

# Modulacijske tehnike upravljanja trofaznim naponskim izmjenjivačem podržane Tayphoon HIL sustavom

---

Vidošić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:441693>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-21**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

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

**Sveučilišni studij**

**MODULACIJSKE TEHNIKE UPRAVLJANJA  
TROFAZNYM NAPONSKIM IZMJENJIVAČEM  
PODRŽANE TYPHOON HIL SUSTAVOM**

**Diplomski rad**

**Ivan Vidošić**

**Osijek, 2022**

## Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	3
<b>2. PREGLED PODRUČJA TEME ISTRAŽIVANJA</b> .....	4
<b>3. ANALIZA RADA NEUPRAVLJIVOG TROFAZNOG IZMJENJIVAČA U MOSNOM SPOJU</b> .....	5
3.1. Princip rada neupravljivog trofaznog izmjenjivača u mosnom spoju .....	5
<b>4. MODULACIJA PROSTORNOG VEKTORA NAPONA</b> .....	12
4.1. Pojam prostornog vektora .....	12
4.2. Clarkova transformacija .....	13
4.3. Parkova Transformacija .....	14
4.4. Algoritam upravljanja.....	16
4.5. Optimalan redoslijed sklapanja ventila .....	21
<b>5. EMULACIJA UPRAVLJANJA TROFAZNOG IZMJENJIVAČA POMOĆU MIKROKONTROLERA I HIL SUČELJA</b> .....	26
5.1. Arduino mikrokontroler .....	26
5.2. Typhoon HIL.....	27
<b>6. REZULTATI MJERENJA</b> .....	32
6.1. Neupravljivi trofazni izmjenjivač u mosnom spoju .....	32
6.2. Modulacija prostornog vektora.....	37
6.2.1. Izračun vremena vođenja sklopnih stanja.....	38
6.2.2. Rezultati emulacije .....	42
<b>7. ZAKLJUČAK</b> .....	50
Literatura .....	51
Sažetak .....	52
Abstract .....	52
PRILOG 1. Algoritam upravljanja trofaznim neupravljivim izmjenjivačem.....	53
PRILOG 2. Modulacija prostornog vektora Arduino skripta.....	54
PRILOG 3. Matlab skripta za mijenjanje parametara modulacije prostornog vektora .....	57

## 1. UVOD

Prije pojave poluvodičkih komponenata najviše su se u industriji koristili istosmjerni motori unatoč svojim manama kao što su trošenje četkica, kolektor koji je izazivao iskrenje i sl. Zbog jednostavnosti upravljanja brzinom vrtnje. Izmjenični motori u to vrijeme su se uglavnom koristili za zadatke gdje je bila potrebna konstantna brzina vrtnje jer tadašnje tehnike upravljanja su bile vrlo komplicirane i neisplative [1]. Promjena se dogodila pri pojavi prvih poluvodičkih komponenti iz kojih su se razvili razni upravljački sklopovi i tehnike upravljanja. Pa tako, pojavom modulacijskih tehnika upravljanja, a pogotovo sinusne pulсно-širinske modulacije (eng. *Sine pulse-width modulation*, u daljnjem tekstu SPWM) izmjenični motori polako počinju zamjenjivati istosmjerne motore u industriji. SPWM je bila osnova za razvoj naprednijih modulacijskih tehnika koje su smanjile kompleksnost i povećale isplativost primjene izmjeničnih motora. Razvojem izmjenjivača osmišljene su razne vrste modulacija prostornog vektora koje se i danas primjenjuju [2].

Tema ovog rada je emulacija prostorno vektorske modulacije preko Typhoon HIL platforme pri različitim parametrima modulacije. Emulirat će se algoritam upravljanja neupravljivog trofaznog izmjenjivača i modulacija prostornog vektora napona te će se odrediti i analizirati harmonijski sadržaj i kako promjena parametara utječe na harmonijski sadržaj.

U prvom poglavlju je dan uvod u diplomski rad, a drugom poglavlju će biti dan pregled pofručja teme istraživanja.

U trećem poglavlju bit će objašnjena analiza rada trofaznog neupravljivog izmjenjivača u mosnom spoju. Prikazana će biti tablica sklopnih stanja izmjenjivača i načini na koji se mogu odrediti iznosi faznih i linijskih napona te njihovi grafički prikazi po sklopnim stanjima.

U četvrtom poglavlju objasniti će se u teoriji modulacijske tehnike korištene u radu. Dan će biti kratak osvrt na algoritam upravljanja neupravljivog trofaznog izmjenjivača u mosnom spoju nakon koje će detaljno biti objašnjena modulacija prostornog vektora napona kako bi se mogla shvatiti sama modulacija. Određen će biti optimalan redosljed uklapanja ventila za smanjenje gubitaka te izgled upravljačkih signala koji se dovode na ventile.

U petom poglavlju će se prikazati implementacija algoritma i načini spajanja Typhoon HIL uređaja i Arduino pločice.

