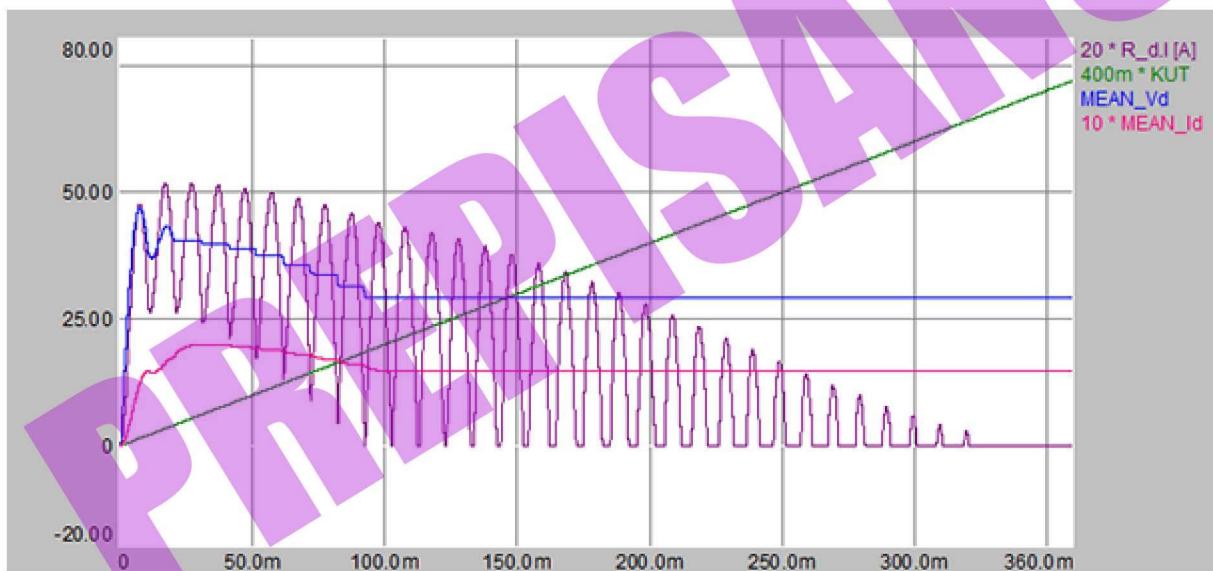
$$\alpha_{gr} = \arctg \left( \frac{\omega * L_d}{R_d} \right)$$

U našem slučaju,  $L_d = 70 \text{ mH}$ ,  $R_d = 20 \Omega$  i  $\omega = 100 \pi \text{ rad/s}$  pa slijedi  $\alpha_{gr} = 47.7^\circ$ .



