

**Hrvoje Pauković**  
**0036451717**

# **Treći ciklus laboratorijskih vježbi iz praktikuma učinske elektronike**

**Vježba 1: Univerzalni PWM pretvarač kao DC/AC pretvarač**

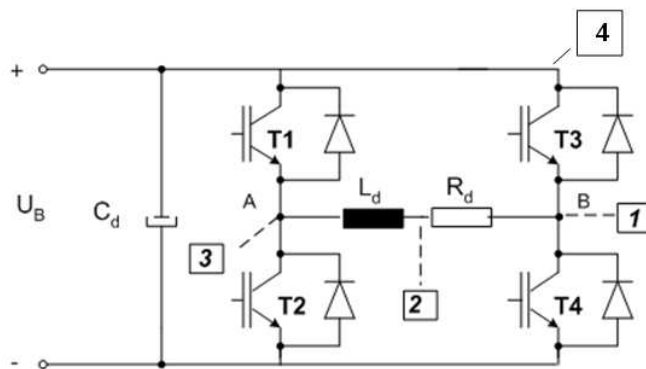
**Vježba 2: Pokazna vježba na Danfoss frekvencijskom  
pretvaraču**

Grupa: Hrvoje Pauković  
Edo Jelavić  
Krešimir Vlahov  
Tretnjak Karlo

## Seminar

### 1.1 Univerzalni PWM pretvarač kao DC/AC pretvarač

PWM univerzalnim pretvarač može raditi kao DC/DC pretvarač ali također i kao DC/AC pretvarač. Topologija sklopa prikazana je na Slici 1.1. Pretvarač se sastoji od 4 poluvodičke sklopke od kojih se pak svaka sastoji od protuparalelnog spoja 2 ventila. U protuparalelnom spoju nalaze se punoupravljivi IGBT tranzistor te neupravljive diode. Ako se analiziraju ventili zasebno IGBT može na sebe primiti napon jednog polariteta i voditi struju u jednom smjeru. Nakon spajanja diode u protuparalelu tranzistoru sklopka može primiti jedan polaritet napona i provesti struju u dva smjera. Pojedinačni ventili su jednokvadrantni dok je ukupna sklopka dvokvadrantna. Navedeni postupak je bio potreban kako bi ukupni ispravljač bio četverokvadrantan. Univerzalni PWM pretvarač može dakle trošilu dovesti 2 polariteta napona i provesti struju u oba smjera. Pretvarač je univerzalan jer može na izlazu dati istosmjerni ili izmjenični napon što je uvjetovano modulacijom-načinom na kojim se upravlja sklopkama. Na shemi je vidljivo da je dodati kondenzator bio spojen u paralelu izvoru. Njegova svrha je da dodatno smanji oscilacije u istosmjernom naponu koji je dobiven iz diodnih ispravljača u laboratoriju.

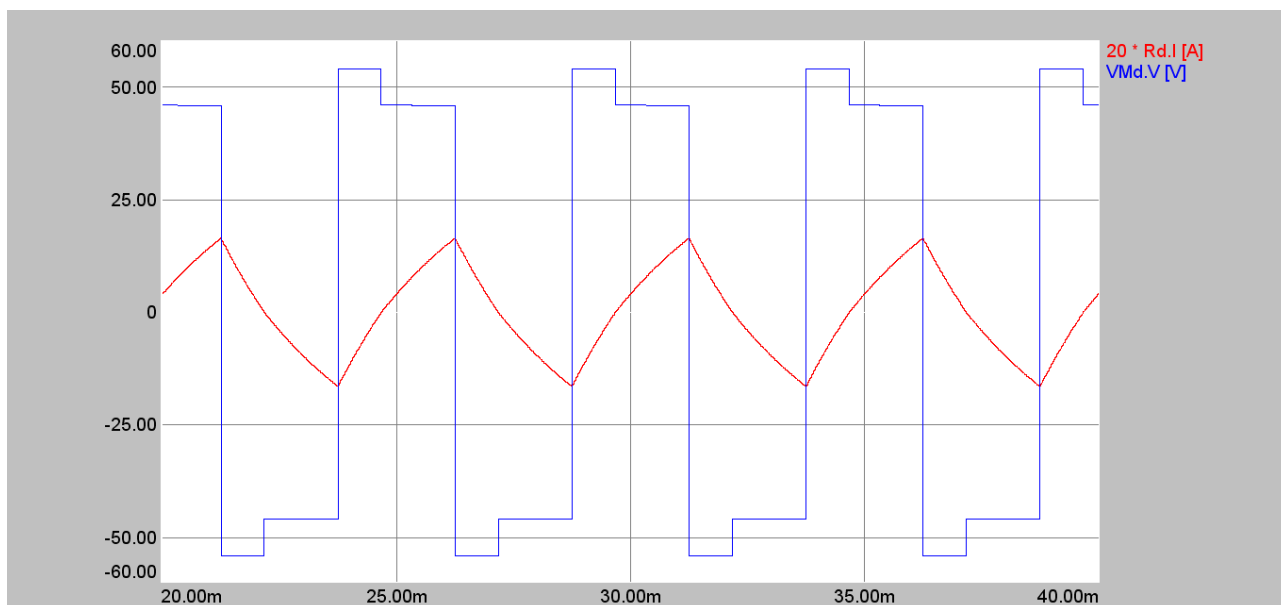


Slika 1.1: topologija univerzalnog PWM pretvarača

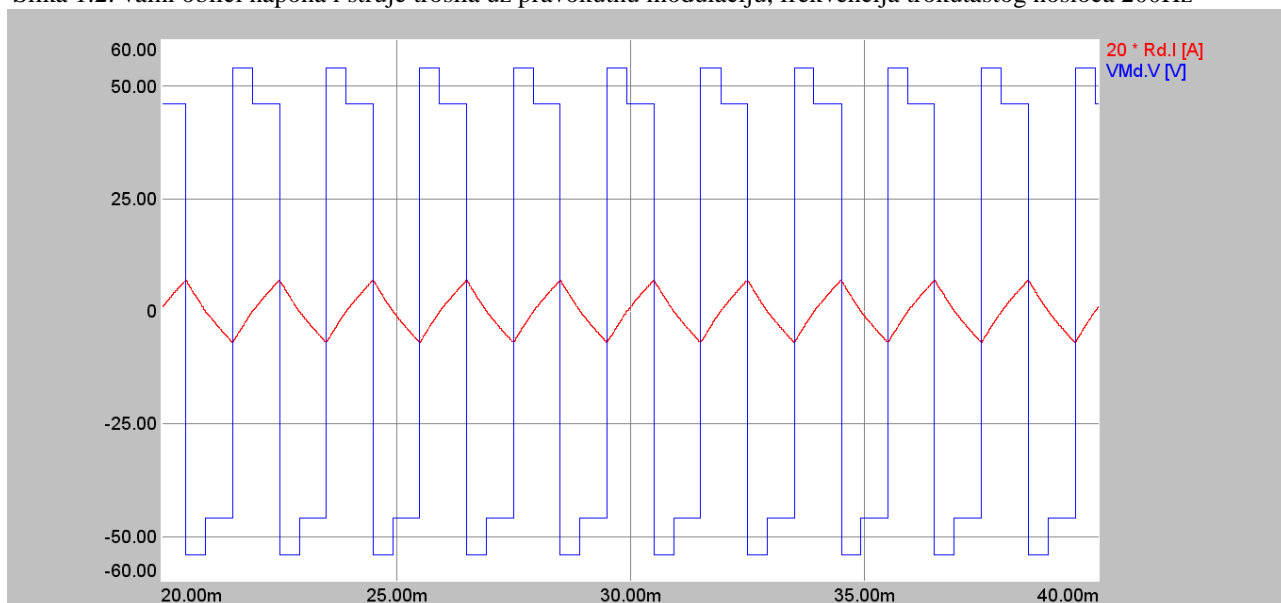
Ime pretvarača dolazi od načina na koji su upravljani njegovi ventili a to je modulacija širine impulsa (pulse width modulation). Za vrijeme treće vježbe zadatak je bio testirati univerzalni PWM pretvarač u DC/DC načinu rada. Ventili su tada upravljani bipolarnom modulacijom koja je objašnjena u prethodnom izvještaju. DC/AC režim rada moguće je postići ako se ventilima upravlja pravokutnom ili kvazipravokutnom modulacijom. Principi ovih modulacija su shematski prikazani na slici 1.6 a bit će objašnjeni u nastavku.