U šestom poglavlju prikazati će se emulacija algoritma upravljanja neupravljivog trofaznog izmjenjivača u mosnom spoju gdje će se grafički prikazati dobiveni valni oblici te proračuni ukupnog harmonijskog izobličenja napona i struje. Zatim će biti prikazana emulacija modulacije prostornog vektora napona, proračun vremena vođenja ventila za jedan sekstant (dio polarnog dijagrama iznosa  $60^\circ$  el.), bit će prikazani prikazani valni oblici za različite parametre modulacije te izračun ukupnog harmonijskog izobličenja.(eng. *Total Harmonic Distortion*, u daljnjem tekstu *THD*). Na kraju bit će dana usporedba dobivenih rezultata obje modulacije.

## 2. PREGLED PODRUČJA TEME ISTRAŽIVANJA

I. Colak, E. Kabalci, R. Bayindir u knjizi [2] prikazuje prostorne vektora napona koji se ne mogu realizirati na temelju kojih je napisana skripta za MATLAB koja je korištena u ovom diplomskom radu.

Ivan Flegar knjizi [3] upotrebljava oznake i izraze za efektivne vrijednosti faznog i linijskog napona te izraze za prvi harmonik faznog i linijskog napona neupravljivog trofaznog izmjenjivača u mosnom spoju. Također upotrebljene oznake iz knjige za ventile, sklopna stanja, fazni i linijski napon, modulacijski indeks  $m_a$  i modulacijski omjer frekvencija  $m_f$  su korištene u ovom radu .

M. Ugljar u diplomskom radu [4] koristi izraze određivanje maksimalne i minimalne amplitude prostornog vektora, aktivno vrijeme vođenja za sklopna stanja na temelju koji je obavljen proračun vremena vođenja za ovaj diplomski rad.

A. Busse, and J. Holtz u knjizi [5] koriste izraz za rezultatni vektor simetričnog napona.

N. P. Quang, J. A. Dittrich u knjizi [6] objašnjavaju nesavršenost uklapanja ventila i načine za poboljšanje frekvencijskog spektra koji su korišteni u ovom radu.

G. Erceg u knjizi [7] predlaže optimalan obrazac isklapanja i uklapanja ventila na temelju kojeg je napravljen 7-segmentni obrazac uklapanja koji je korišten kao temelj za emulaciju modulacije prostornog vektora napona u ovom diplomskom radu.

Način korištenja Typhoon HIL softvera objašnjen je u dokumentaciji [9].

Raspored pinova i način spajanja Arduino hardvera prikazan je u dokumentu [10].

Korištenje MATLAB-a i funkcija u MATLAB-u objašnjeni su u dokumentu [11].

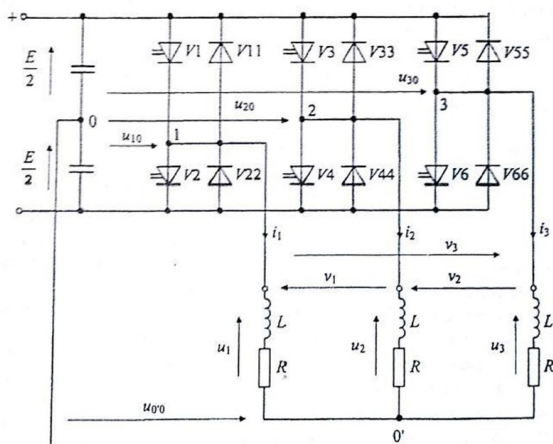
### 3. ANALIZA RADA NEUPRAVLJIVOG TROFAZNOG IZMJENJIVAČA U MOSNOM SPOJU

Izmjenjivači nalaze veliku primjenu u današnjoj industriji. Koriste se u svim izmjeničnim elektromotornim pogonima i u sustavima gdje je potrebno osigurati neprekidno napajanje. Također imaju sve veću primjenu u današnje vrijeme u sustavima obnovljivih izvora energije, električnim automobilima i frekvencijskim pretvaračima. Kako bi se osiguralo da izlazni naponi izmjenjivača budu iste frekvencije i fazno pomaknuti za  $120^\circ$ , potrebno je osmisliti način na koji bi se to ostvarilo.

Ideja je bila da se uzmu tri jednofazna izmjenjivača u mosnom spoju. Ovo rješenje nije bilo praktično jer zahtjeva ili trofazni izlazni transformator ili da svaka faza trošila ima svoje priključke dostupne i odvojene od priključaka drugih faza. Također bi bilo potrebno dovesti dvanaest jednosmjernih naponskih sklopki što bi povećalo značajno gubitke i unošenje viših harmonika u mrežu. Problem se riješio korištenjem tri polumosna spoja priključena na istosmjerni izvor napona  $E$ , gdje svaki polumosni spoj napaja jedno trošilo (Slika 3.1.).

