

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA
Zavod za elektrostrojarstvo i automatizaciju

Miha the mighty
0036xxxxxx

IZVJEŠTAJ ZA 2. VJEŽBU
ELESUS

Zagreb, 2011./2012.

Uvod

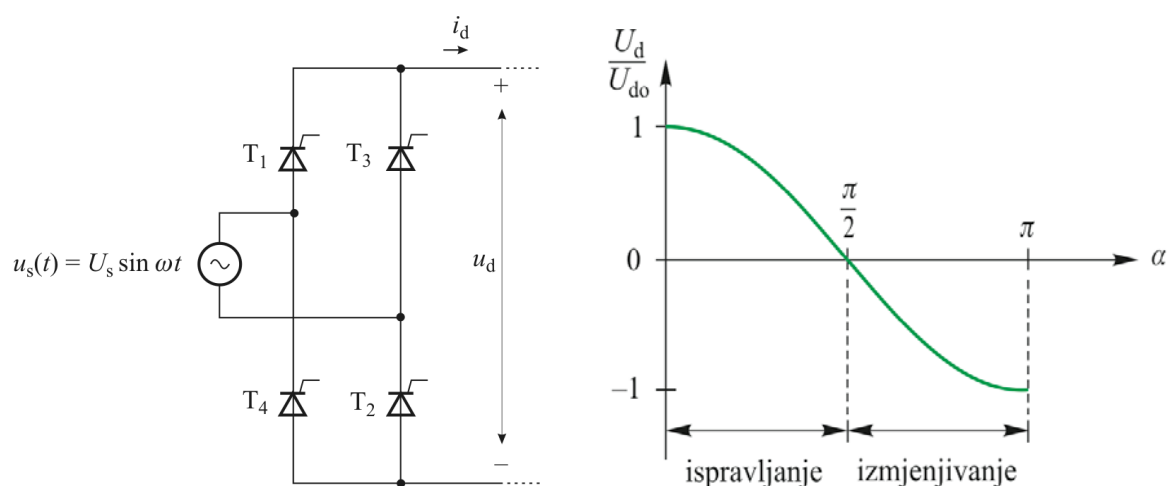
U drugoj laboratorijskoj vježbi radimo simulaciju usmjerivača, istosmjernog PWM pretvarača (DC DC pretvarač) i PWM izmjenjivača (DC AC izmjenjivač). Jedan dio vježbe radi se u Simplorer programskom okruženju, gdje se simuliraju modeli svakog od gore navedenih elemenata učinkne elektronike. Drugi dio vježbe radi se sa realnim elementima postavljenima u spoj zadan vježbom. Modeli i realni elementi su simulirani za razne ulaze kao što su kut upravljanja, protuelektromotorna sila, iznos induktiviteta, amplitudni indeks modulacije, itd.

Usmjerivač

Svrha rada usmjerivača je proizvesti napon ili struju koja ima isključivo istosmjerne karakteristike ili ima samo neke istosmjerne karakteristike.

Usmjerivač može raditi kao ispravljač ili kao izmjenjivač. Za $\alpha \in [0, \frac{\pi}{2}]$ usmjerivač radi u ispravljačkom načinu rada, dok za $\alpha \in [\frac{\pi}{2}, \pi]$ radi kao izmjenjivač (slika 1. desno).

Drugim riječima usmjerivač je elektronički učinski tiristorski pretvarač koji se s izmjenične strane spaja na izmjeničnu mrežu, a s istosmjerne strane daje ili uzima istosmjernu struju. Jednosmjerni usmjerivač može dati ili pozitivnu ili negativnu srednju vrijednost napona kod jednog smjera struje. Ako je srednja vrijednost napona pozitivna, izmjenična energetska mreža daje energiju (*ispravljački način rada*), a ako je negativna mreža prima energiju (*izmjenjivački način rada*).



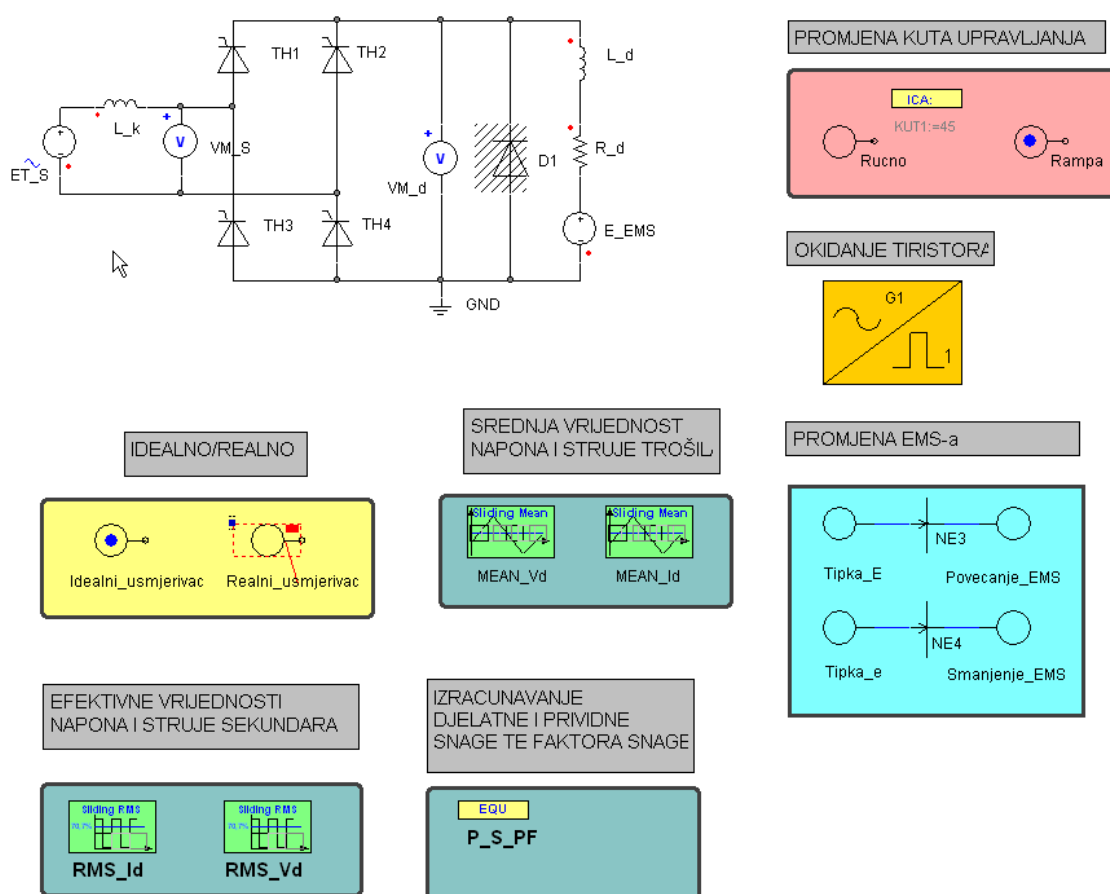
Slika 1. Usmjerivač i upravljačka karakteristika usmjerivača

Simulacija rada usmjerivača

Simulaciju izmjenjivača radimo u Simploreru. Već gotovu shemu otvaramo i simuliramo (slika 2). Simulacija se vrši uz kut upravljanja i protuelektromotornu silu kao ulazne veličine. U svakoj od simulacija kut upravljanja raste od 0° do 180° . Za protuelektromotornu uzimamo vrijednosti od -100V, -25V i 0V, dok za induktivitet L uzimamo vrijednost od 100 mH ili 2 H. Ostali parametri simulacije su $R = 20 \Omega$, te ulazni napon.

Nakon svake simulacije, moramo unutar Simplorera odabrati odzive koje želimo da nam program prikaže, te odabrati pogodni vremenski i amplitudni raspon.

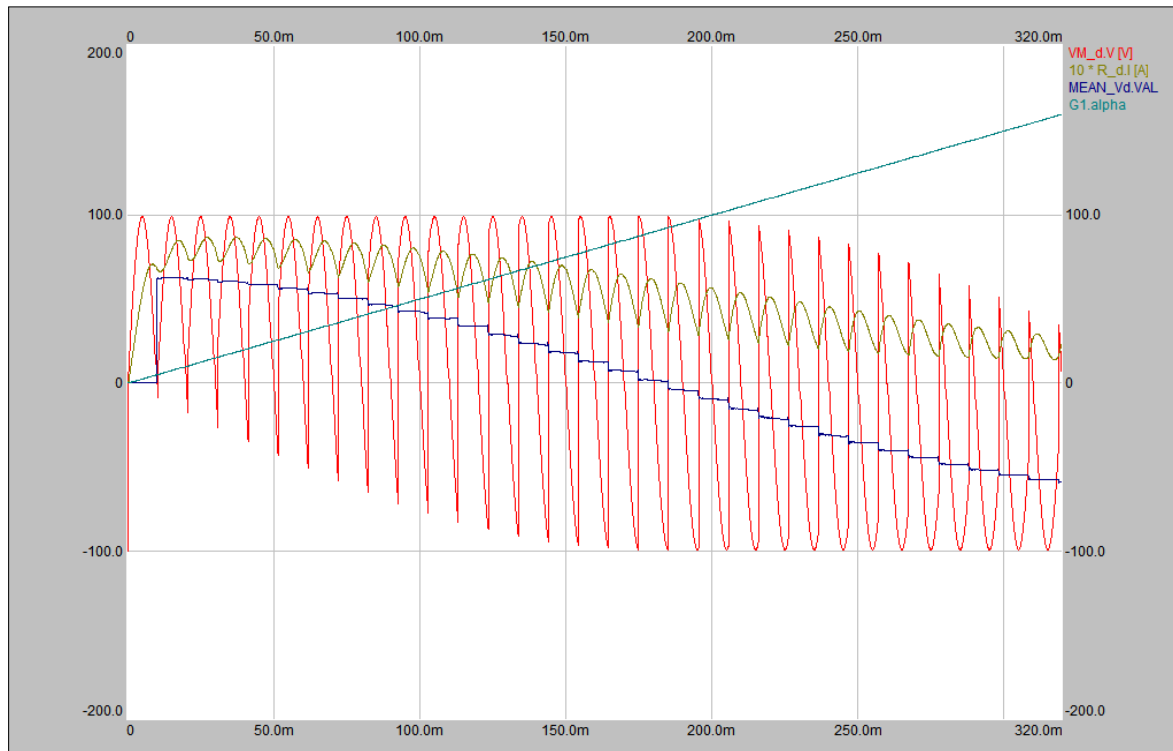
Poredna dioda sa slike 2 je isključena.