Ideja pravokutne modulacije je da se a referentni signal postavi masa i uspoređuje s trokutastim signalom nosiocem. Rezultat je upravljački signal takav da će pola vremena voditi 1 par sklopki (S1 i S4), a pola drugi (S2 i S3). Odziv napona i struje na trošilu uz različite frekvencije trokutastog signala dobiveni simulacijom u Simploreru prikazani su na slikama 1.2, 1.3 i 1.4. Na trošilu je biti vidljiv pravokutni izmjenični napon s amplitudama  $\pm U_B$ . Napon  $U_B = 50V$  DC predstavlja napon napajanja. Zbog induktivnog karaktera trošila, struja trošila će oscilirati oko 0 po eksponencijalnom zakonu. Oscilacija napona i struje oko iznosa 0 je karakteristika upravo izmjenične struje. Vršne vrijednosti struje ovise o periodu vođenja parova sklopki. Budući da su ta vremena jednaka za svaku od frekvencija vršni iznosi struje bit će jednaki po iznosu i suprotnih predznaka.

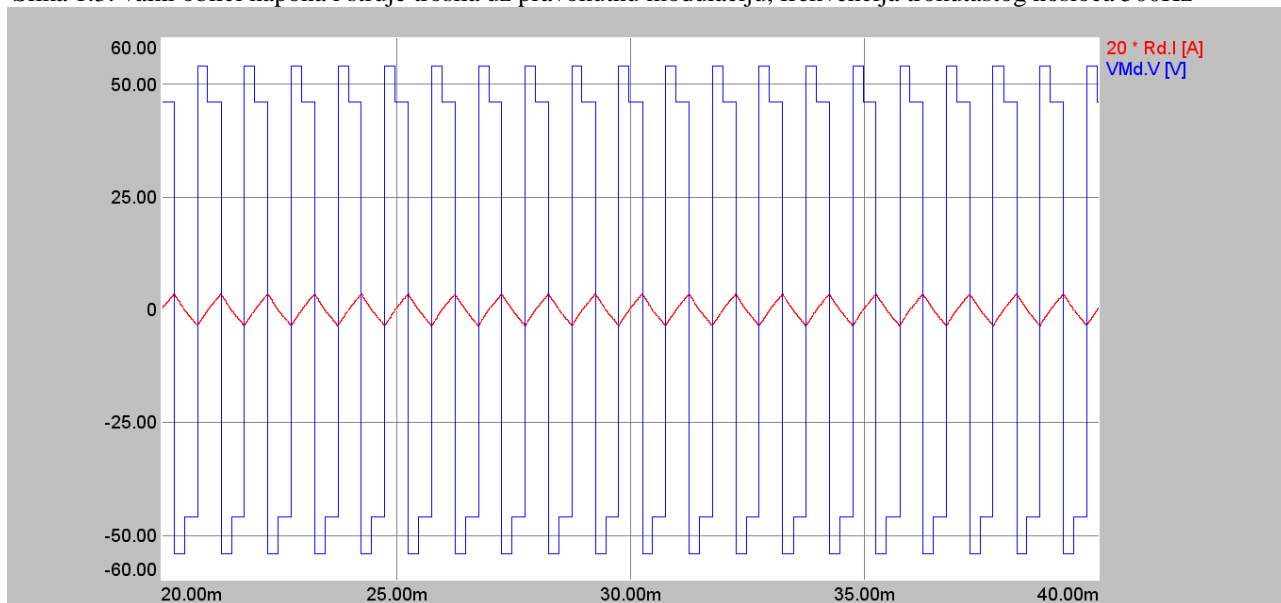
Prilikom simulacije korišteni su modeli realnih ventila pa zato napon trošila na vrhu ima stepenicu.



Slika 1.2: valni oblici napona i struje trošila uz pravokutnu modulaciju, frekvencija trokutastog nosioca 200Hz



Slika 1.3: valni oblici napona i struje trošila uz pravokutnu modulaciju, frekvencija trokutastog nosioca 500Hz

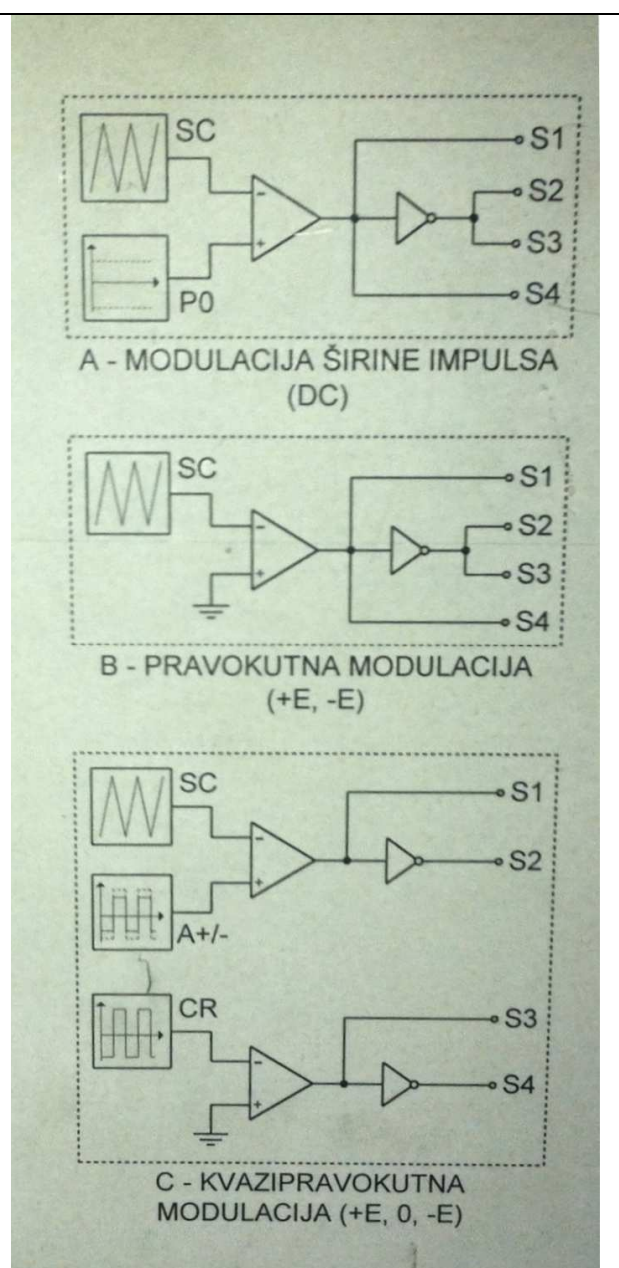


Slika 1.4: valni oblici napona i struje trošila uz pravokutnu modulaciju, frekvencija trokutastog nosioca 1kHz

Kvazipravokutna modulacija daje sličan napon na trošilu. Razlika koju uvodi kvazipravokutna modulacija su žljebovi napona na trošilu (intervali kada je napon na trošilu jednak 0). Budući da korisni moment u motoru daju samo istovrsni harmonici napona i struje, u poželjno je prigušiti sve ostale harmonike osim osnovnog. Jedan od načina na koje je to moguće izvesti jeste ubacivanjem harmonika iste frekvencije kao onaj kojeg želimo poništiti ali fazno pomaknut za 180 stupnjeva. Upravo je to uzrok žljebova napona (beznaponske pauze na trošilu). Širinu beznaponskog intervala moguće je regulirati promjenom amplitude referentnog napona (potenciometrom A+/-). A promjenom frekvencije trokutastog signala mijenja se frekvencija izlaznog napona. Osim drugačijeg harmonijskog sastava valni oblik napona na trošilu je drugačiji kod kvazipravokutne modulacije. Osim intervala u kojima je napon na trošilu jednak  $\pm U_B$ , postoje i intervali kada je napon nula. Induktivitet će se sporije izbijati u intervalima kada je napon na trošilu jednak 0.