#### 3.1. Princip rada neupravljivog trofaznog izmjenjivača u mosnom spoju

Neupravljivi trofazni izmjenjivač se sastoji od tri neupravljiva polumosna spoja, čiji upravljački signali su međusobno pomaknuti za  $120^\circ$  električno (Slika 3.1. i 3.3.). Svaki polumosni spoj sastoji se od dvije sklopke koje se nalaze u istoj grani. Sklopke su modelirane antiparalelnim spojem upravljivog ventila i idealne diode.



Slika 3.1. Neupravljivi trofazni izmjenjivač u mosnom spoju [3].

Trofazni izmjenjivač sa slike 3.1. ima osam mogućih sklopnih stanja, označenih s brojevima od 1 do 8, gdje je svako sklopno stanje određeno vođenjem/nevođenjem točno određenih upravljivih ventila.

**Tablica 3.1. Sklopna stanja**

Upravljivi ventili	Stanja upravljačkih signala							
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V0	V7
V1	1	1	1	0	0	0	0	1
V3	0	0	1	1	1	0	0	1
V5	1	0	0	0	1	1	0	1
V2	0	0	0	1	1	1	0	0
V4	1	1	0	0	0	1	0	0
V6	0	1	1	1	0	0	0	0

Ventili V1, V3, V5 se još nazivaju ventili gornjeg dijela grane a ventili V2, V4, V6 ventili donjeg dijela grane. Pri svakom sklopnom stanju uvijek vode po dva ventila iz gornjeg dijela ili donjeg dijela grane a jedan iz suprotne grane. Time se sprječava da u istom trenutku vode oba ventila iz iste grane. Sklopna stanja V0 i V7 se ne koriste jer vođenjem svih ventila iz gornjeg dijela ili donjeg dijela grane dolazi do kratkog spoja na trošilu [3].

Ranije navedena potreba da se osigura trofazni napon koji je međusobno pomaknut za  $120^\circ$  el. je postignuta preko upravljačkih signala koji se dovode na upravljive ventile trofaznog izmjenjivača što je vrlo jednostavno za izvesti i objasniti. U jednoj periodi vođenja na izmjenjivaču se promjeni šest sklopnih stanja a pošto jedna perioda traje  $360^\circ$  el. svako sklopno stanje pokriva točno  $60^\circ$  el. odnosno šestinu periode. Kako bi se ostvario trofazni napon na trošilu, potrebno je dovesti upravljačke signale na upravljive ventile kako bi se postigao fazni pomak između pojedinih faza od  $120^\circ$  el. Prema [1] to se i postiglo, te za upravljive ventile vrijedi:

$$x_{v3}(\omega t) = x_{v1}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad ; \quad x_{v5}(\omega t) = x_{v1}\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (3-1)$$

gdje  $x_{vn}$  označava stanje ventila. Ako ventil vodi, dodjeljuje mu se vrijednost 1 a ako ne vodi dodjeljuje mu se vrijednost 0, dok  $n$  označava o kojem se ventilu radi. Također potrebno je osigurati da su ventili u pojedinoj grani upravljani protutaktno, tj. vrijedi:

$$x_{v2} = 1 - x_{v1} \quad ; \quad x_{v4} = 1 - x_{v3} \quad ; \quad x_{v6} = 1 - x_{v5} \quad (3-2)$$

Svaki ventil u jednoj periodi vodi točno  $120^\circ$  el. Zbog toga se ova vrsta naziva algoritam upravljanja od  $120^\circ$  el. Postoji i algoritam upravljanja od  $180^\circ$  el gdje svaki ventil vodi pola jedne periode. Međutim, ta metoda ima problem preklapanja uključivanja i isključivanja ventila u istoj grani. Naime, kada jedan ventil u jednoj grani isklapa, u istom trenutku drugi ventil u istoj toj grani uklapa. Elektroničke komponente u stvarnosti nisu idealne jer je potrebno neko određeno vrijeme da ventili isklope ili uklope (tzv. mrtvo vrijeme). Također dolazi i do kašnjenja u generiranju upravljačkih impulsa što dovodi do istodobnog vođenja u istoj grani te uzrokuje kratki spoj. U algoritmu upravljanja od  $120^\circ$  el. tog problema nema jer ventili u svakoj grani se nakon isklapanja tek ponovo uključe za  $60^\circ$  el. te nikada neće doći preklapanja. Za napajanje samog izmjenjivača koristi se istosmjerni naponski izvor iznosa  $E$ , a trošilo se modelira kao tri impedancije spojene u zvijezdu od koje se svaka sastoji od serijskog spoja radnog otpora i induktiviteta, jer u praksi trofazni izmjenjivači napajaju asinkrone motore koji su radno-induktivna trošila. Iznos i oblik linijskog i faznog napona može se odrediti preko upravljačkih signala. Fazni naponi trošila jednaki su naponu priključka trošila i uz pretpostavku da su upravljački impulsi međusobno pomaknuti za  $120^\circ$  el. pa vrijedi:

$$u_{10} = E \left( x_{v1} - \frac{1}{2} \right) \quad u_{20} = E \left( x_{v3} - \frac{1}{2} \right) \quad u_{30} = E \left( x_{v5} - \frac{1}{2} \right) \quad (3-3)$$

dok se međufazni naponi izražavaju kao [3]:

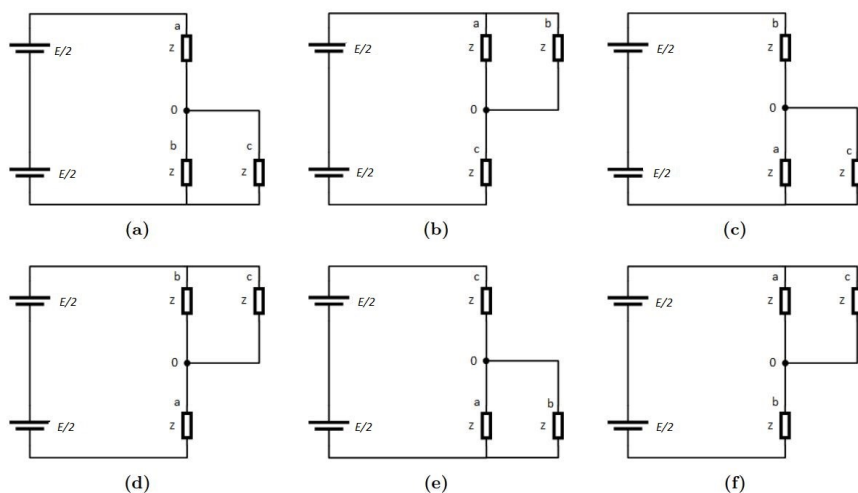
$$\begin{aligned} v_1 &= u_1 - u_2 = u_{10} - u_{20} = E(x_{v1} - x_{v3}) \\ v_2 &= u_2 - u_3 = u_{20} - u_{30} = E(x_{v3} - x_{v5}) \\ v_3 &= u_3 - u_1 = u_{30} - u_{10} = E(x_{v5} - x_{v1}) \end{aligned} \quad (3-4)$$

Fazni naponi se također mogu izraziti pomoću upravljačkih signala pa vrijedi [3]:

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{E}{3}(2x_{v1} - x_{v3} - x_{v5}) \\ u_2 &= \frac{E}{3}(2x_{v3} - x_{v1} - x_{v5}) \\ u_3 &= \frac{E}{3}(2x_{v5} - x_{v1} - x_{v3}) \end{aligned} \quad (3-5)$$

Drugi način na koji se može odrediti oblik i iznos linijskog i faznog napona je pomoću nadomjesne sheme trošila za svako sklopno stanje (Slika 3.2) [4].





**Slika 3.2.** Nadomjesne sheme trošila svih šest sklopnih stanja neupravljivog izmjenjivača a) prvo sklopno stanje, b) drugo sklopno stanje, c) treće sklopno stanje, d) četvrto sklopno stanje, e) peto sklopno stanje, f) šesto sklopno stanje

Iz slike 3.2. se vidi da u svakom sklopnom stanju su trošila dvije faze spojena u paralelu dok je trošilo treće faze spojeno u seriju s ostale dvije faze.

Uzme li se da je fazni napon trošila između faze i nule trošila, a linijski napon kao razlika faznih napona dobiva se izraz:

$$\begin{aligned}
 v_1 &= u_a - u_{20} \\
 v_2 &= u_{20} - u_{30} \\
 v_3 &= u_{30} - u_{10}
 \end{aligned}
 \tag{3-6}$$