Slika 2. Simulacijski model usmjerivača

Usmjerivač vježba a)

Prva simulacija je odziv usmjerivača uz R,L,E trošilo uz $E = -100$ V. (slika 3)



Slika 3. Odziv usmjerivača uz $E = -100$ V

Za izlazni napon vidimo da je punovalno ispravljen. Izuzev trenutaka kada se induktivitet prazni to vidimo kao „špiceve“ u negativnom dijelu. Takav oblik izlaznog napona je posljedica komutacije. Struja je neisprekidana i punovalno ispravljena. Podignuta jer ima DC komponentu.

$$I_o = \frac{U_o - E}{R} \quad (1) \quad U_{d\alpha} = U_o \cos(\alpha) \quad (2)$$

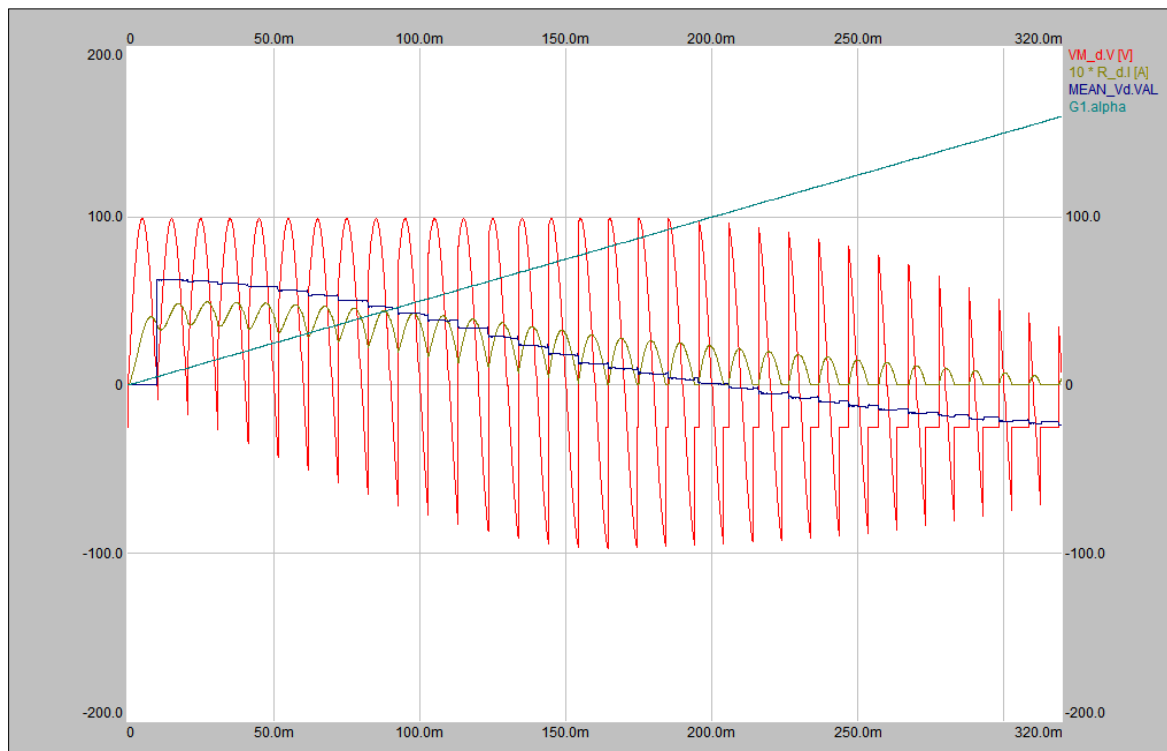
Gdje je I_o struja trošila [A], U_o srednja vrijednost izlaznog napona uz $\alpha = 0^\circ$ [V], E protuelektromotorna sila [V] i R otpor trošila [Ω], $U_{d\alpha}$ srednja vrijednost izlaznog napona za bilo koji kut [V].

Također, vidi se da usmjerivač radi u oba režima rada (jednadžba 2) - istosmjernom i izmjeničnom. Srednja vrijednost napona na trošilu (MEAN_Vd.VAL) pokazuje upravljačku karakteristiku samo što nije skalirana sa srednjom vrijednosti napona na trošilu uz kut upravljanja $0^\circ \left(\frac{U_d}{U_{d0}}\right)$. Također prema izrazu 2 proizlazi da povećanjem kuta upravljanja srednja vrijednost napona pada tj. povećava se trajanje negativnog napona na trošilu.

Protuelektromotorna sila se ne vidi u izlaznom napon jer struja trošila je neisprekidana.

Usmjerivač vježba b)

Druga simulacija je odziv usmjerivača uz R,L,E trošilo uz $E = -25$ V. (slika 4)



Slika 4. Odziv usmjerivača uz $E = -25$ V

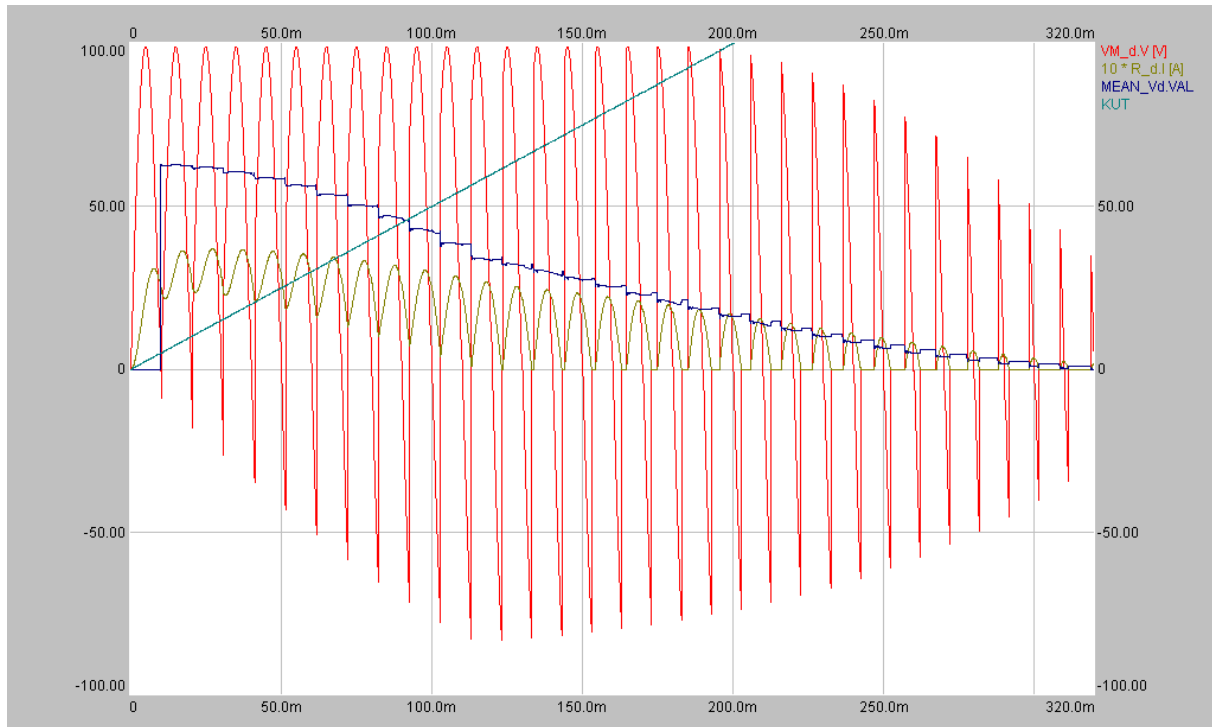
Upravljačka karakteristika je izduženija nego za slučaj kada je $E = -100$ V. Dakle, usmjerivač ulazi u izmjenjivački način rada kasnije.

Uz sve parametre simulacije iste osim iznosa protuelektromotorne sile iz jednadžbe 1 proizlazi da za $E = -25$ V srednja vrijednost struje na trošilu je manja.

Iz simulacije uočavamo da za $\alpha \approx 82^\circ$ struja postaje isprekidana. Razlog isprekidanosti leži u tome da u jednom trenutku srednja vrijednost struje na trošilu bude dovoljno mala s obzirom na valovitost. U razdobljima kada je struja trošila jednaka nuli napon trošila je upravo jednak protuelektromotornoj sili tj. tada se u naponu na trošilu vidi protuelektromotorna sila.

Usmjerivač vježba c)

Treća simulacija je odziv usmjerivača uz R,L,E trošilo uz $E = 0$ V. (slika 5)



Slika 5. Odziv usmjerivača uz $E = 0$ V

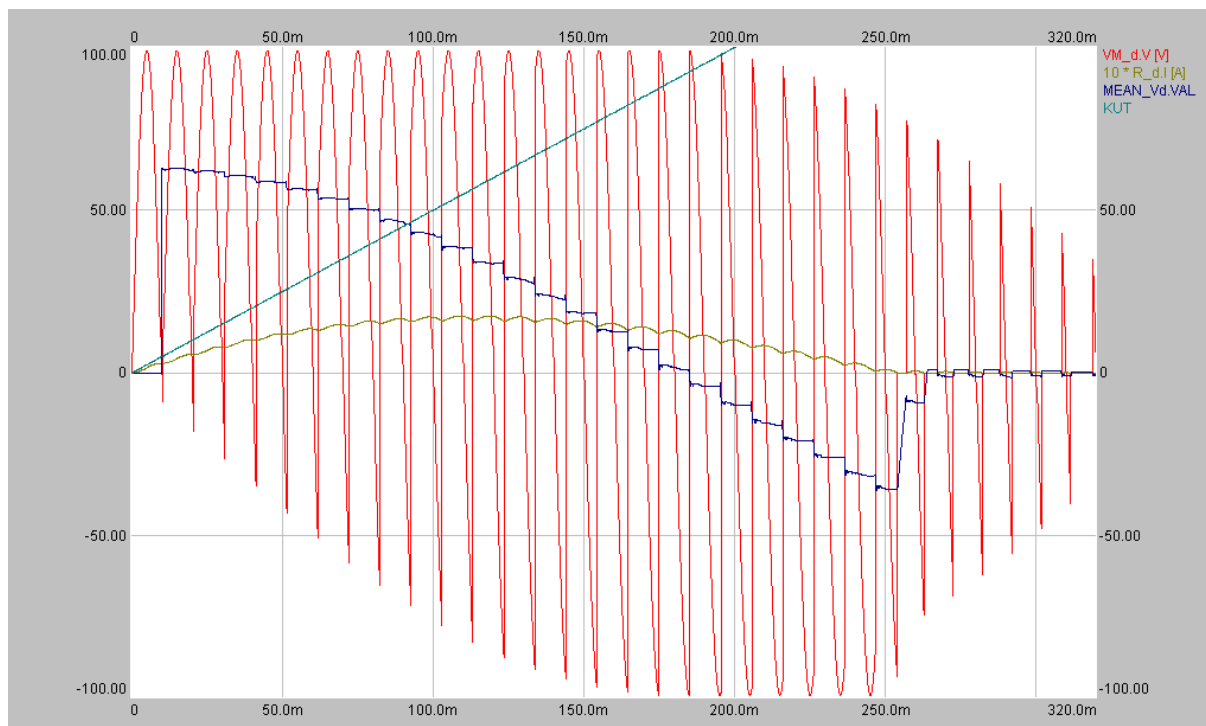
Nestankom protuelektromotorne sile tj. postavljanjem te vrijednosti na 0 V. Uočavamo da je struja spuštenija te na kraju ide k nuli. Prema jednađbi 1 srednja vrijednost struje je manja od srednjih vrijednosti struja dobivenih za $E = -100$ V i $E = -25$ V dakle ranije postaje isprekidana. Iz simulacije vidimo da za $\alpha \approx 62^\circ$ struja postaje isprekidana.

$$U_{d\alpha} = \frac{U_0}{2} [1 + \cos(\alpha)] \quad (3)$$

Kvalitativno upravljačka karakteristika izgleda isto kao i prethodne, ali nikad ne postaje negativna (izraz 3). Dakle, ne postoji izmjenjivački način rada ako nema protuelektromotorne sile. Drugim riječima, srednji napon trošila nikad nije negativan i imamo samo ispravljački režim rada (jedan kvadrant rada) pri čemu cijelo vrijeme energiju uzimamo iz mreže.