Slika 1.5 upravljački panel modulatora



Slika 1.6 princip modulacija

## 1.2 Pokazna vježba na Danfoss frekvencijskom pretvaraču

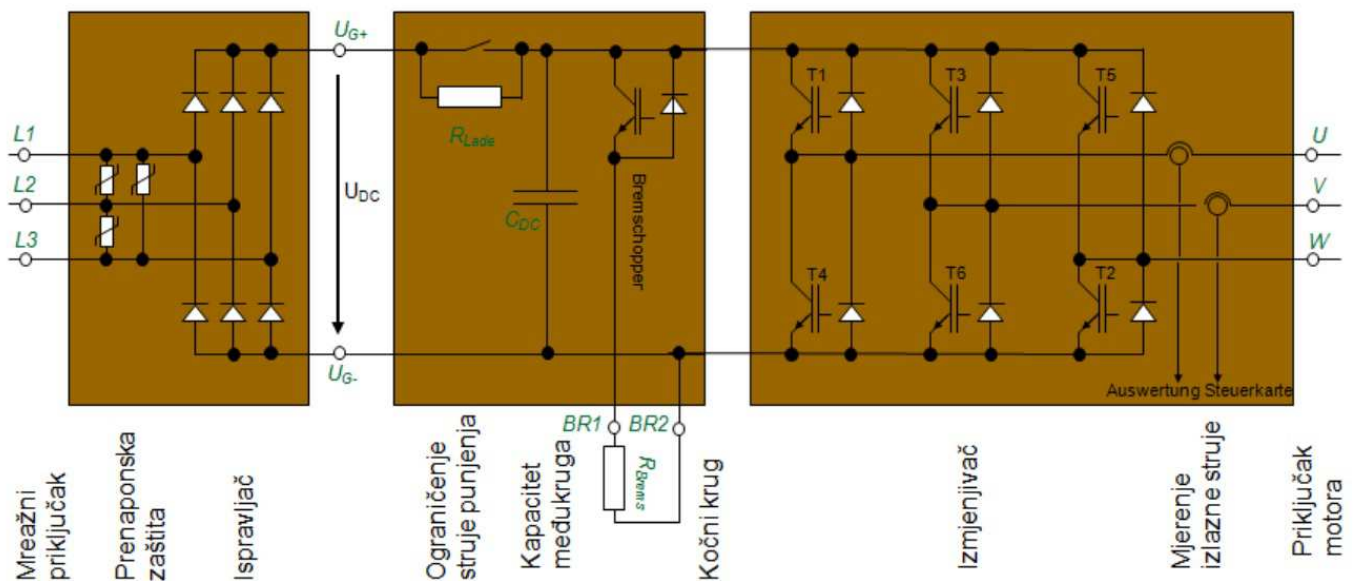
Asinkroni motori priključeni na čvrstu mrežu mogu se vrtjeti samo konstantom brzinom nešto sporijom od sinkrone brzine vrtnje okretnog magnetskog polja. Sinkronu brzinu diktira

frekvencija mrežnog napona prema relaciji  $n_{\text{sinkrono}} = \frac{f \cdot 60}{p}$ . Ovakva loša upravljivost motora je

neprihvatljiva u komercijalnoj upotrebi motora pa se stoga koriste uređaji učinske elektronike da bi se motoru dovelo napajanje promjenjive frekvencije. Analiza rada asinkronih strojeva dovela je do spoznaje da nije moguće proizvoljno mijenjati frekvenciju napajanja motora a da pritom ne dođe do poremećaja rada. Prema relaciji  $U = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \phi$  vidljivo je da promjenom frekvencije uz konstantni napon napajanja dolazi do promjena elektromagnetskog toka u statoru motora. Promjena toka za posljedicu ima propad moment ili drastičan porast struje magnetiziranja (budući da motori rade na koljenu karakteristike magnetiziranja jezgre motora).

Ovaj problem je riješen skalarnom metodom upravljanja koje se temelji na zakonu  $\frac{U}{f} = \text{konst.}$

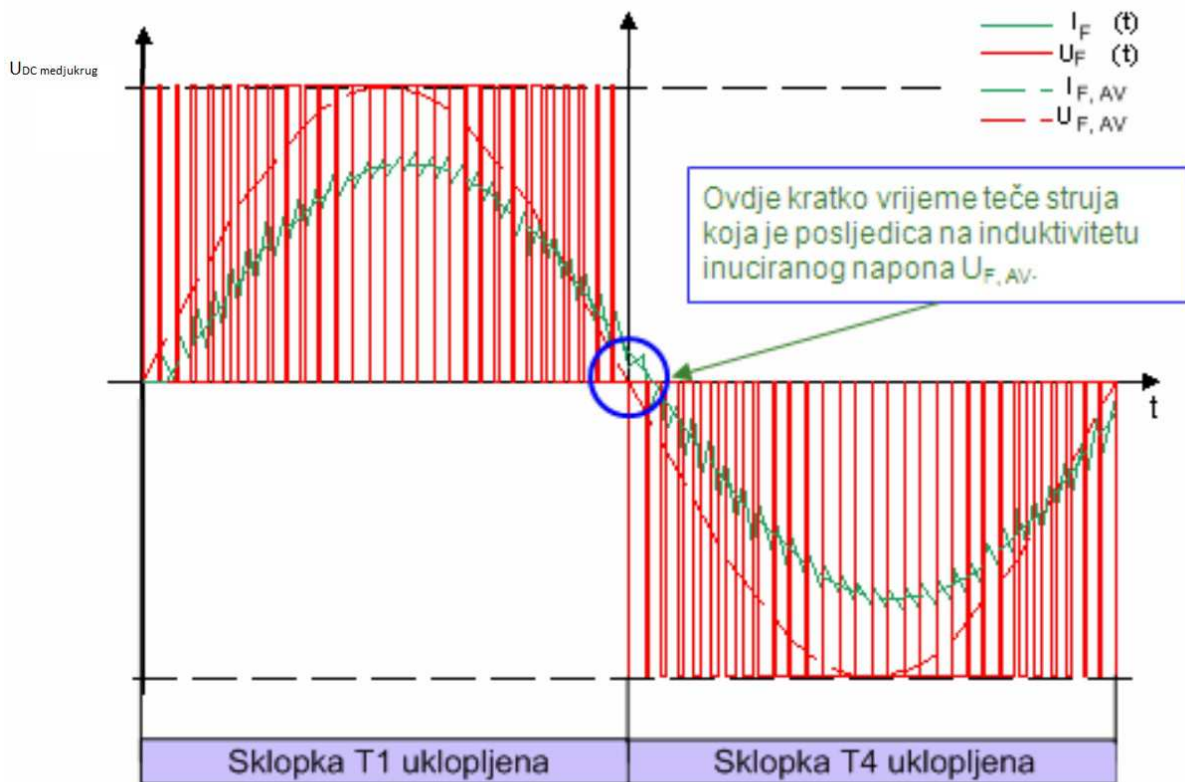
Korištenjem upravo tog načina upravljanja Danfoss pretvarač upravlja brzinom vrtnje asinkronog motora. Sam pretvarač ima energetske i upravljački dio. Upravljački dio komunicira s vanjskim jedinicama kao što su panel na prednjoj strani pretvarača, potencijometar za upravljanje brzinom, sklopka za reverziranje, mjerni članovi, računalo... Osim što vrši komunikaciju i ostvaruje vezu sa korisničkim sučeljem, upravljački dio pretvarača generira upravljačke signale koji kontroliraju rad poluvodičkih ventila u energetskom dijelu pretvarača. Topologija energetskog dijela pretvarača prikazana je na Slici 1.7



Slika 1.7 shema energetskog dijela frekvencijskog pretvarača

Pretvarač se napaja s trofaznog izmjeničnog napona 230/400V. Na ulazu se nalazi trofazni diodni ispravljač. Iza njega nalazi se istosmjerni međukrug pretvarača u kojem se nalazi kondenzator i kočni otpornik. Kondenzator služi za smanjivanje valovitosti ispravljenog napona dok kočni otpornik služi za spaljivanje energije koja se vraća u DC međukrug prilikom generatorskog kočenja motora. Posljednji dio pretvarača je izmjenjivač napona koji se sastoji od 6 poluvodičkih sklopki sastavljenih od protuparalelnog spoja diode i IGBT tranzistora. Sklopke su upravljane nekom

vrstom PWM sinusne modulacije tako da su im periode vođenja promjenjive. Na svom izlazu izmjenjivač daje trofazni izmjenični napon. Napon u svakoj fazi je sastavljen od niza pravokutnih impulsa različitih trajanja čiji je osnovni harmonik sinusnog oblika. Zbog induktiviteta motora i osnovni harmonik struje je sinusnog oblika. Promjenom brzine sklapanja pojedinih sklopki mijenja se frekvencija izlaznog napona i time regulira brzina vrtnje asinkronog motora. Valni oblik faznog napona i fazne struje prikazani su na Slici 1.8



Slika 1.8: Valni oblik faznog napona i struje na izlazu frekvencijskog pretvarača

Dakle skalarnom metodom upravljanja moguće je asinkronom motoru mijenjati brzinu vrtnje u širokim granicama. Neka ograničenja postoje. Sa strane niskih frekvencija (ispod 20Hz) ograničava nas iznos napona potreban za magnetiziranje stroja, sa strane visokih frekvencija ograničava nas konstrukcija samog stroja (centrifugalna naprezanja, naprezanje izolacije uzrokovan visokom frekvencijom,  $U_{\max} = U_{\text{nazivno}}$ ) i manji moment motora uzrokovan smanjenim tokom u jezgri.