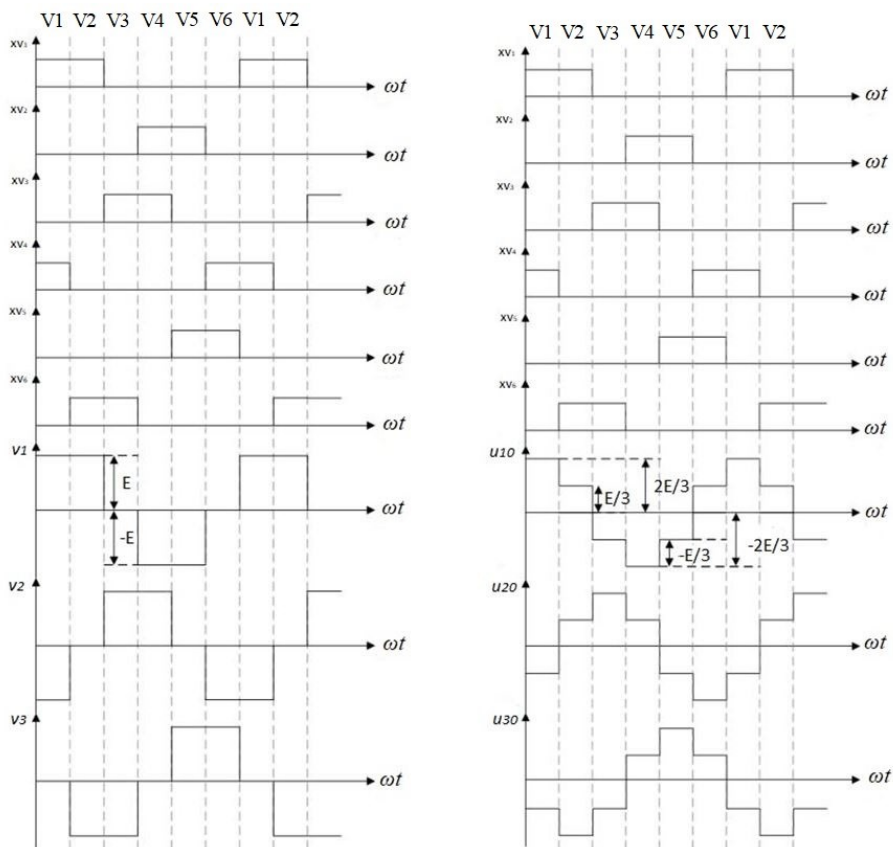
Tablica 3.1. prikazuje izraze za određivanje iznosa svih faznih i linijskih napona za sva sklopna stanja

**Tablica 3.2.** Ovisnost faznih i linijskih napona o sklopnome stanju

Sklopno stanje	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$U_{10}$	$U_{20}$	$U_{30}$
V1	$-\frac{2}{3}E$	$-\frac{E}{3}$	$-\frac{E}{3}$	$E$	$0$	$-E$
V2	$\frac{E}{3}$	$\frac{E}{3}$	$\frac{2}{3}E$	$0$	$E$	$-E$
V3	$-\frac{E}{3}$	$\frac{2}{3}E$	$\frac{E}{3}$	$-E$	$E$	$0$

V4	$-\frac{2}{3}E$	$\frac{E}{3}$	$\frac{E}{3}$	$-E$	0	$-E$
V5	$-\frac{E}{3}$	$-\frac{E}{3}$	$\frac{2}{3}E$	0	$-E$	$E$
V6	$-\frac{E}{3}$	$-\frac{2}{3}E$	$\frac{E}{3}$	$E$	$-E$	0

Prema tablici 3.2. mogu se nacrtati svi valni oblici napona za sva sklopna stanja. Linijski naponi su označeni kao  $v_1, v_2$  i  $v_3$ , a  $u_{10}, u_{20},$  i  $u_{30}$  su naponi između nulišta izvora i pojedine faze.



Slika 3.3. Izlazni linijski (lijevo) i fazni (desno) naponi trofaznog neupravljivog izmjenjivača u mosnom spoju

Prema [3], efektivna vrijednost faznog  $U$  i linijskog  $V$  napona (Slika 3.3) iznosi:

$$U = \frac{\sqrt{2}}{3} E \quad (3-7)$$

$$V = E \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (3-8)$$

Prvi harmonik faznog  $U(1)$  i linijskog  $V(1)$  napona prema [3] iznose:

$$U(1) = E \frac{\sqrt{2}}{\pi} \quad (3-9)$$

$$V(1) = E \frac{\sqrt{6}}{\pi} \quad (3-10)$$

Preko dobivene efektivne vrijednosti i iznosa prvog harmonika faznog napona  $U(1)$  može se izračunati ukupno harmonijsko izobličenje faznog napona prema izrazu:

$$THDU = \sqrt{\frac{U^2}{U(1)^2} - 1} \quad (3-11)$$

S obzirom da je asinkroni motor simetrično trošilo, odnosno vrijedi da je zbroj sva tri fazna napona jednak nuli (nema pojave nulte komponente napona) tada će to isto vrijediti i za osnovne harmonike faznih i linijski napona. Zaključuje se da će i harmonici tada tvoriti trofazni simetrični sustav, pa će za efektivnu vrijednost osnovnog harmonika faznog napona vrijediti [3]:

$$U_i(1) = \frac{U_{ij}(1)}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2}}{3} E \quad (3-12)$$

Sva tri fazna i linijska napona sa slike 3.3. mogu se rastaviti u Fourierov red. Prema [4], naponi koji su diskretni se rastavljaju u Fourierov red i dobija se:

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{2E}{\pi} \left[ \frac{1}{k} \cos(k\omega t) \right] \\ V_2 &= \frac{2E}{\pi} \left[ \frac{1}{k} \cos\left(k\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \right] \\ V_3 &= \frac{2E}{\pi} \left[ \frac{1}{k} \cos\left(k\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \right] \end{aligned} \quad (3-13)$$

a rastav linijskih napona na Fourierov red prema [4]:

$$\begin{aligned}
 u_{10} &= \frac{2E}{\pi\sqrt{3}} \left[ \frac{1}{k} \cos(k\omega t) \right] \\
 u_{20} &= \frac{2E}{\pi\sqrt{3}} \left[ \frac{1}{k} \cos\left(k\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \right] \\
 u_{30} &= \frac{2E}{\pi\sqrt{3}} \left[ \frac{1}{k} \cos\left(k\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)\right) \right]
 \end{aligned}
 \tag{3-14}$$

$$k = 6n \pm 1$$

gdje se  $n$  definira kao red harmonika koji se javljaju u izlaznom naponu trofaznog izmjenjivača u mosnom spoju, a  $k$  je cijeli broj. Svako sklopno stanje trofaznog izmjenjivača u mosnom spoju može se prikazati kao prostorni vektor. Ovo je osnovno polazište modulacije prostornog vektora napona. U nastavku biti će objašnjen pojam prostornog vektora, kao i njegov kompleksni oblik do kojeg se dolazi upotrebom Clarkove i Parkove transformacije

## 4. MODULACIJA PROSTORNOG VEKTORA NAPONA

Iako ima šest upravljačkih signala, proizvoljnim postavljanjem jednog signala automatski se definiraju i ostali upravljački signali, jer se mora osigurati simetrični trofazni napon na izlazu izmjenjivača. Zbog toga, osmišljen je pristup na temelju kojeg se mosni spoj ne gleda kao skup tri poluosna spoja već kao jedna cjelina, gdje su tri fazna napona na trošilu prikazani jednim vektorom odnosno prostornim vektorom [3]. U nastavku će se objasniti pojam prostornog vektora i način upravljanja izmjenjivačem modulacijom prostornog vektora.

### 4.1. Pojam prostornog vektora

Tri nezavisna fazna napona mogu se vizualizirati kao komponente trodimenzionalnog prostornog vektora u trodimenzionalnom ortogonalnom prostoru. Projekcije tog vektora na tri ortogonalne osi daju trenutne vrijednosti tri fazna napona. U praksi, izmjenjivač u trofaznom mosnom spoju napaja izmjenične motore koji su simetrična trošila. Zbog toga će zbroj faznih napona biti jednak nuli:

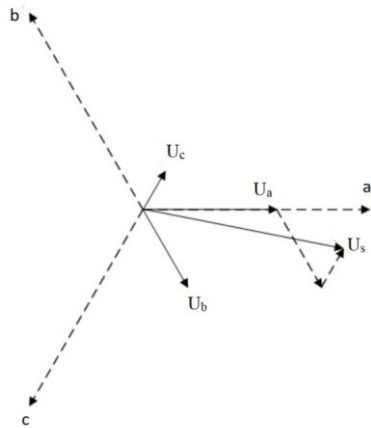
$$u_a + u_b + u_c = 0 \quad (4-1)$$

Iz prethodnog izraza može se zaključiti da, prebaci li se jedan od napona na drugu stranu jednadžbe, dva napona se mogu nezavisno odrediti, dok je treći napon određen drugim dva [3]:

$$u_c = -(u_a + u_b) \quad (4-2)$$

Prostorni vektor je funkcija vremena i ujedno grafički prikaz sve tri fazne veličine. U trofazni koordinatni sustav s osima a, b i c ucrtaju se pripadajući jedinični vektori  $\vec{u}_a$ ,  $\vec{u}_b$  i  $\vec{u}_c$ . Tada vrijedi da svaki vektor koji se nalazi u definiranom koordinatnom sustavu se može zapisati kao linearna kombinacija ta tri jedinična vektora (Slika 4.1). Rezultanti vektor se onda definira kao zbroj njegovih komponenti [5]:

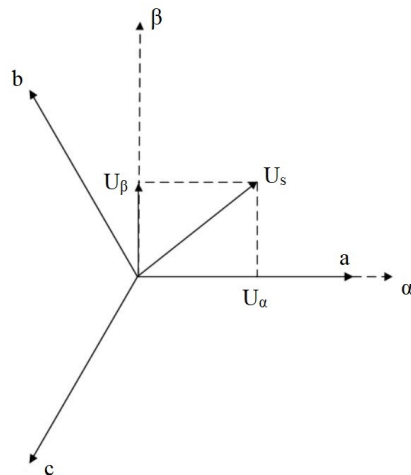
$$\vec{u}_s = \frac{2}{3}(\vec{u}_a + \vec{u}_b + \vec{u}_c) \quad (4-3)$$



Slika 4.1. Prostorni vektor u troosnom koordinatnom sustavu

#### 4.2. Clarkova transformacija

Prema (4-2) zaključuje se da je prostorni vektor napona  $\vec{u}_s$  u potpunosti određen dvama nezavisnim faznim naponima. Uvođenjem Clarkove transformacije, rotirajući troosni koordinatni sustav se transformira u mirujući dvoosni koordinatni sustav. Na slici 4.1. ucrtana se dvoosni  $\alpha - \beta$  sustav tako da,  $\alpha$  os se preklapa s a-osi, dok je  $\beta$  os pomaknuta za  $90^\circ$  obrnuto od smjera kazaljke na satu od  $\alpha$  osi kao što je prikazano na slici 4.2.