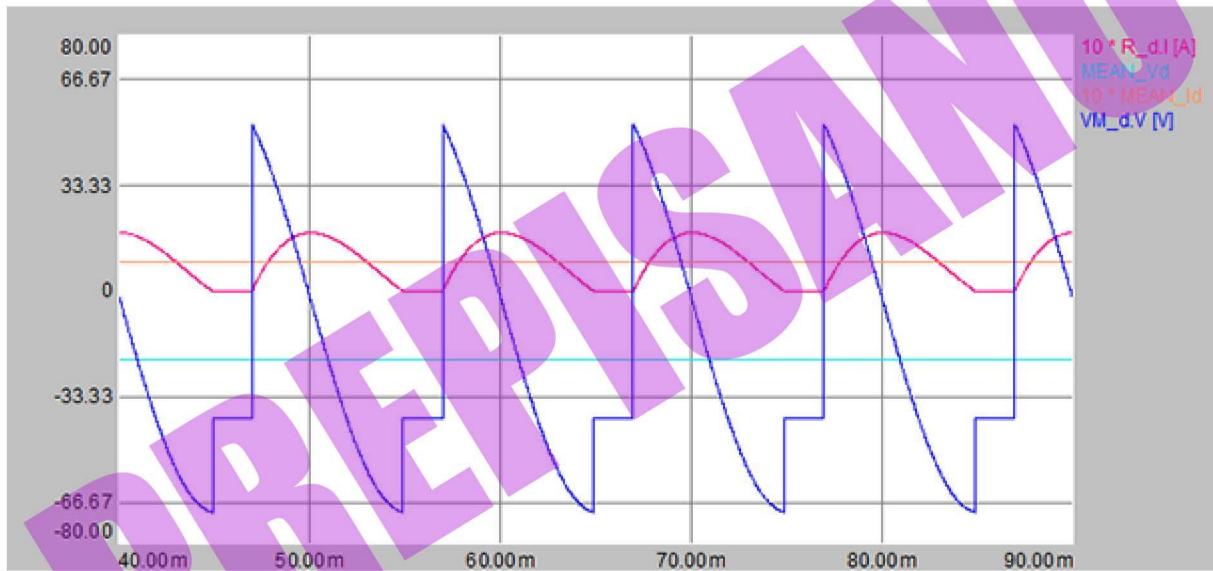
Slika 16

U simulacijski model usmjerivača unesemo podatke za izvor i trošilo iz laboratorijskog modela i mijenjamo kut upravljanja po rampi nagiba 20 uz vrijeme trajanja simulacije 5 sekundi, za što preciznije određivanje graničnog kuta upravljanja. Ovom metodom izmjerjen je granični kut upravljanja  $\alpha_{grs} = 45.8^\circ$ .



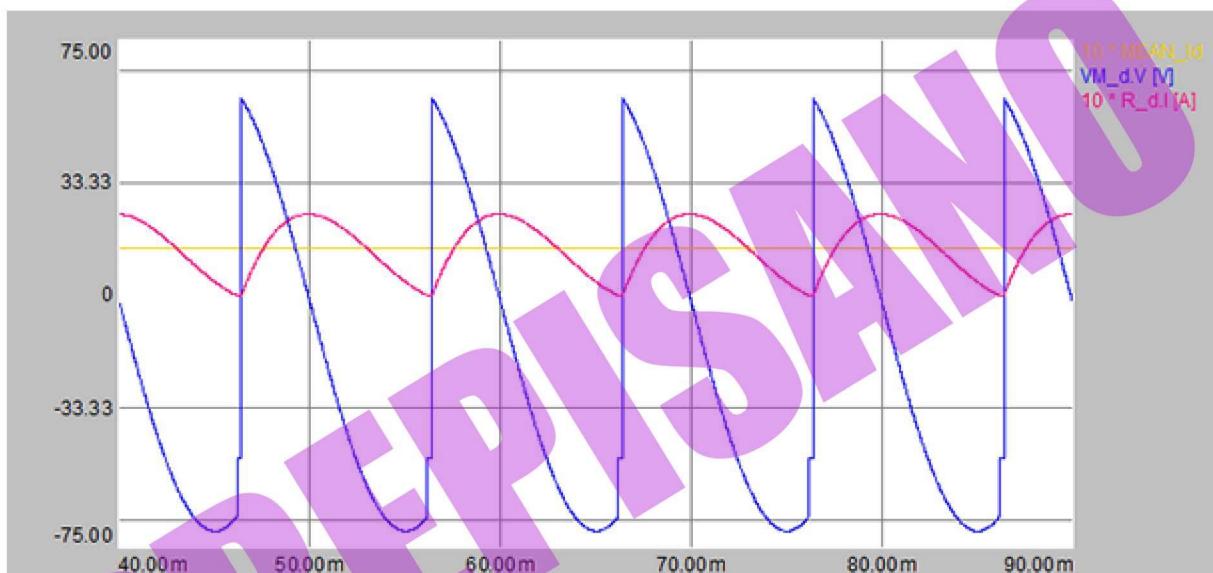
Slika 17

Slika 17 prikazuje pokušaj ostvarivanja izmjenjivačkog načina rada bez protuelektromotorne sile na strani trošila. Povećanjem kuta upravljanja iznad  $90^\circ$  srednja vrijednost struje i napona pada ali ostaje pozitivna i nemoguće je postići izmjenjivački način rada.



Slika 18

Slika 18 prikazuje ostvaren izmjenjivački način rada, uz izvor elektromotorne sile  $E = -40$  V i kut upravljanja  $115^\circ$ . Srednja vrijednost struje trošila (narančasto) je pozitivna, a napona trošila (svijetloplavo) negativna.



Slika 19

Slika 19 prikazuje situaciju kada je srednja vrijednost struje trošila 1.5 A u izmjenjivačkom načinu rada. Za kut upravljanja od  $115^\circ$  računamo potrebnu elektromotornu silu prema:

$$E_d = I_d * R_d - \frac{2 * U_s}{\pi}$$

Za  $U_s = 67.8$  V,  $I_d = 1.5$  A i  $R_d = 20 \Omega$  dobivamo elektromotornu silu  $E_d = -48.3$  V.