## 2. Rad u laboratoriju:

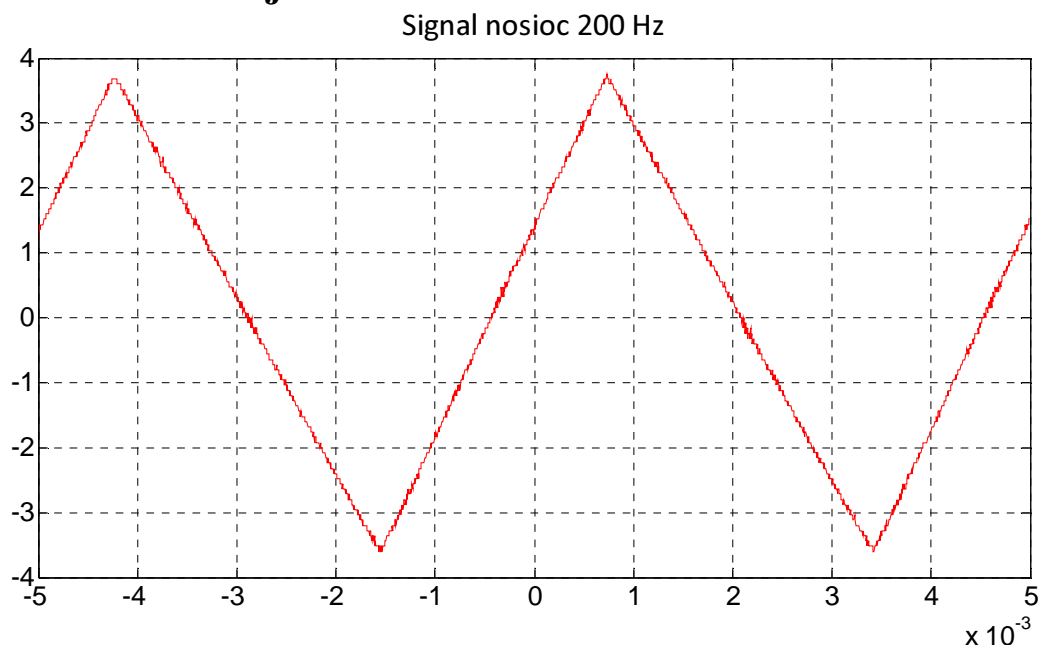
### 2.1 Univerzalni PWM pretvarač kao DC/AC pretvarač

Korištena oprema:

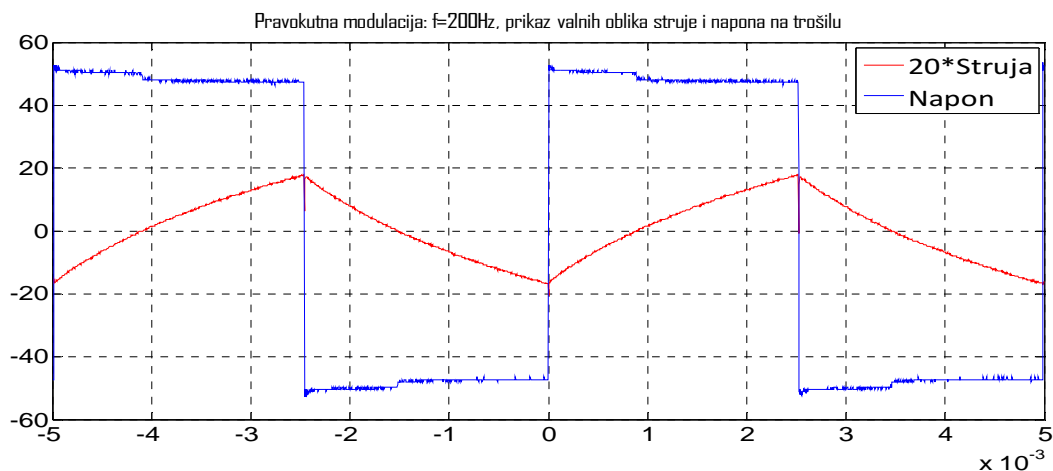
- 2 IGBT modula
- otpornik 20 Ohma
- induktivitet (primar pomoćnog transformatora)
- osciloskop Tektronics Tds 2002, 2 sonde
- sklop za upravljanje IGBT-modulima (modulator)
- napajanje: 50V DC napon na pultu, dobiven ispravljanjem mrežnog napona diodnim ispravljačima
- poredni kondenzator

Shema spoja prema kojoj je vršeno mjerenje prikazana je na slici 1.1. Valni oblik napona na trošilu sniman je naponskom sondom na cijelom trošilu (između točaka 1 i 3) dok napon na otporniku (između 1 i 2) predstavlja valni oblik struje na trošilu skaliran s  $20 (U_R = I \cdot R)$ . Frekvenciju izlaznog napona je moguće regulirati promjenom frekvencije trokutastog signala (potenciometar FREQ SC). Valni oblik trokutastog signala sniman je naponskom sondom spojenom između priključaka GND i SC na moduatoru. (Slika 2.1)

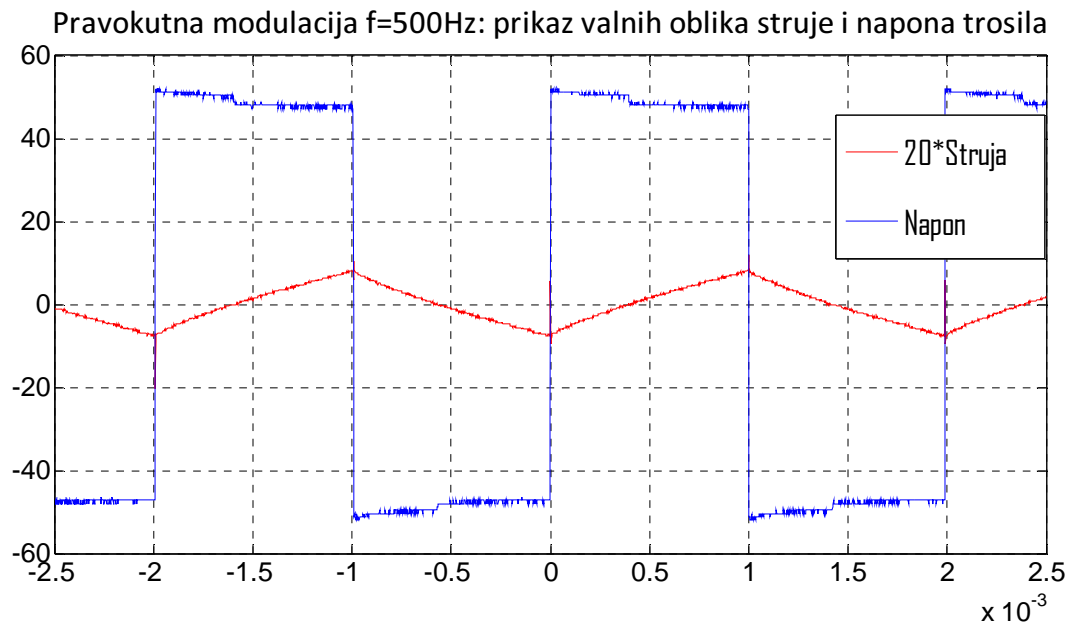
#### Pravokutna modulacija:



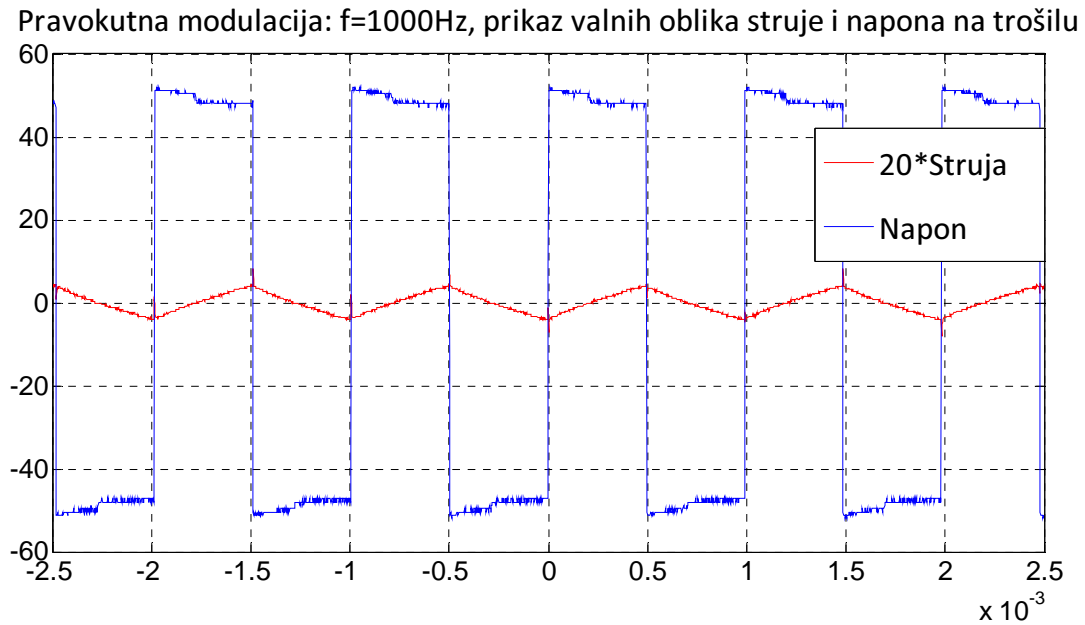
Slika 2.1: valni oblik signal nosilac  $f=200\text{Hz}$



Slika 2.2: pravokutna modulacija,  $f=200\text{Hz}$ , valni oblici napona i struje trošila



Slika 2.3: pravokutna modulacija,  $f=500\text{Hz}$ , valni oblici napona i struje trošila



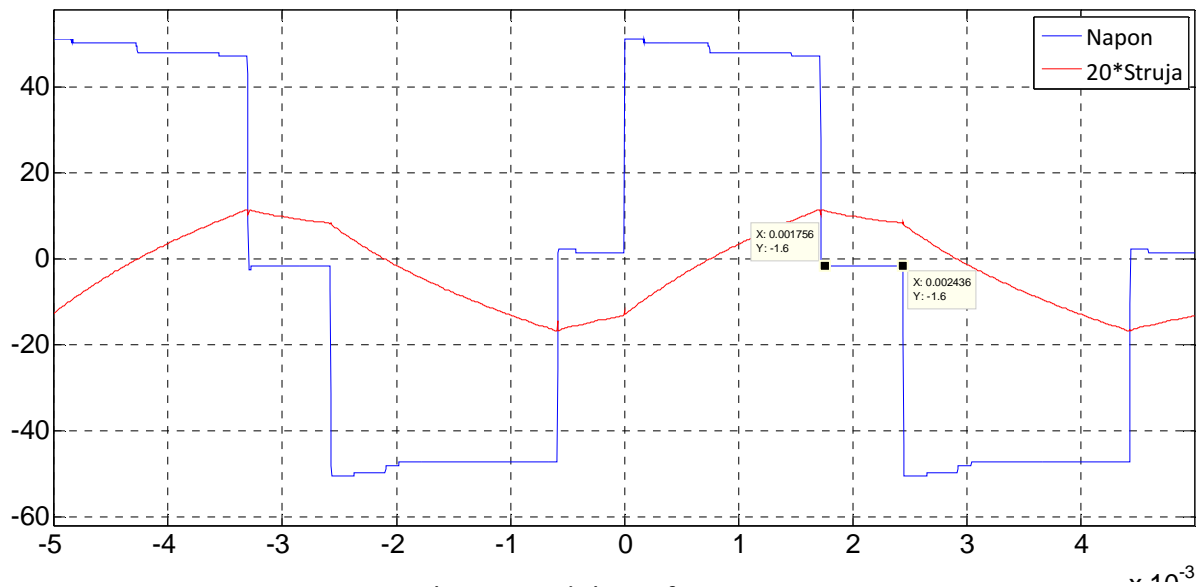
Slika 2.4: pravokutna modulacija,  $f=1000\text{Hz}$ , valni oblici napona i struje trošila

Iz slika 2.2, 2.3 i 2.4 jasno je da frekvencija izlaznog napona direktno ovisi o frekvenciji trokutastog signala nosioca. Također bitno je uočiti da iznos vršne vrijednosti struje pada porastom frekvencije jer su kraća vremena u kojima se induktivitet nabija. Porastom frekvencije smanjuje se valovitost struje ali i rastu sklopni gubici. Valni oblici dobiveni mjerenjem u potpunosti se slažu sa dobivenim simulacijama.

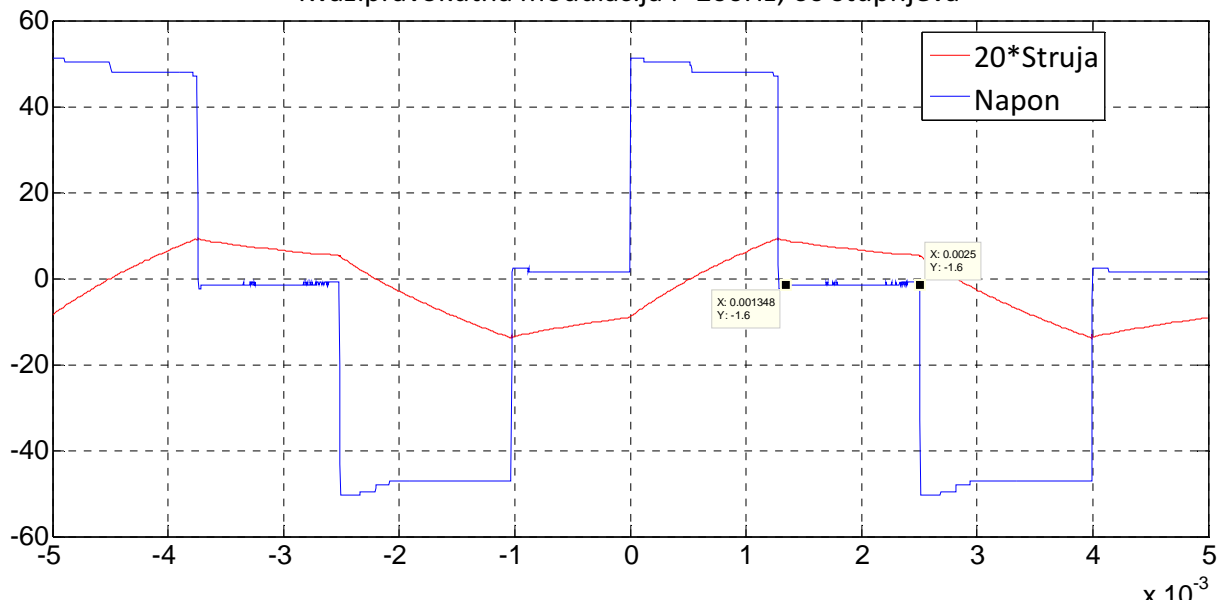


## Kvazipravokutna modulacija:

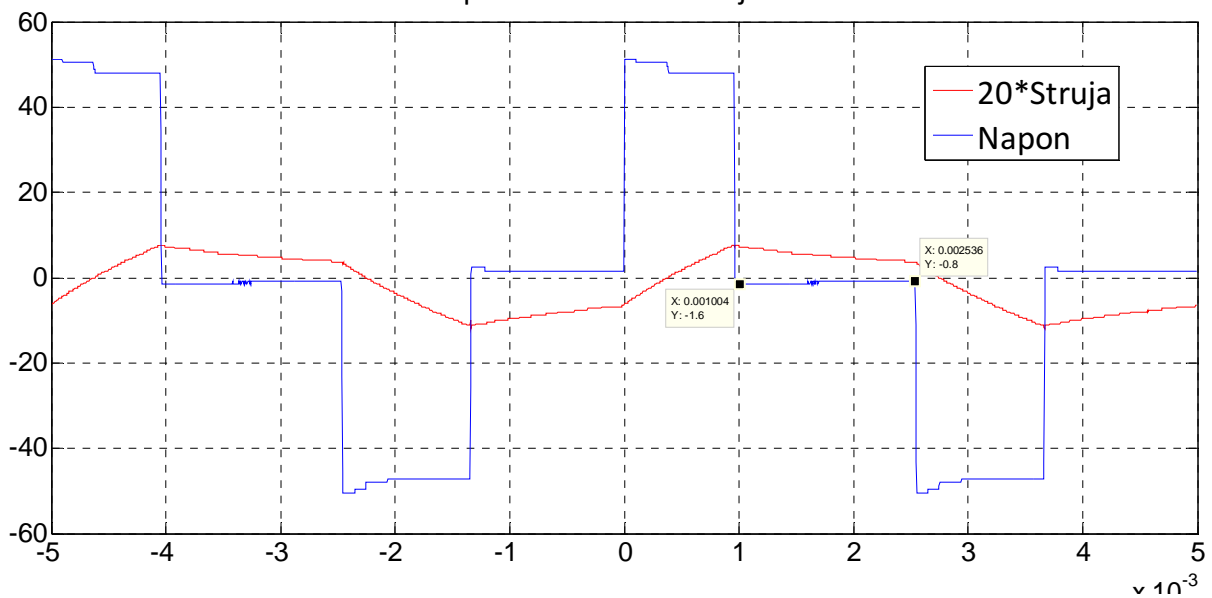
Kvazipravokutna modulacija  $f=200\text{Hz}$ ; 30 stupnjeva