Slika 4.2. Dvoosni koordinatni sustav dobiven Clarkovom transformacijom

S obzirom na to da su komponente rezultantnog vektora međusobno pomaknute za  $120^\circ$  mogu se zapisati pomoću Steinmetzovog operatora  $\hat{a}$  koji se definira kao:

$$\hat{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4-4)$$

ako se svaki napon prikaže pomoću Steinmetzovog operatora  $\hat{a}$  dobivaju se izrazi:

$$\begin{aligned} \vec{u}_a &= u_a \\ \vec{u}_b &= u_b \hat{a} = u_b \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ \vec{u}_c &= u_c \hat{a}^2 = u_c \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \end{aligned} \quad (4-5)$$

Pomnoži li se druga jednadžba s  $\hat{a}$ , a treća s  $\hat{a}^2$ , tada je prostorni vektor jednak:

$$\vec{u} = \frac{2}{3}(u_a + \hat{a}u_b - \hat{a}^2u_c) \quad (4-6)$$

odnosno raspisivanjem se dobije:

$$u = \frac{2}{3} \left[ u_a - \frac{1}{2}(u_b + u_c) + j\frac{\sqrt{3}}{2}(u_b - u_c) \right] \quad (4-7)$$

Pretpostavkom da je  $\alpha$  realna os a  $\beta$  imaginarna os, rastavljanjem jednadžbe (4-7) na realni i imaginarni dio dobije se zapis u matičnom obliku.

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

Sada se vektor  $\vec{u}_s$  u dvoosnom sutavu može zapisati kao:

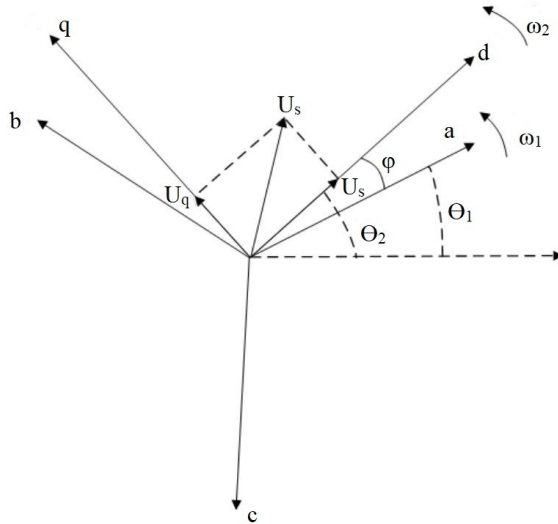
$$\vec{u}_s = u_\alpha + ju_\beta \quad (4-9)$$

Uvođenjem konstante  $2/3$  prema [8] očuvana je amplituda odnosno vršna vrijednost transformirane veličine rezultantnog vektora, pa će dvofazni sustav imati u tom slučaju jednake impedancije kao i trofazni sustav.

### 4.3. Parkova Transformacija

Transformacija trofaznog koordinatnog sustava  $a, b, c$  koji rotira brzinom  $\omega_1$  u dvofazni  $d - q$  koordinatni sustav koji može mirovati ili rotirati proizvoljnom brzinom  $\omega_2$  naziva se Parkova transformacija. Prema [8] kut između  $abc$  koordinatnog sustava i  $d - q$  je kut  $\varphi$ , kut koji  $d$  os zatvara s zamišljenom referentnom osi je  $\theta_1$ , a kut koji  $q$  os zatvara s zamišljenom referentnom osi je  $\theta_2$ . Parkova transformacija je prikazana na slici 4.3.

S obzirom da se svako sklopno stanje trofaznog izmjenjivača u mosnom spoju može prikazati prostornim vektorom te da je to osnova modulacije prostornog vektora, u nastavku će biti objašnjen pojam prostornog vektora, kao i njegov kompleksni oblik do kojeg se dolazi pomoću Clarkove i Parkove transformacije.



**Slika 4.3.** Dvoosni koordinatni sustav dobiven Parkovom transformacijom

Prema slici 4.3 kut  $\varphi$  se definira kao:

$$\varphi = \theta_1 - \theta_2 \quad (4-10)$$

a brzine vrtnje koordinatnih sustava su:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{d\theta_1}{dt} \\ \omega_2 &= \frac{d\theta_2}{dt} \end{aligned} \quad (4-11)$$

Kao i za Clarkovu transformaciju, raspisivanje komponente  $\vec{u}_s$  u  $abc$  sustavu u kompleksnom obliku i uvrštavanjem u izraze (4-3), (4-4) i (4-5) dobije se:

$$\begin{aligned} \vec{u}_s = \frac{2}{3} [ & u_a (\cos\varphi + j\sin\varphi) + u_b \left( \cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) + j\sin\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \right) \\ & + u_c \left( \cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) + j\sin\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \right) ] \end{aligned} \quad (4-12)$$