Usmjerivač vježba d)

Treća simulacija je odziv usmjerivača uz R,L,E trošilo uz $E = 0 \text{ V}$ i uz $L = 2 \text{ H}$. (slika 6)



Slika 6. Odziv usmjerivača uz $E = 0 \text{ V}$ i $L = 2 \text{ H}$

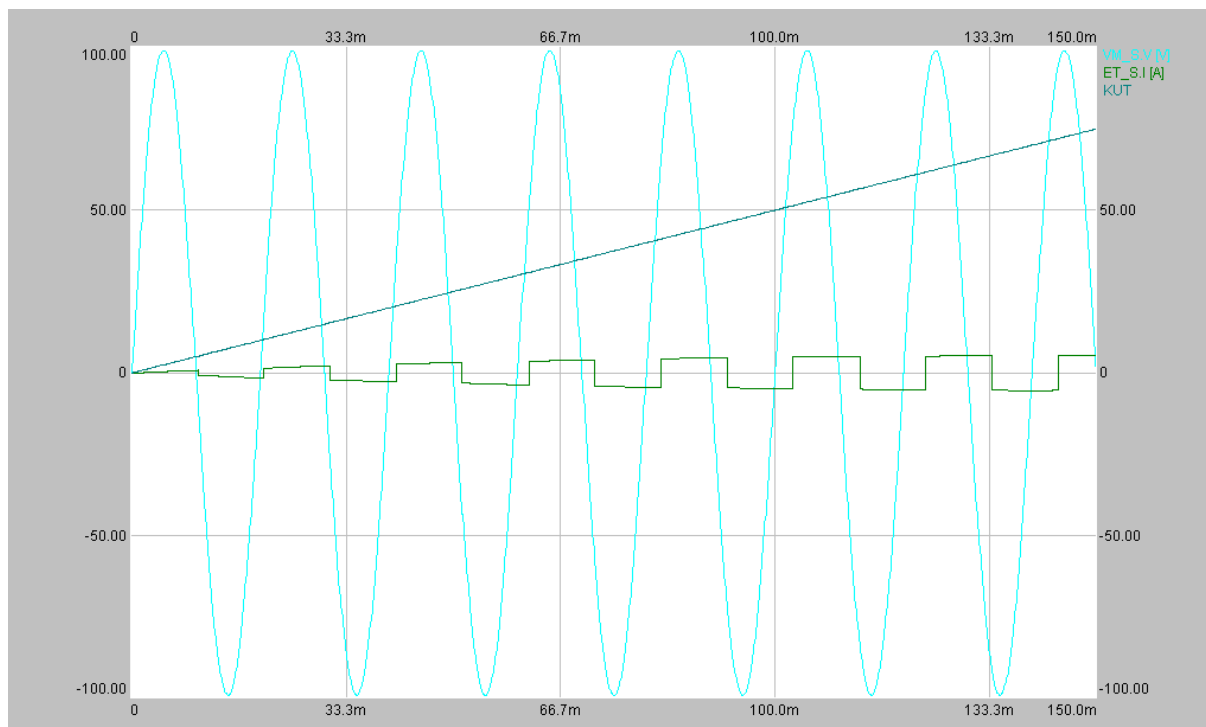
Iako je protuelektromotorna sila jednaka nuli, ovdje imamo izmjenjivački način rada (srednja vrijednost napona na trošilu postaje negativna). Razlog tomu je postojanje iznimno velikog induktiviteta koji se ponaša kao spremnik energije.

Induktivitet se, nakon napajanja energijom, treba isprazniti. Pražnjenje se vrši tako da se energija vraća natrag u mrežu. U trenucima pražnjenja induktiviteta postoji (privremeni) izmjenjivački način rada.

Dakle, jedini trajni oblik izmjenjivačkog načina rada je postojanje protuelektromotorne sile u trošilu (RLE trošilo).

Usmjerivač vježba e)

Također i ova simulacija je odziv usmjerivača uz R,L,E trošilo uz $E = 0$ V i uz $L = 2$ H. (slika 7)



Slika 7. Napon i struja mreže uz $E = -100$ V

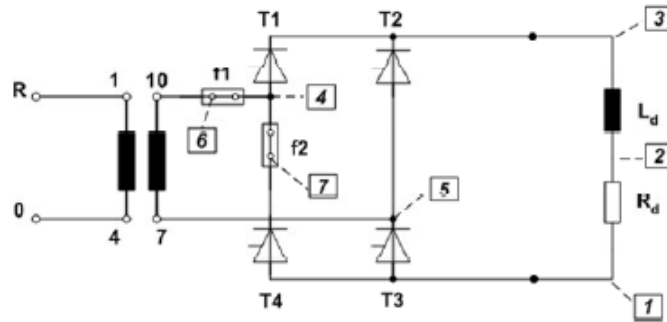
Razlika u fazi između napona mreže (VM_S.V) i struje mreže (ET.S.I) raste kako se mijenja kut upravljanja.

Promjenom kuta upravljanja mijenjamo trenutke kada određena sklopka (tiristor) vodi. Povećanjem kuta upravljanja sklopka provodi sve kasnije i time povećava razliku u fazi.

Mjerenje rada usmjerivača na osciloskopu

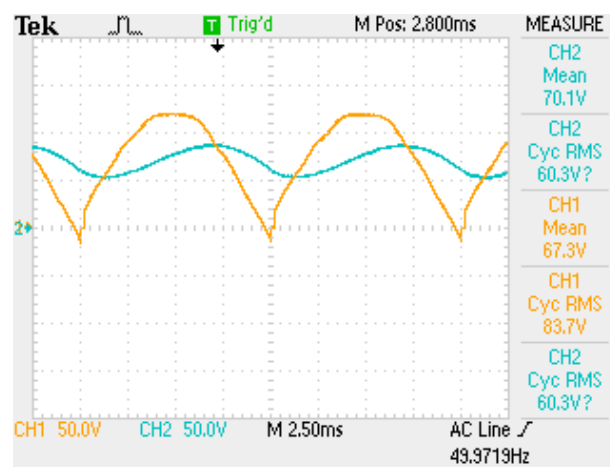
U sklopu druge laboratorijske vježbe mjerenja usmjerivača smo, osim u Simploreru, provodili i za pultom gdje je bio realiziran usmjerivač u jednofaznom mosnom spoju, s pasivnim, omsko-induktivnim trošilom ($R = 20 \Omega$, $L = 100$ mH). (slika 8)

Karakteristični valni oblici mjere se pomoću digitalnog osciloskopa. Struja se mjeri kao pad napona na djelatnom dijelu trošila (R).



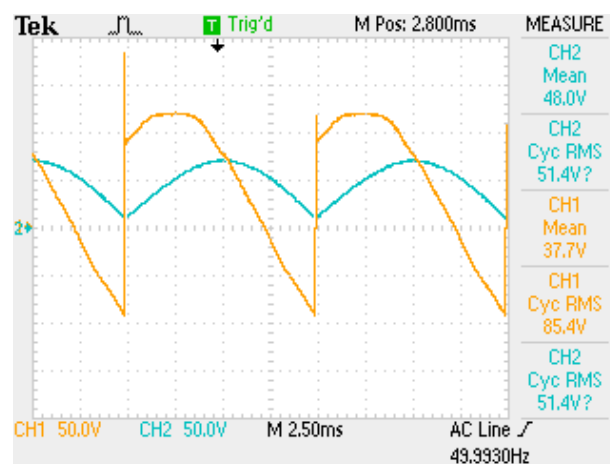
Slika 8. Usmjerivač u jednofaznom mosnom spoju s pasivnim trošilom

U prvom dijelu vježbe gledamo na osciloskopu odziv struje i napona na trošilu, koji su prikazani plavom i žutom bojom respektivno, za kut upravljanja $\alpha = 0^\circ$. (slika 9)



Slika 9. Napon i struja usmjerivača za $\alpha = 0$

Iz napona trošila lako vidimo da je kut upravljanja jednak 0° pošto u svakom trenutku postoji napon na trošilu veći od nule. Jednako tako vidimo da kada je kut upravljanja 45° postoji period kada je napon negativan, period je jednak četvrtini perioda. Povećanjem kuta upravljanja smanjuje se srednja vrijednost struje i napona trošila.

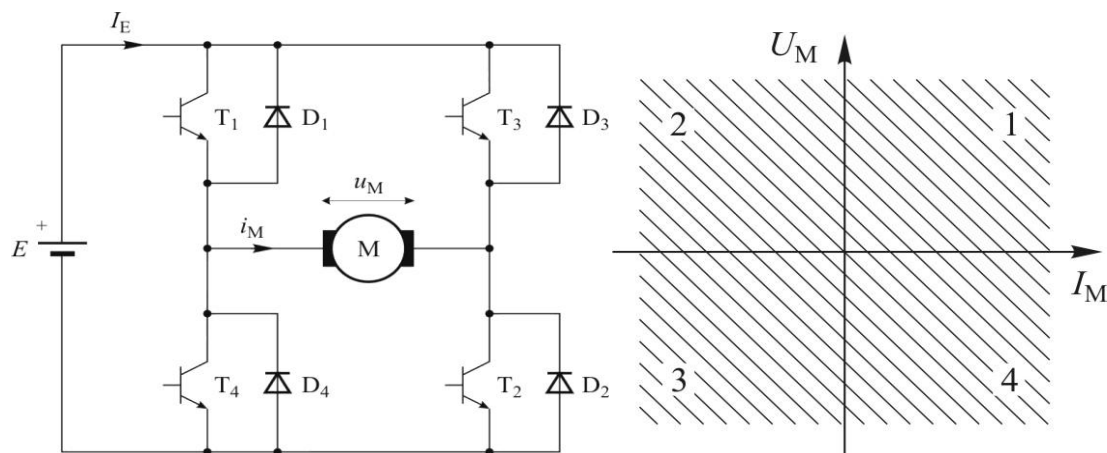


Slika 10. Napon i struja usmjerivača za $\alpha = 45$

DC DC - pretvarač

Istosmjernim pretvaračima možemo podesiti srednju vrijednost izlaznog napona na željenu razinu bez obzira na promjene u ulaznom naponu i izlaznom teretu.

Jednofazni most kao univerzalni PWM (engl. Pulse Width Modulation – modulacija širine impulsa) pretvarač zovemo još i četverokvadrantni čoper. (slika 11)



Slika 11. Četverokvadrantni čoper

Postoje dva načina upravljanja sklopkama:

1. Bipolarna naponska širinsko impulsna gdje se (S_1, S_2) i (S_4, S_3) parovi sklopki. Sklopke u svakom paru se istovremeno uklapaju, odnosno isklapaju. Modulacija radi na način da par sklopki (S_1, S_2) vodi do je referentni signal manji od generiranog trokutnog signala. U suprotnom vodi drugi par sklopki tj. sklopke S_4 i S_3 .

2. Unipolarna naponska širinsko impulsna modulacija gdje su sklopke jedne grane upravljane neovisno o sklopkama druge grane.

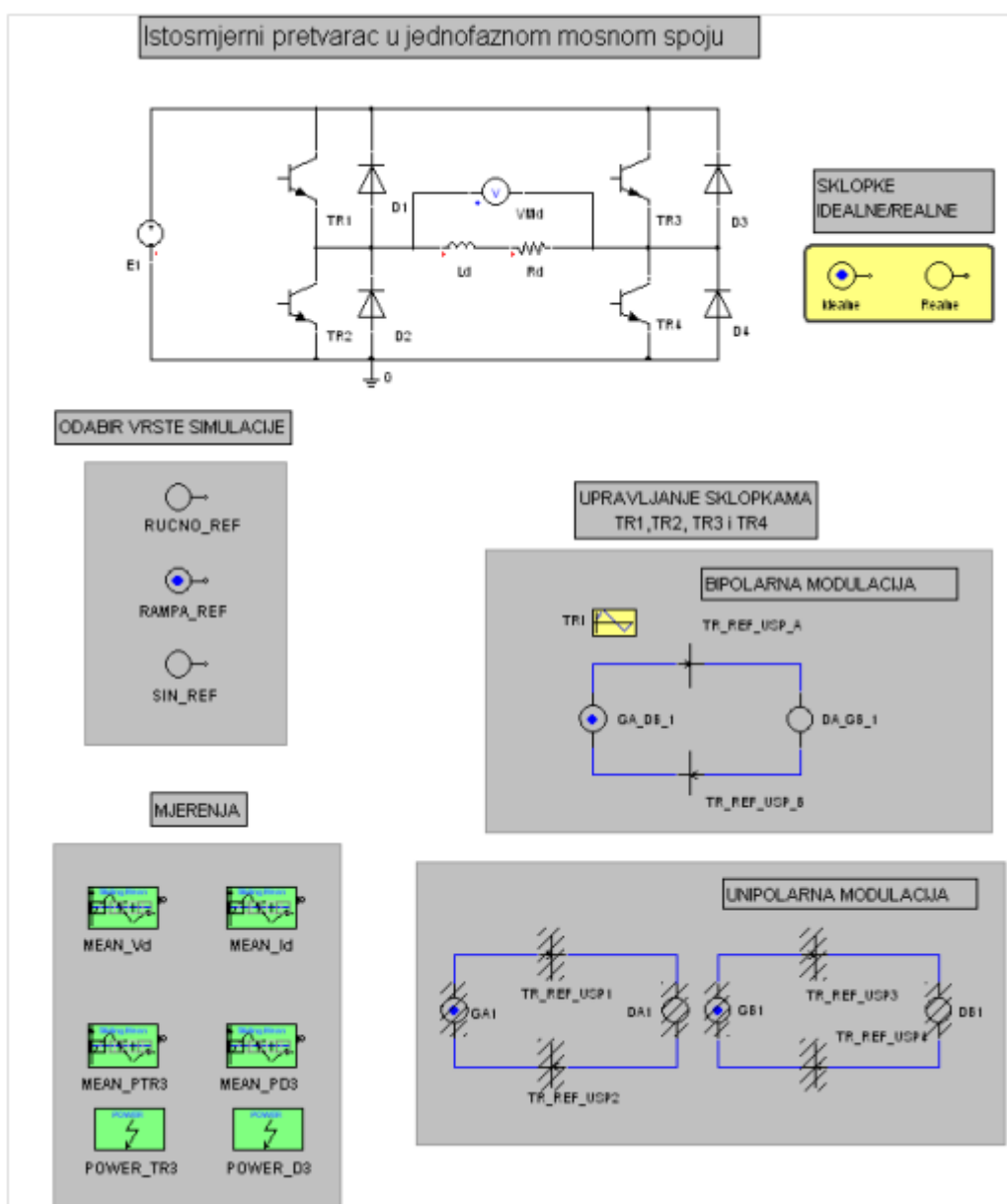
Četverokvadrantni čoper je najčešće korišteni pretvarač za istosmjerne servo pogone, a ima i mnoge druge primjene.