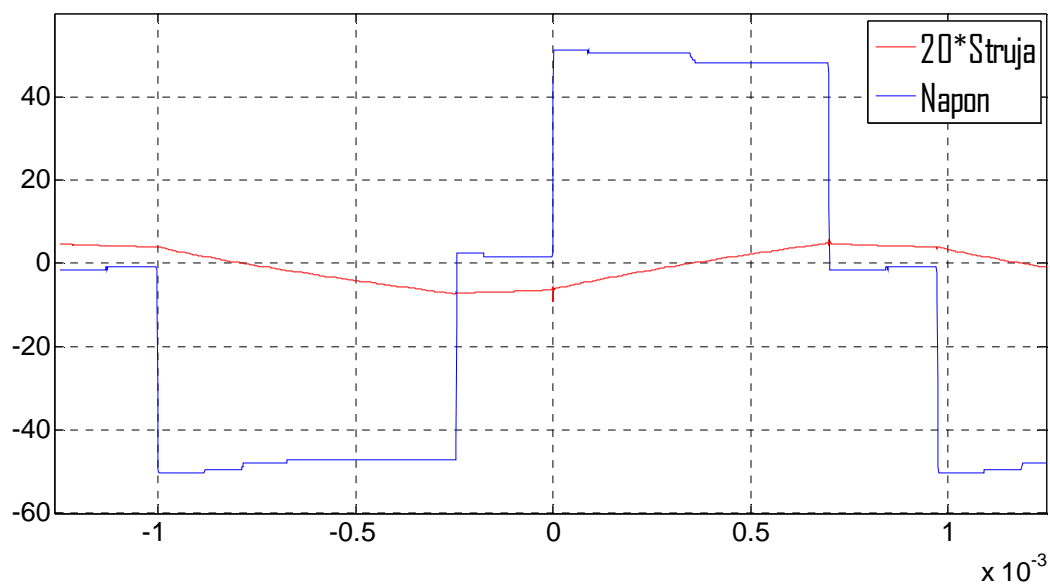
Kvazipravokutna modulacija  $f=200\text{Hz}$ ; 60 stupnjeva



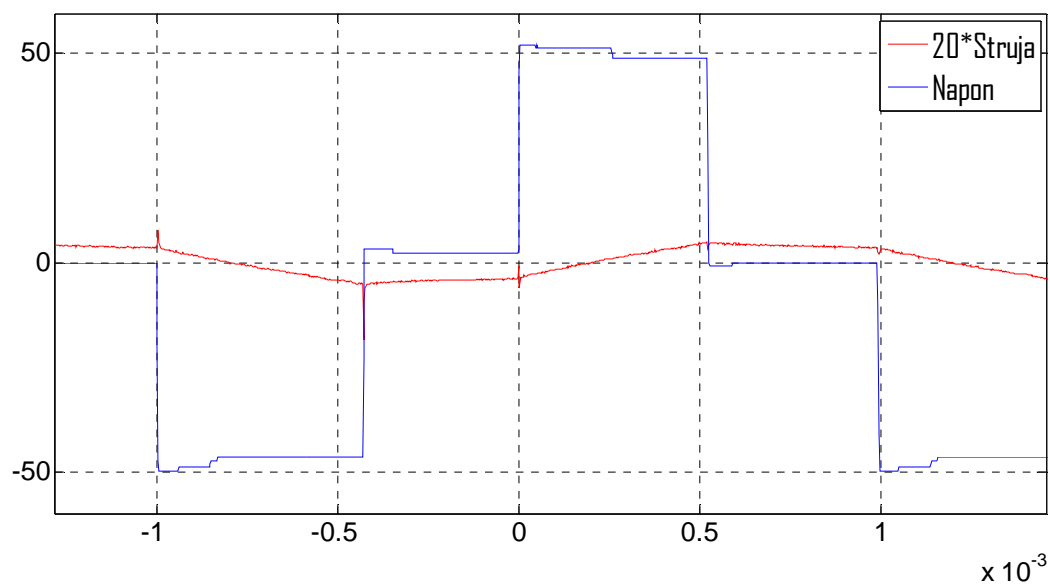
Kvazipravokutna modulacija 200Hz



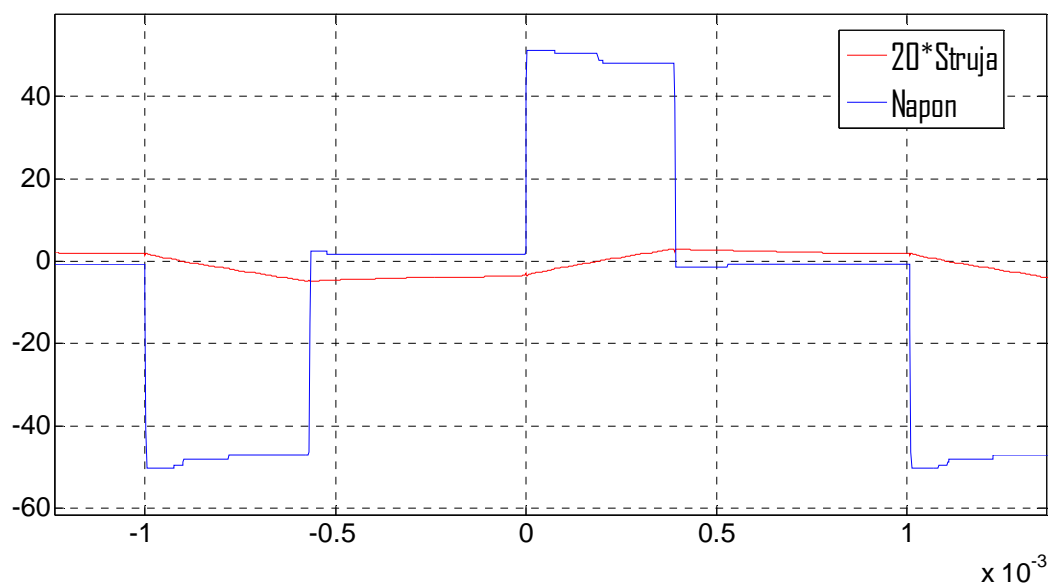
Kvazipravokutna modulacija 500Hz 30 stupnjeva



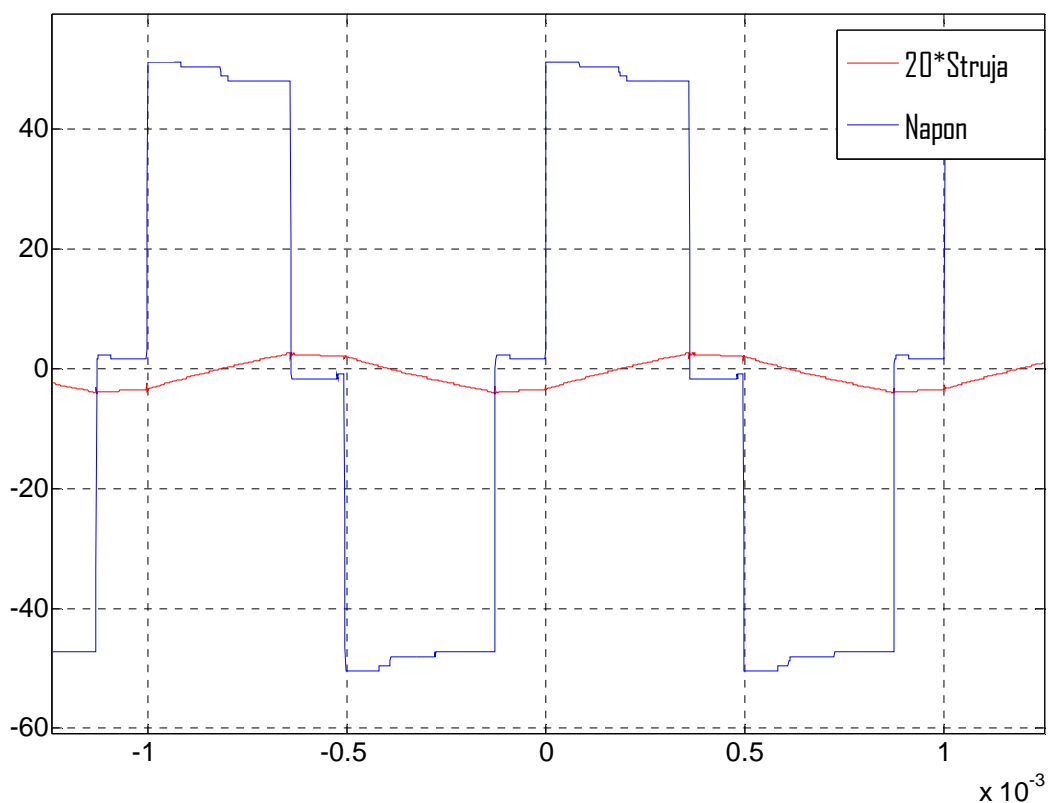
Kvazipravokutna modulacija 500Hz 60 stupnjeva