Istosmjerni motor možemo nadomjestiti serijskim spojem protuelektromotorne sile, otpora i induktiviteta.

Simulacija rada istosmjernog PWM pretvarača

Simulaciju istosmjernog PWM pretvarača radimo u Simploreru. Shemu otvaramo i simuliramo u ovisnosti o upravljačkoj veličini (slika 12). Odabran je idealni pretvarač tj. model ima idealne sklopke. Promjena faktora upravljanja vrši se po rampi. Koristimo bipolarnu modulaciju (PWM). Simulacija se vrši za iznose upravljačke veličine REF od -1 do 1.

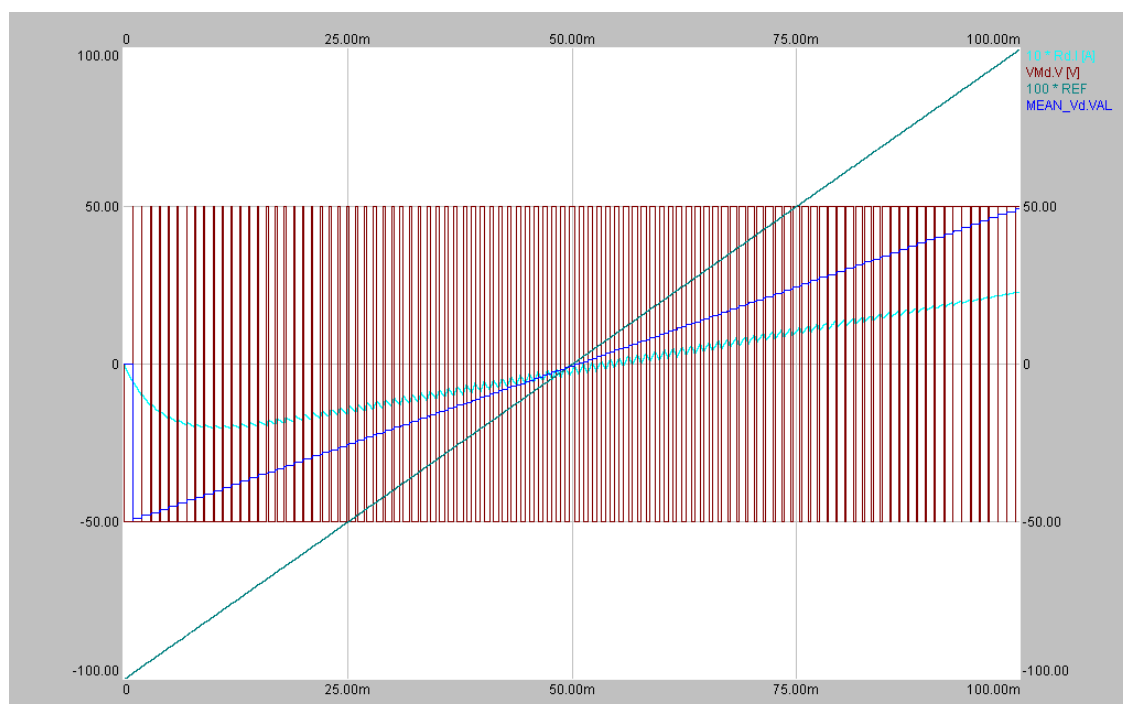
Valni oblici koji se promatraju su napon na trošilu (VMd.V), srednja vrijednost napona na trošilu (MEAN_Vd.VAL), struja trošila (R_d.I) i referentna veličina (REF).



Slika 12. Model DCDC pretvarača

DC DC pretvarač vježba a)

Odziv DC DC pretvarača za $L = 80 \text{ mH}$. (slika 13)



Slika 13. Simulacija DC DC pretvarača za $L=80 \text{ mH}$

Analizom prikaza bipolarne modulacije dobivamo da vrijedi odnos

$$D_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{U_{ref}}{U_{tri}} + 1 \right) \quad (4)$$

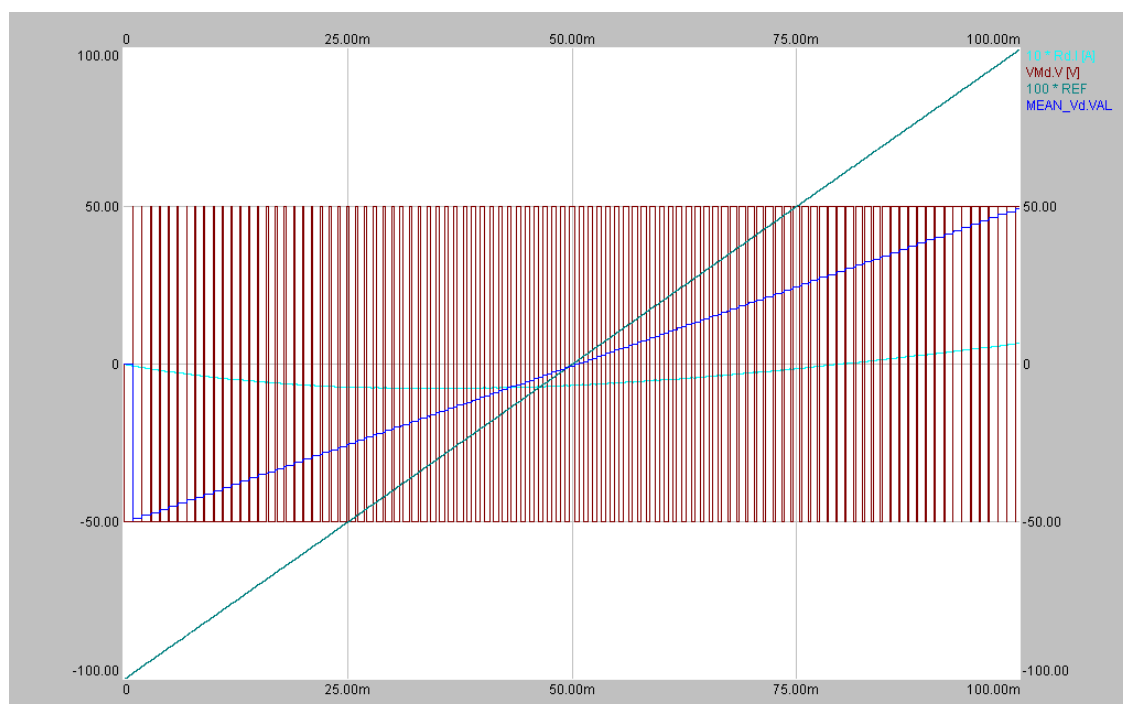
Znamo da je omjer srednje vrijednosti izlaznog napona (U_o) i napona napajanja (U_B) jednak omjeru vrijednosti upravljačkog signala (U_{ref}) i vršne vrijednosti visokofrekvencijskog signala nosioca (U_{tri}) tj. vrijedi $\frac{U_{ref}}{U_{tri}} = \frac{U_o}{U_B}$.

Ako kao faktor opterećenja D definirano relativno trajanje pozitivnog izlaznog napona, tada je za bipolarnu modulaciju $D = D_1$, te gornji izraz ostaje isti. Odnosno zadržan je i dalje linearni odnos upravljačke veličine i faktora upravljanja.

Primjećujemo dva kvadranta rada. Početni je $U_d < 0, I_d < 0$ (rad u 3. kvadrantu, slika 11), a nakon $t = 50 \text{ ms}$ $U_d > 0, I_d > 0$ (rad u 1. kvadrantu, slika 11)

DC DC pretvarač vježba b)

Odziv DC DC pretvarača za $L = 1 \text{ H}$. (slika 14)



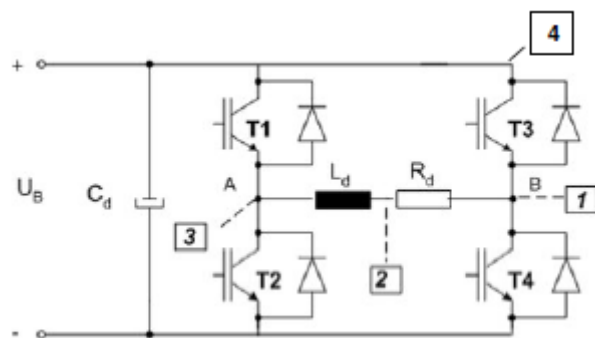
Slika 14. Simulacija DC DC pretvarača za $L=1 \text{ H}$

U odnosu na sliku 10, na kojoj se vide dva kvadranta rada, slici 11 vide se tri kvadranta (od četiri moguća). U početku imamo $U_d < 0, I_d < 0$ (rad u 3. kvadrantu, slika 11), u $t = 50 \text{ ms}$ prelazimo u stanje u kojem je $U_d > 0, I_d < 0$ (rad u 2. kvadrantu, slika 11) te na kraju završava u stanju $U_d > 0, I_d > 0$ (rad u prvom kvadrantu, slika 11).

Mjerenje rada istosmjernog PWM pretvarača na osciloskopu

U ovom dijelu vježbe sva mjerenja se izvode za pultom na kojem je postavljen istosmjerni pretvarač (DC DC) u jednofaznom mosnom spoju uz pasivni teret (imamo serijski spoj otpornika $R = 20 \Omega$ i induktiviteta $L = 100 \text{ mH}$, te imamo napon istosmjernog napajanja $U_B = 50 \text{ V}$. IGBT sklopke u mostu upravljane se iz modulatora koji se također nalazi na pultu. (slika 15)

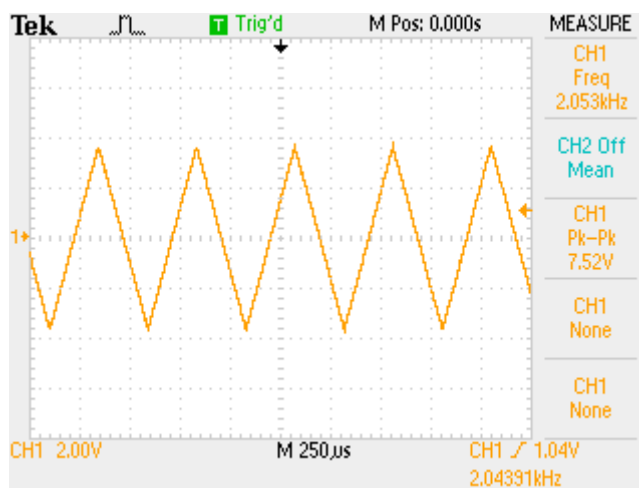
Za ovu vježbu odabrali smo bipolarnu istosmjernu modulaciju.



Slika 15. Istosmjerni pretvarač u jednofaznom mosnom spoju uz pasivni teret

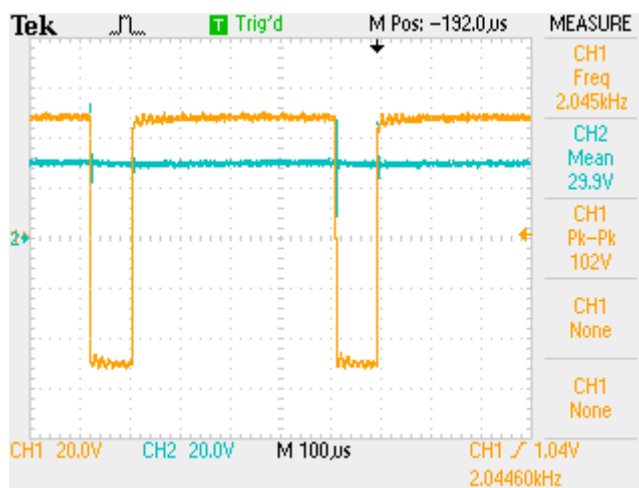
Vježba a)

Namještamo sklopnu frekvenciju tj. frekvenciju trokutastog signala nosioca na $f = 2 \text{ kHz}$. (slika 16)



Slika 16. Valni oblik signala nosioca, $f=2\text{kHz}$

Pomoću potenciometra namjestimo da srednja vrijednost struje trošila bude $I_{d_{avg}} = 1.5 \text{ A}$. (slika 17)

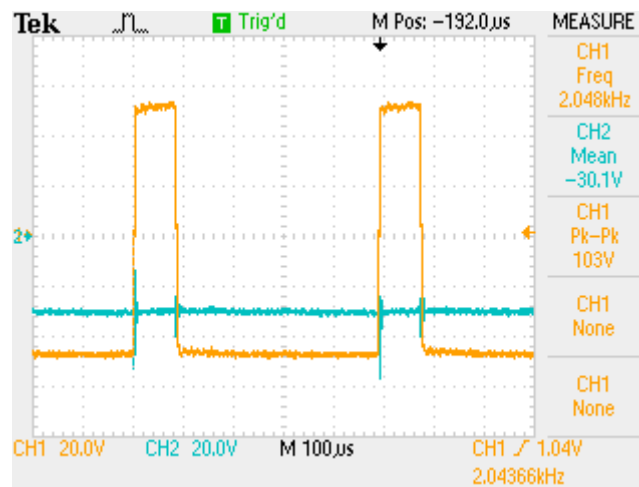


Slika 17. Napon i struja trošila za srednju vrijednost struje tereta 1,5 A

Na grafu dobivenom sa osciloskopa vidimo da je srednja vrijednost napona na trošilu približno jednaka 30 V (što smo i potvrdili na laboratorijskoj vježbi sa measure funkcijom osciloskopa) te prema jednadžbi (4) dobiva se da je faktor vođenja $D_1 = 0.8$ što smo ranije i izračunali u pripremi. Kako je ovo bipolarna modulacija faktor vođenja sklopke S1 je ujedno i faktor relativnog trajanja pozitivnog napona trošila (D).

Vježba b)

U ovom dijelu laboratorijske vježbe moramo pomoću potenciometra namjestiti da srednja vrijednost struje trošila bude $I_{d_{avg}} = -1.5$ A. (slika 18)



Slika 18. Napon i struja trošila za srednju vrijednost struje tereta -1,5 A

Promjenom predznaka srednje vrijednosti struje trošila mijenja se i predznak srednje vrijednosti napona trošila tj. srednja vrijednost napona trošila sad iznosi otprilike -30 V. Isto kao i prije za faktor vođenja sklopke S1 vrijedi jednadžba 4 iz koje dobivamo da je $D_1 = 0.2$. Komplementarno manji faktor vođenja ($0.2 = 1 - 0.8$) je razumljiv i očekivan. Za oba slučaja vrijedi da smjer struje je pozitivan (struja je veća od nule) ako vode sklopke S1 i S4, a negativan ako vodi drugi par sklopki (S2 i S3). U ovom slučaju 80% vremena vode sklopke S2 i S3 i shodno tome srednja vrijednost struje je manja od nule.

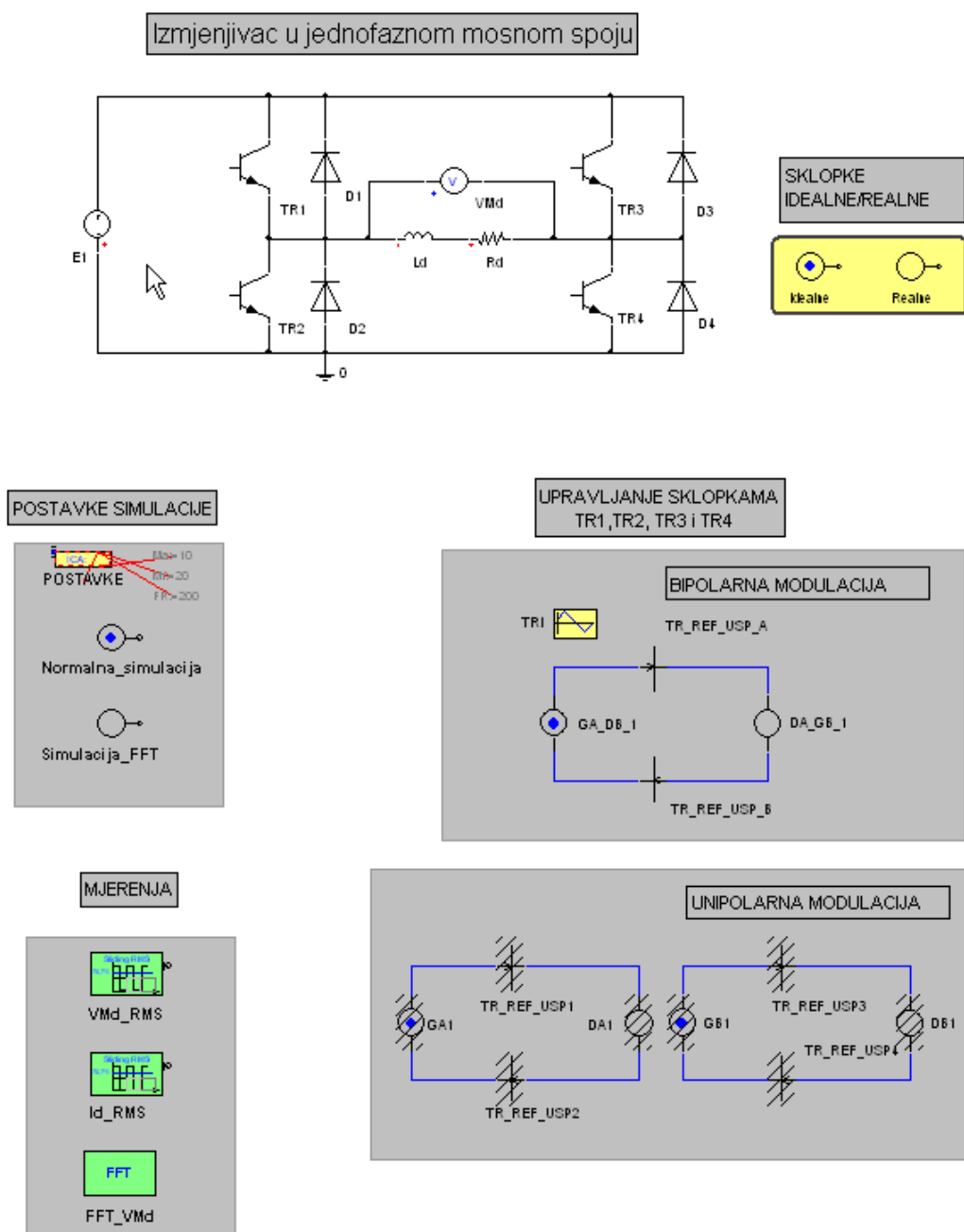
DC AC – izmjenjivač

Simulaciju PWM izmjenjivača radimo u Simploreru. Shemu otvaramo te simuliramo u ovisnosti o amplitudnom indeksu modulacije (M_a), frekvenciji referentnog signala [Hz] i frekvencijskom indeksu modulacije (M_f). Trajanje simulacije namještamo preko varijable tend. Amplitudni i frekvencijski indeks modulacije definiramo kao

$$M_a = \frac{U_{ref}}{U_{tr}} = \frac{U_{a1}}{U_B} \quad (5) \quad M_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (6)$$

Gdje je U_{a1} vršna vrijednost osnovnog harmonika napona na trošilu [V], U_B ulazni istosmjernom napon [V], U_{ref} referentni signal [V], U_{tr} vršna vrijednost trokutnog signala nosioca [V], f_s frekvencija signala nosioca [Hz] i f_1 frekvencija osnovnog harmonika napona na trošilu [Hz].

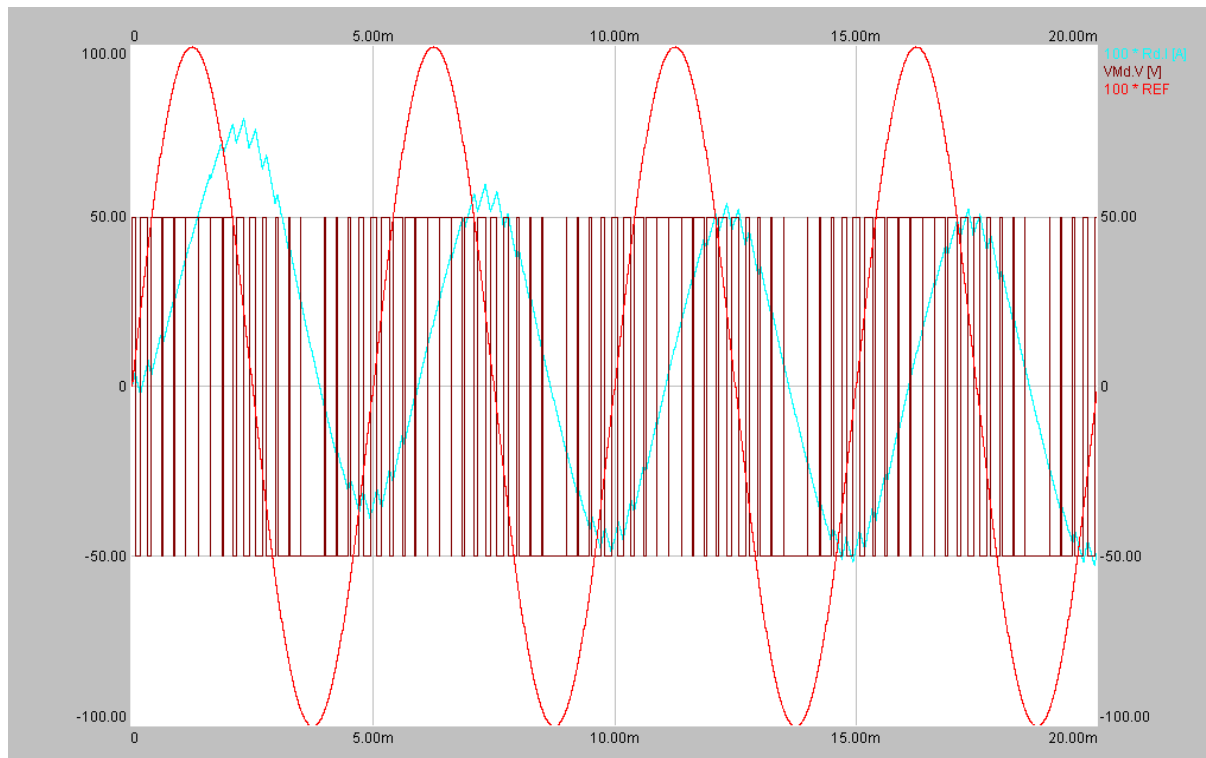
Također i u ovom slučaju odabrane su idealne sklopke tj. imamo idealni izmjenjivač, a ulazni istosmjerni napon je $U_d = 50$ V. (slika 19)