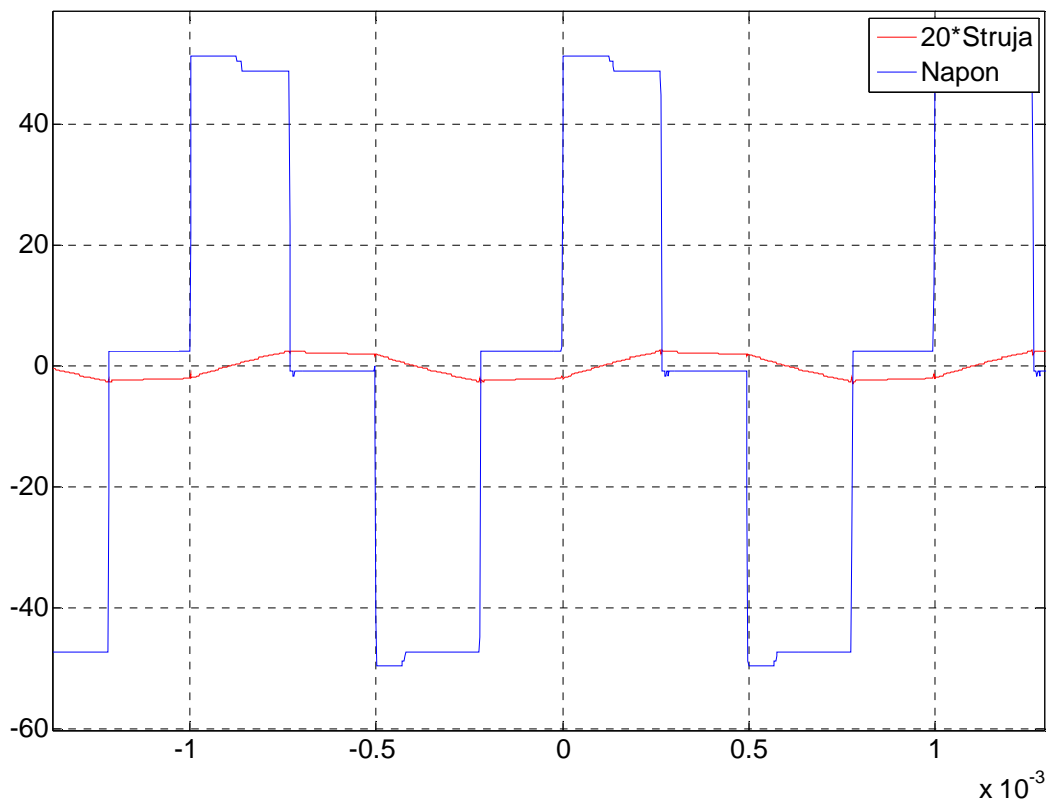
Kvazipravokutna modulacija 500Hz



Kvazipravokutna modulacija 1000Hz 30 st



Kvazipravokutna modulacija 1000Hz 60 st



Može se primjetiti kako struja porastom frekvencije ima sve manje amplitude. Navedena pojava je prethodno objašnjena; na višim frekvencijama kraće je vrijeme kroz koje pojedini par sklopki vodi. Također potvrđeno je da podizanjem frekvencije trokutastog signala raste frekvencija izlaznog napona. Povećanjem kuta (okretanjem potencijometra A+/-) sve su širi intervali u kojima je

napon na trošilu jednak 0. Iako mu to nije svrha vidljivo je da PWM pretvarač upravljao kvazipravokutnom modulacijom daje na trošilu napon koji uzrokuje struju oblikom sličnu sinus.

## 2.2 Pokazna vježba na Danfoss frekvencijskom pretvaraču

Korištena oprema:

- asinkroni motor
- frekvencijski pretvarač
- osciloskop Tektronics Tds 2000, naponska sonda
- strujna kliješta
- zavodski laptop

Nazivni podaci prvog pretvarača: proizvođač Danfoss,  
-napajanje 200-240V trofazno, 50/60Hz, 4.1 A  
- izlazni napon 0-240V trofazno  $f=0-1000\text{Hz}$ ,  $I_{\text{out}}= 4,6\text{A}$   
-snaga: 1.66 kVA  
Temperatura ambijenta  $40\text{C}^{\circ}$

Nazivni podaci drugog pretvarača: proizvođač Danfoss,  
-napajanje 380/500V trofazno, 50/60Hz, 2.2/1.9A  
- izlazni napon 0-380/500V trofazno  $f=0-1000\text{Hz}$ ,  $I_{\text{out}}= 2.4/2.1\text{ A}$   
-snaga: 0.75kW (400V)  
Temperatura ambijenta  $45\text{C}^{\circ}$

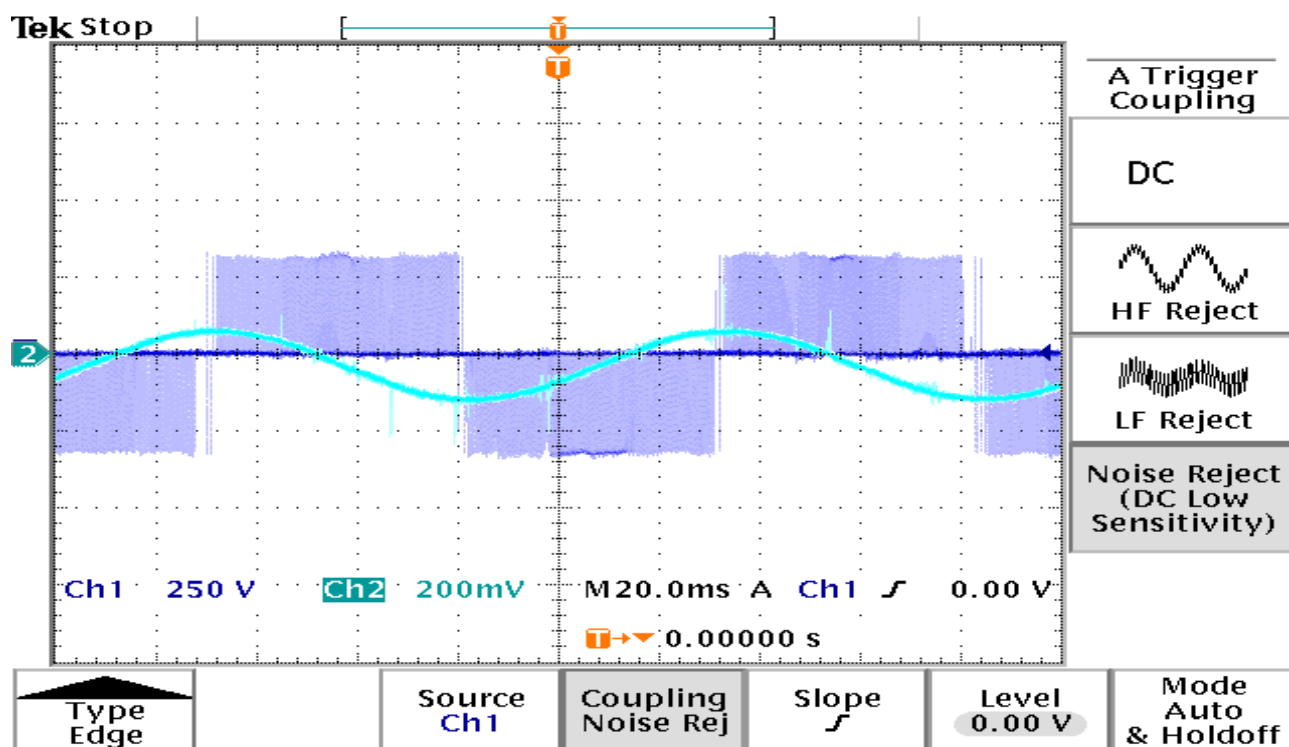
Nazivni podaci korištenog motora: proizvođač Končar,  $U=380\text{V}$ ,  $I_{\text{nazivno}} = 2,8\text{A}$  trofazni,  $f=50\text{Hz}$ ,  $n=1380\text{ min}^{-1}$ ,  $P=1.1\text{kW}$ ,  $\cos\varphi = 0,81$