Slika 19. Model DCAC izmjenjivača

Vježba a)

U prvom dijelu vježbe uzimamo da je amplitudni indeks modulacije (M_a) jednak 1, frekvencija sinusnog signala (f_r) je 200 Hz i frekvencijski indeks modulacije (M_f) je 20. (slika 20)



Slika 20. Napon na trošilu, struja trošila i referentni napon uz $M_a=1$

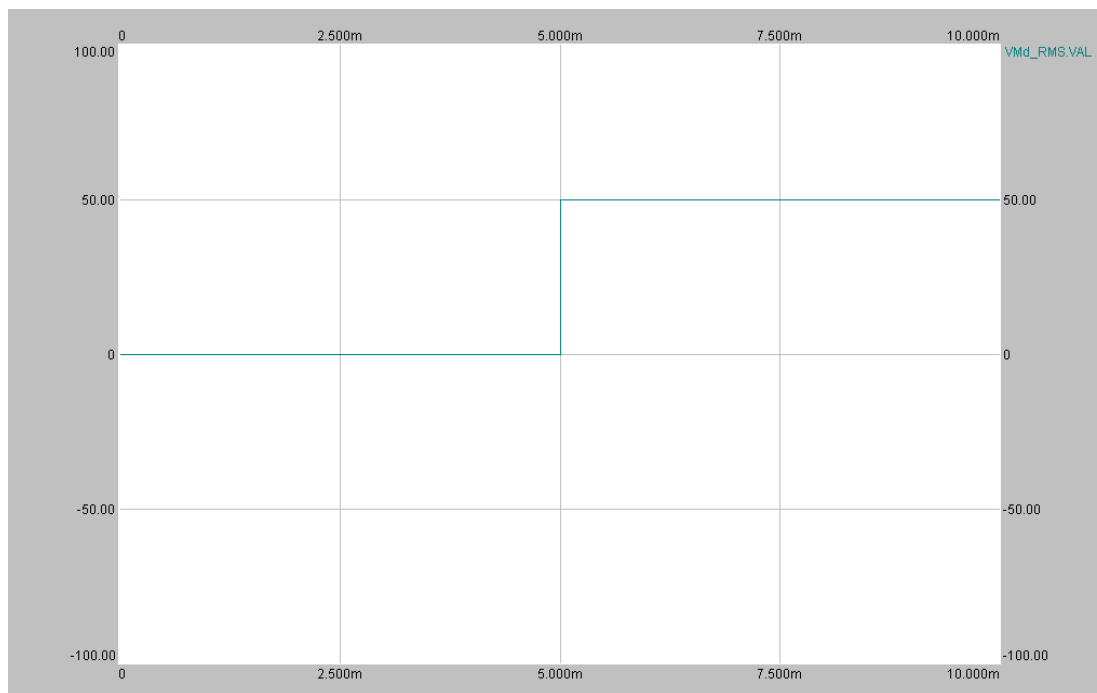
Kako je amplitudni indeks modulacije jednak 1 ($m_a = 1$), vršna vrijednost osnovnog harmonika napona na trošilu je jednaka ulaznom istosmjernom naponu.

Kod bipolarne modulacije mosnog spoja vršna vrijednost osnovnog harmonika napona na trošilu je jednaka je $U_d = 50 \text{ V}$.

Trajanje pozitivnog i negativnog napona na trošilu ($VMd.V$, slika 20) definira odnos referentnog sinusnog signala (REF , slika 20) i trokutastog signala. U trenucima kada vode sklopke S_2 i S_3 trokutasti signal je veći, a kada je referentni signal veći vode sklopke S_1 i S_4 .

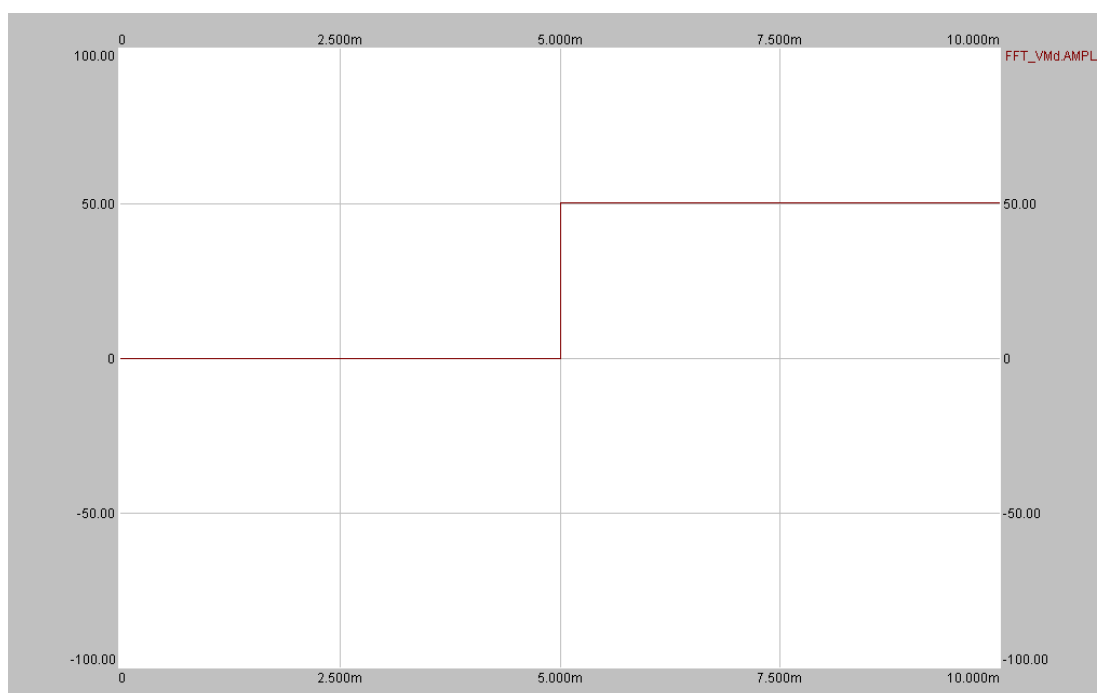
Vježba b)

Napon trošila poprima isključivo vrijednosti 50 V i -50 V (slika 20). Uvrštavanjem u teorijsku formulu sa efektivnu vrijednost $U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_B^2 dt}$ dobivamo da je efektivna vrijednost jednaka 50 V što je i potvrđeno slikom 21.



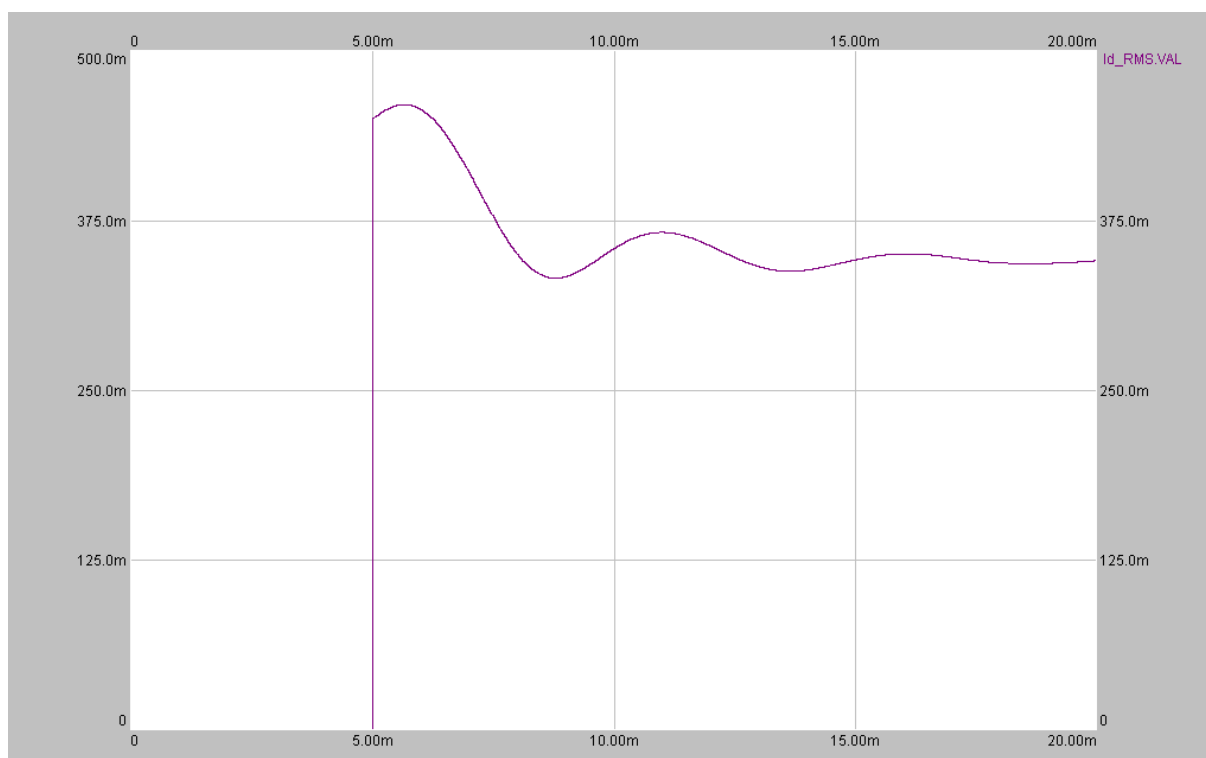
Slika 21. Efektivna vrijednost napona na trošilu uz Ma=1

Iznos amplitude osnovnog harmonika se lako dobije izraza 5 tj. $U_{a_1} = 50 V$. (slika 22)



Slika 22. Amplituda osnovnog harmonika napona na trošilu uz Ma=1

Vježba c)