Vježba je vršena u laboratoriju na dva agregata (spoj pretvarača i motora). Jedan od motora na kojem je vršeno mjerenje na istoj osovinu ima spojen istosmjerni motor koji nije bio pod napajanjem za vrijeme vježbe. Drugi motor na kojem su vršena mjerenja je bio u praznom hodu(neopterećena osovina). Prilikom vježbe cilj je bio potvrditi teoretska razmatranja prema kojima je napon na izlazu pretvarača sastavljen od niza pravokutnih impulsa promjenjivog trajanja, a da zbog induktivnog karaktera motora struja dobije sinusni oblik.

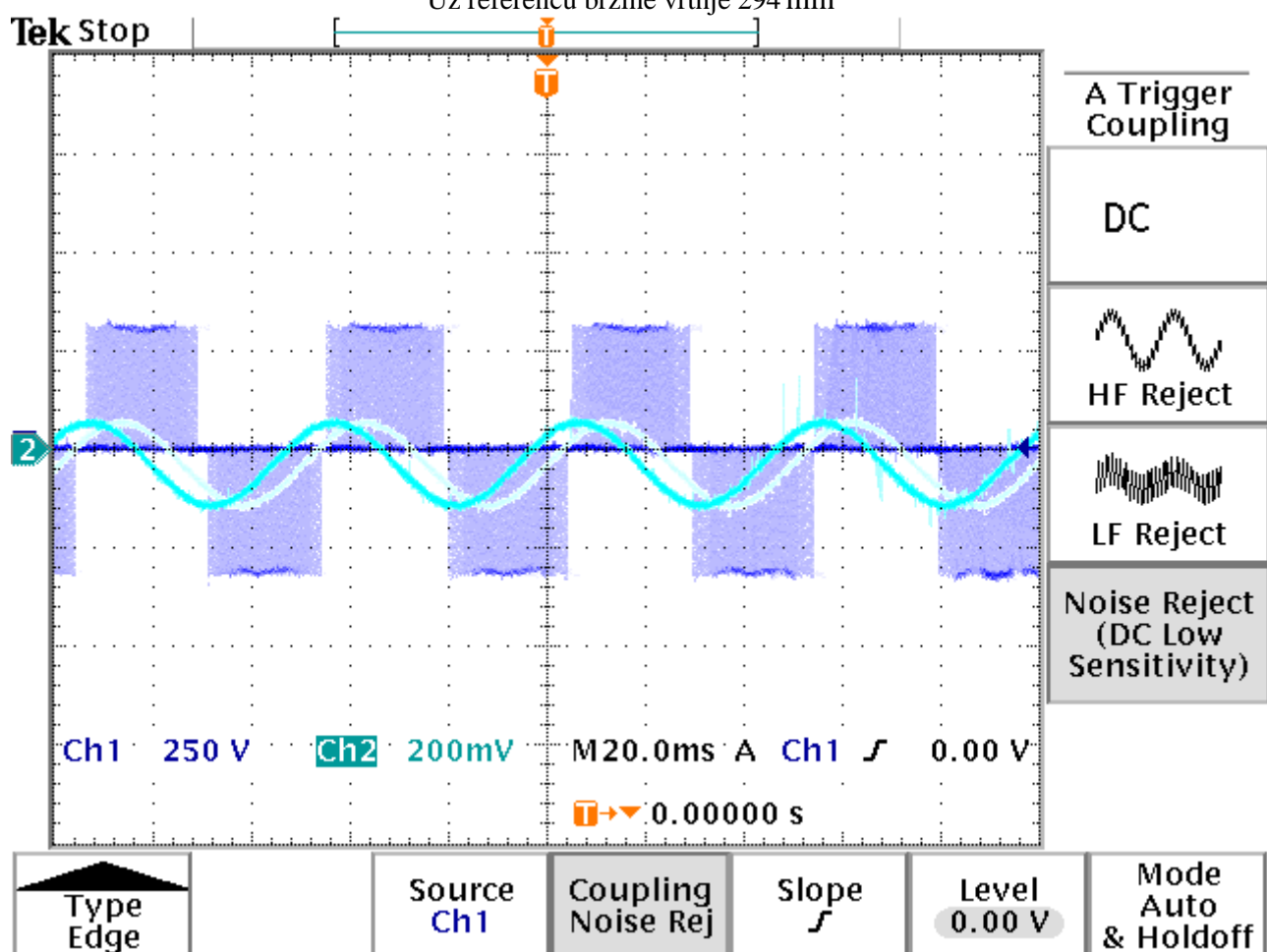
Valni oblici koje je zanimljivo promatrati su struja i napon jedne faze na izlasku iz pretvarača. Zbog plutajuće mase zvjezdista motora prilikom mjerenja nije bilo moguće mjeriti fazni napon pa su na slikama 2.4 i 2.5 prikazani linijski napon između dvije faze na motoru te fazna struja. U spoju zvijezda fazna i linijska struja su jednake.

Fazna struja je mjerena strujnim kliještima. Kliještima je potrebno obuhvatiti vodič u kojem se želi mjeriti struja i priključiti konektor na jedan od ulaza osciloskopa. Kliješta rade na principu elektromagnetske indukcije. Linijski napon je mjereno naponskom sondom.

Referenca brzine je zadavana motoru preko panela na prednjoj strani pretvarača u prvom slučaju te okretanjem potencijometra u drugom slučaju. Prilikom drugog mjerenja bilo je potrebno reverzirati motor te promatrati utjecaj reverziranja motora na valne oblike napona i struje na uzlazu iz pretvarača. Očekivano došlo je do značajnih izobličenja napona i struje. Napon je morao skočiti kako bi potjerao struju većeg iznosa koja pak inducira moment koji zakoči rotor i ponovno ga ubrza na istu referencu brzine vrtnje suprotnom smjeru.



Slika 2.5 prikaz valnih oblika linijskog napona (između dvije faze na motoru) te fazna struja motora  
Uz referencu brzine vrtnje  $294 \text{ min}^{-1}$



Slika 2.6 prikaz valnih oblika linijskog napona (između dvije faze na motoru) te fazna struja motora  
Uz referencu brzine vrtnje  $600 \text{ min}^{-1}$

Analizom valnih oblika na slikama 2.5 i 2.6 te usporedbom sa slikom 1.4 iz seminara vidljivo je da stvarni oblici napona i struje odgovaraju teoretskim razmatranjima. Nizom pravokutnih impulsa koji za osnovni harmonik imaju sinus uzrokuje se sinusna struja u namotima motora. Bitno je primijetiti da povećanjem reference brzine vrtnje motora raste i frekvencija izlaznog napona iz pretvarača. Za na slici 2.4 uz referencu brzine vrtnje  $294 \text{ min}^{-1}$  vidljivo je ugrubo 5 perioda napona dok na je na Slici 2.5 uz duplo veću referencu brzine vrtnje vidljivo ugrubo duplo više perioda napona. Frekvencija napona je udvostručena.

### **Zaključak:**

PWM modulacije i IGBT sklope su bitan dio današnje energetske elektronike. Omogućavaju dobivanje izmjeničnog napona iz istosmjernog što je neophodno za izvedbu frekvencijskih pretvarača. Razvoj svih ovih rješenja doveo je do efikasnije i jednostavnije uporabe asinkronih motora. Postoje razne vrste PWM modulacija. Unipolarna modulacija je bolja u odnosu na bipolarnu jer uzrokuje manju valovitost struje. Kvazipravokutna modulacija za razliku od pravokutne omogućuje poništavanje štetnih harmonika napona. Taj princip primijenjen u naprednijim modulacijama omogućuje stabilniji rad motora. Riječ je naime o neutralizaciji štetnih harmonika napona koji pak uzrokuju parazitne momente i vibracije.