Slika 23. Efektivna vrijednost struje trošila uz $Ma=1$

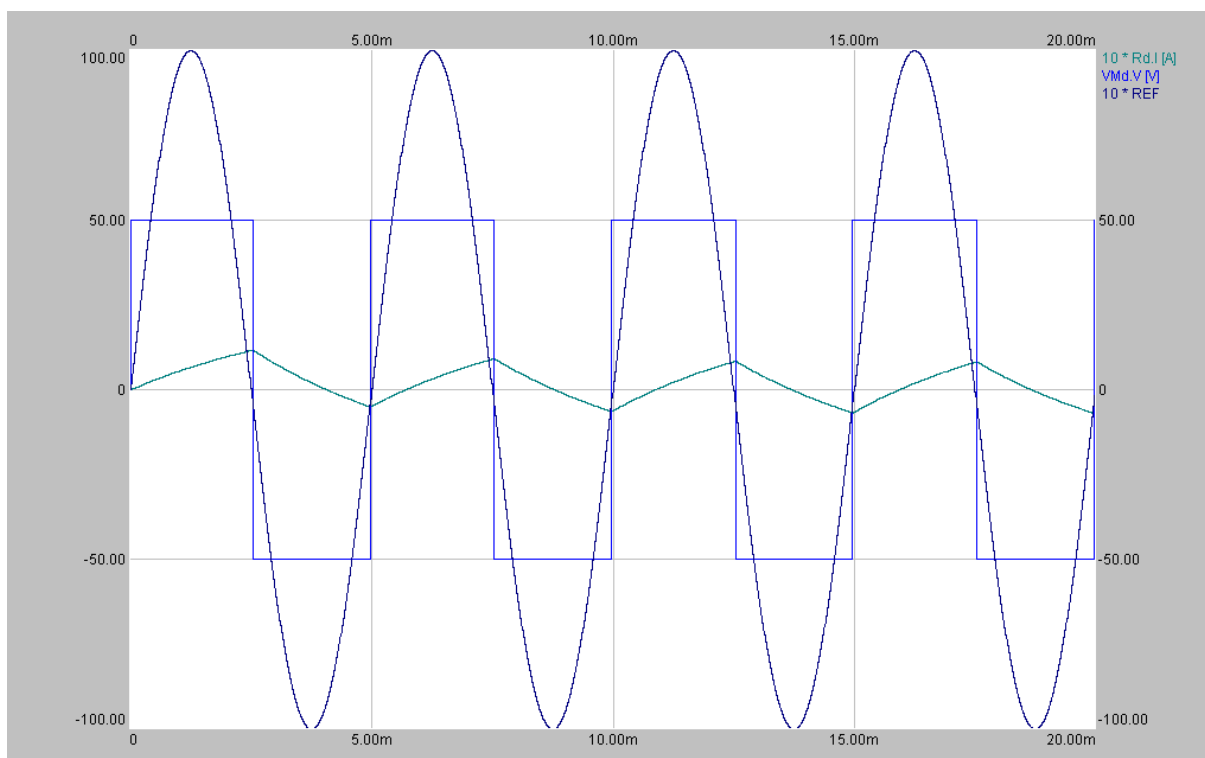
Sa gornje slike se može očitati da u stacionarnom stanju efektivna vrijednost struje trošila približno je jednaka 345 mA. Tu vrijednost možemo potvrditi i analitički. Vrijedi iduća relacija za efektivnu vrijednost struje trošila [A]:

$$I_{ef} = \frac{U_{a1}}{\sqrt{2(R^2 + (\omega L)^2)}} \quad (7)$$

Gdje je U_{1rms} efektivna vrijednost osnovnog harmonika napona na trošilu [V], R otpor trošila [Ω], L induktivitet trošila [H] i ω frekvencija prvog harmonika [rad/s]. Prema izrazu 7 dobiva se da je $I_{rms} = 344$ mA. Što se slaže sa rezultatima simulacije (slika 23).

Vježba d)

U ovom dijelu vježbe simuliramo isti izmjenjivač kao i u prethodnom dijelu (svi parametri isti) osim što je sada amplitudni indeks modulacije jednak 10 ($M_a = 10$). Povećanje indeksa modulacije znači da je referentni sinusni signal (REF, slika 24) po amplitudi puno veći (10 puta) od trokutastog signala. To povlači gubitak efekta PWM modulacije te dobivamo da je izlazni napon trošila pravokutan (VMd.V, slika 24). Struja očekivano pada i raste po eksponencijali radi induktiviteta u trošilu.



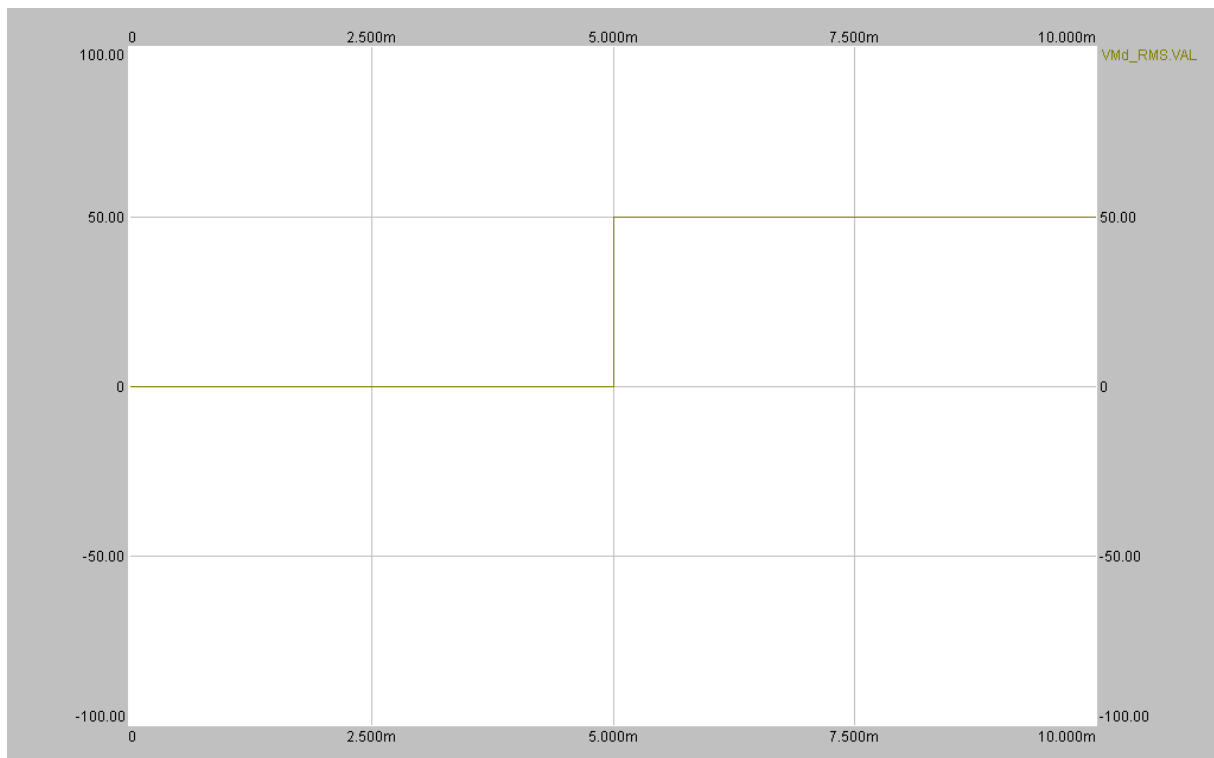
Slika 24. Napon na trošilu, struja trošila i referentni napon uz $M_a=10$

Vježba e)

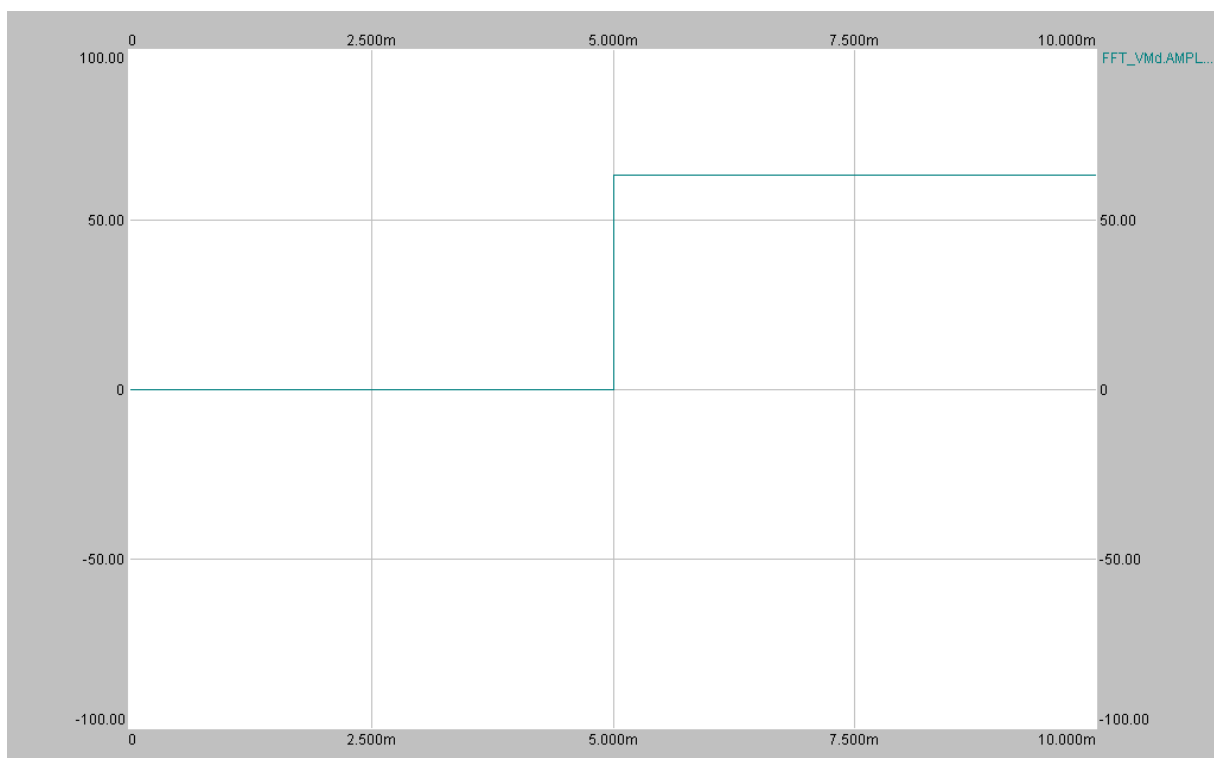
U ovom dijelu vježbe Simplorerom dobivamo efektivnu vrijednost napona na trošilu i vrijednost amplitude prvog harmonika napona na trošilu.

Kao i u vježbi b) efektivnu vrijednost napona na trošilu računamo preko definicije. Kako su vrijednosti izlaznog napona 50 V i -50V i ovdje efektivna vrijednost iznosi 50 V (slika 25).

Pravokutni signal sastoji se od beskonačno mnogo harmonika. Ako taj signal rastavimo u Fourierov red dobijemo da je vrijednost amplitude osnovnog harmonika jednaka : $U_{a1} = \frac{4U_B}{\pi}$. Uvrštavanjem u dani izraz, uz $U_B = 50V$ dobiva se da je $U_{a1} = 63.6 V$. Istu vrijednost dobivamo i očitavanjem sa grafa (slika 26).

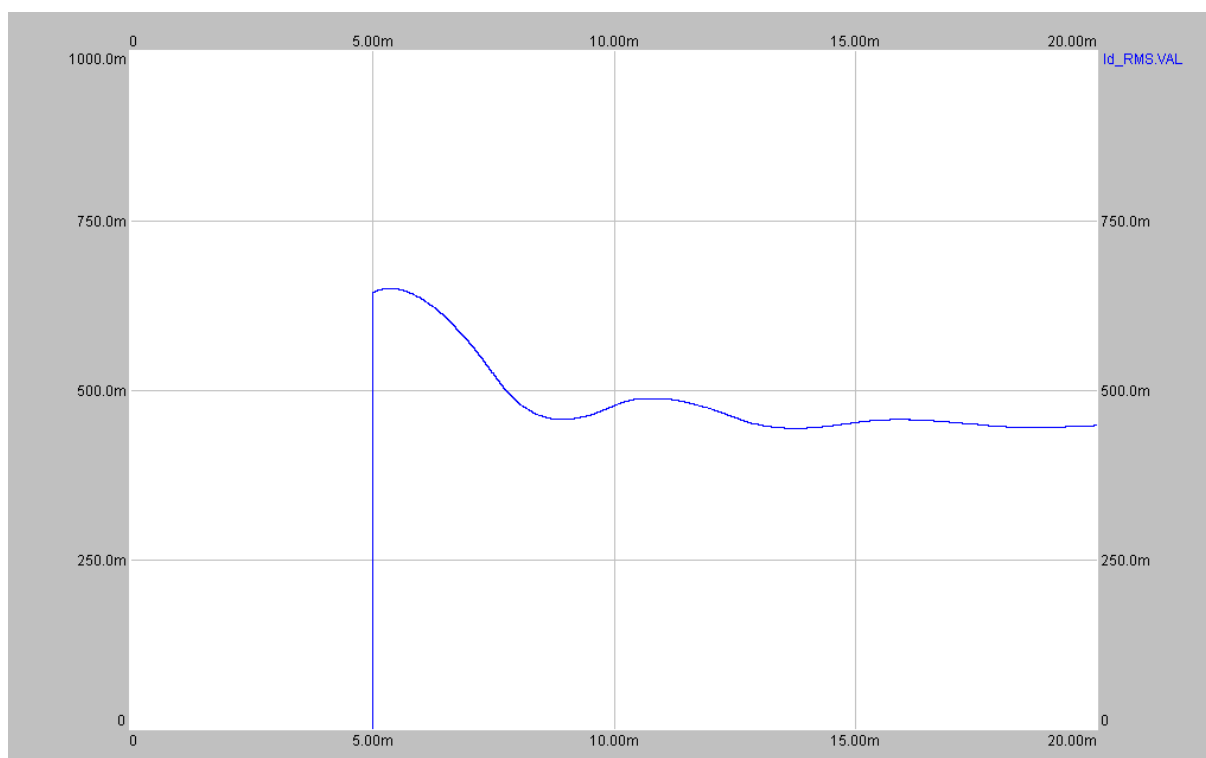


Slika 25. Efektivna vrijednost napona na trošilu uz $Ma=10$



Slika 26. Efektivna vrijednost osnovnog harmonika napona na trošilu uz $Ma=10$

Vježba f)

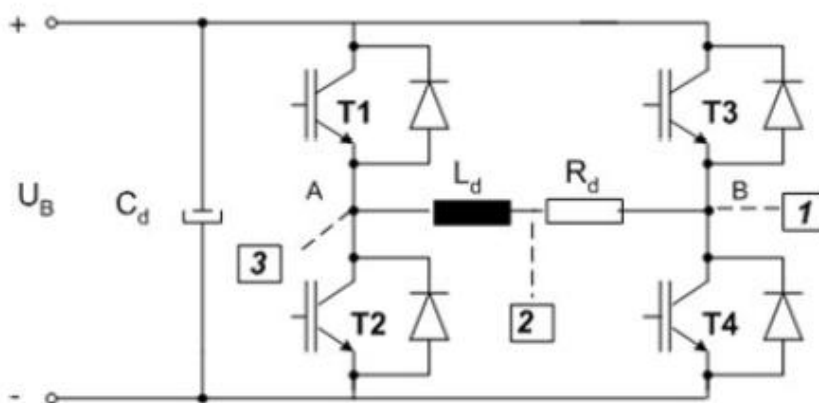


Slika 27. Efektivna vrijednost struje trošila uz $M_a=10$

Iz izraza 7 dobivamo da je efektivna vrijednost struje trošila jednaka 438.7 mA što se i potvrdilo simulacijom (slika 27).

Mjerenje rada PWM izmjenjivača na osciloskopu

U drugom dijelu vježbe radimo sa PWM izmjenjivačem. Na izmjenjivač u jednofaznom mosnom mosnom spoju, spojeno je pasivno RL trošilo, a cijeli sklop je spojen na izvor istosmjernog napona (slika 28)

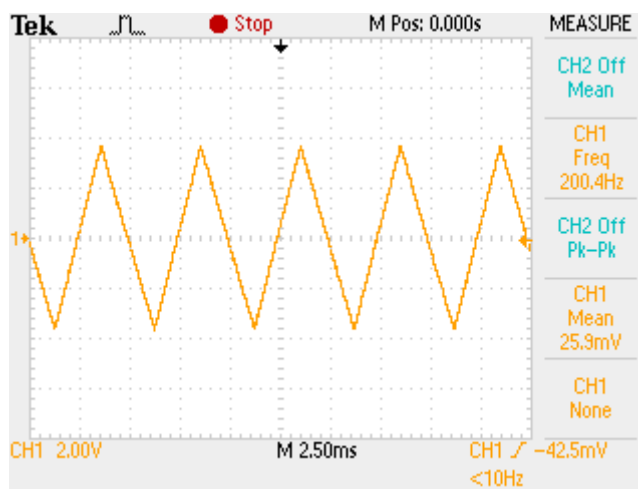


Slika 28. Izmjenjivač u jednofaznom mosnom spoju uz pasivni teret

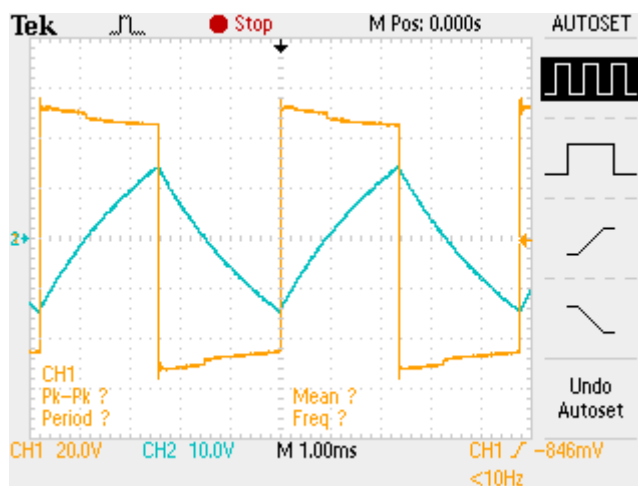
Sklopke u izmjenjivaču izvedene su kao antiparalelni spoj diode i IGBT tranzistora. IGBT tranzistore upravljamo impulsno-širinskom (PWM) modulacijom koji se generiraju u upravljačkom krugu na panelu. Sve valne oblike promatramo na osciloskopu. Napon mjerimo sondom između točaka 1 i 3, za mjerenje struje koristili smo napon između točka 1 i 2, te izmjerenu veličinu smo potom podijelili sa R (slika 28).

1) Pravokutni izlazni napon

Pomicanjem preklopke u odgovarajući položaj na upravljačkom panelu odabiremo pravokutni napon na izlazu. Frekvenciju izlaznog napona podešavamo podešavanjem frekvencije trokutnog signala nosioca. U ovoj vježbi frekvencija trokutnog signala iznosila je 200 Hz. Zatim smo osciloskopom snimali odzive struje i napona.



Slika 29. Valni oblik signala nosioca, $f=200$ Hz



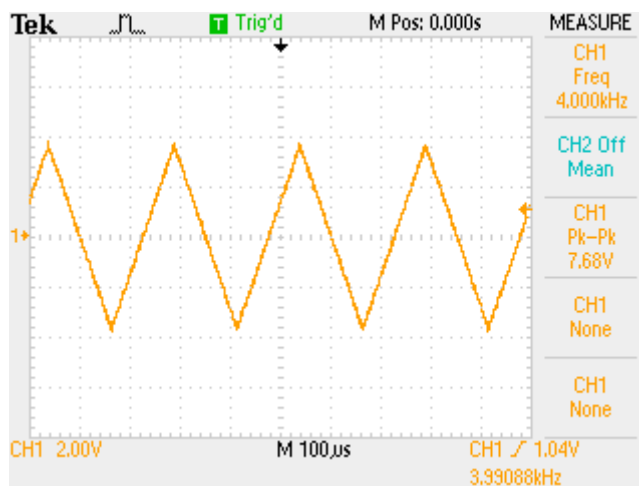
Slika 30. Valni oblik struje i napona na trošilu

Na slici 30 žutom bojom je prikazan napon na trošilu, a plavom bojom je prikazana struja trošila. Napon od vrha do vrha iznosi 100 V, struja od vrha do vrha je 3A. Efektivna vrijednost napona je 50 V.

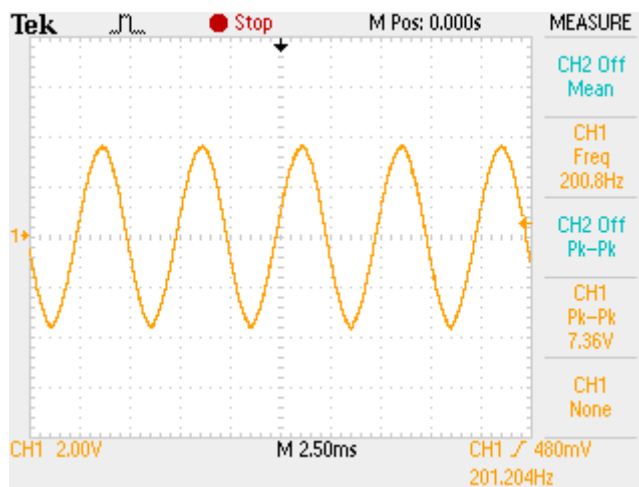
Efektivna vrijednost struje na trošilu može se promijeniti ako se promijeni efektivna vrijednost napona na trošilu ili ako se povećava frekvencija signala nosioca (f_s) uz konstantni iznos efektivnog napona na trošilu. Efektivnu vrijednost napona možemo mijenjati promjenom amplitude ulaznog napona izmjenjivača (U_B , slika 28). Povećanjem f_s povećavamo frekvenciju napona time raste otpor induktiviteta pa će i efektivna vrijednosti struje pasti (ovaj zaključak direktno proizlazi iz jednadžbe 7)

2) Bipolarna sinusna modulacija

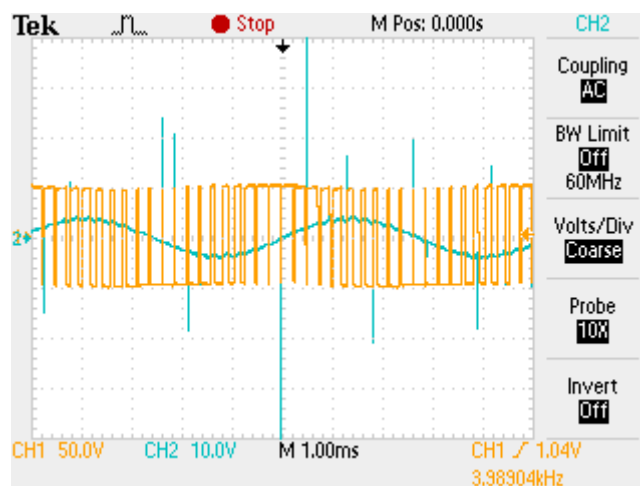
U ovom dijelu vježbe koristi se ista shema kao i u dijelu pod 1). No, sada koristimo sinusnu bipolarnu modulaciju u upravljačkom krugu. Moramo promijeniti frekvenciju trokutnog signala na 4000 Hz (slika 31), a frekvenciju referentnog sinusnog signala na 200 Hz (slika 32). Izlazni napon sada ima sinusni valni oblik. Amplitudni indeks modulacije ostaje nepromijenjen tj. $m_a = 1$, dok je frekvencijski indeks modulacije postaje $m_f = 20$.



Slika 31. Valni oblik signala nosioca, $f=4$ kHz



Slika 32. Sinusni signal, $f=200$ Hz



Slika 33. Napon i struja tereta za bipolarnu modulaciju širine impulsa, $m_f = 20$, $m_a = 1$

Na slici 33 plavom bojom prikazan je napon na trošilu. Žutom bojom prikazan je napon nastao nakon modulacije. Amplitudu napona možemo promijeniti ako promijenimo amplitudu ulaznog napona ili vrijednost amplitudnog indeksa modulacije. Ako želimo duplo smanjiti efektivnu vrijednost moramo duplo smanjiti amplitudni indeks modulacije. Frekvenciju izlaznog napona možemo mijenjati podešavanjem frekvencije trokutnog napona.

Zaključak

U ovoj laboratorijskoj vježbi simulirali smo modele sklopova koji imaju široku primjenu. Simulirali smo usmjerivač, DC DC pretvarač i PWM izmjenjivač. Ti sklopovi pretvaraju napon iz oblika kakav je dan izvorom u oblik kakav je potreban trošilu. Tako olakšavaju upravljanje elektromotornim pogonima (npr. širinska modulacija kod pretvarača i izmjenjivača je efikasno rješenje za uklanjanje štetnih viših harmonika, usmjerivačem koji radi u sva četiri kvadranta možemo upravljati naponom armature DC motora da dobijemo sva četiri kvadranta rada tog motora).