Rastavi li se gornja jednadžba na realni i imaginarni dio i zapiše li se u matricnom obliku dobije se izraz za Parkovu transformaciju:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\varphi & -\sin\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (4-13)$$

Iz prijašnje jednadžbe mogu se odrediti ortogonalne komponente prostornog vektora:

$$u_d = \frac{2}{3} \left[ u_a - \frac{1}{2}(u_b + u_c) \right] \quad (4-14)$$

$$u_q = \frac{1}{\sqrt{3}}(u_b - u_c) \quad (4-15)$$

Pošto se traži prostorni vektor faznih napona, napon trofaznog simetričnog sustava može se zapisati na ovaj način:

$$u_j = U \sin \left[ \omega t - (j-1) \frac{2\pi}{3} \right] \quad j = 1, 2, 3 \quad (4-16)$$

a ortogonalne komponente trofaznog simetričnog sustava onda glase:

$$u_d = U \sin \omega t \quad (4-17)$$

$$u_q = -U \cos \omega t \quad (4-18)$$

te se prostorni vektor napona može prikazati u obliku

$$\mathbf{u} = u_d + u_q = -jU e^{j\omega t} \quad (4-19)$$

Iz ovoga se zaključuje da vektor napona s ishodištem koordinatnog sustava  $(u_d, u_q)$  u  $d, q$  ravnini rotira konstantnom brzinom  $\omega$ , suprotno od smjera kazaljke na satu. Duljina prostornog vektora je stalna pa će vektor u jednoj periodi rada  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  opisati punu kružnicu.

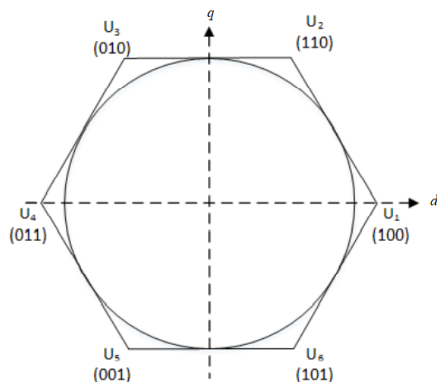
Ova logika se primjenjuje kod modulacije prostornog vektora napona gdje će se rezultantni prostorni vektor napona definirati kao prostorni vektor u  $d, q$  koordinatnom sustavu koji rotira konstantnom brzinom jednake amplitude.

#### 4.4. Algoritam upravljanja

Korištenjem izraza (3-5) i (4-17) dobivene su ortogonalne komponente prostornog vektora napona neupravljivog izmjenjivača [3]:

$$\begin{aligned} u_d &= \frac{E}{3}(2x_{v1} - x_{v3} - x_{v5}) \\ u_q &= \frac{E}{\sqrt{3}}(x_{v3} - x_{v5}) \end{aligned} \quad (4-20)$$

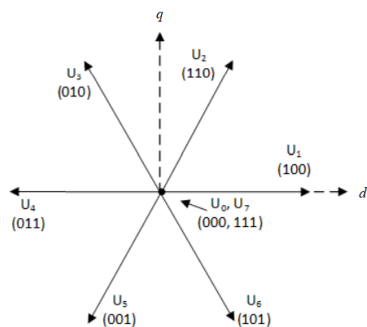
Iz valnih oblika ortogonalnih komponenata može se nacrtati pripadni polarni dijagram u obliku pravilnog šesterokuta prikazanog na slici 4.4.



Slika 4.4. Polarni dijagram svih šest sklopnih stanja [4]

Iz slike 4.4. se vidi da svaki prostorni vektor napona predstavlja jedan položaj odgovarajućeg kuta i amplitude. Predstave li se vrhovi šesterokuta sklopnim stanjima prostornog vektora, tada ti vektori dijele  $d-q$  ravninu na šest jednakih dijelova koji se nazivaju sektanti ili sektori gdje svaki sektant ima iznos od  $60^\circ$  el .

Svaki sektant se nalazi između dva sklopna stanja koji se označavaju s binarnim brojevima u zagradi. Uzeto je da znamenke predstavljaju ventile koji trebaju voditi kako bi se odredilo o kojem se sklopnom stanju radi. Prva znamenka predstavlja ventil  $V1$ , druga znamenka ventil  $V3$  i treća ventil  $V5$  dok su sklopna stanja ventila  $V2$ ,  $V4$  i  $V6$  komplementarna stanjima ventila  $V1$ ,  $V3$  i  $V5$ . Vektori  $U_0$  i  $U_7$  su nul-vektori i oni se realiziraju kada svi ventili iz donjeg ili gornjeg dijela grane vode, odnosno dolazi do kratkog spoja faza trošila (Slika 4.5).



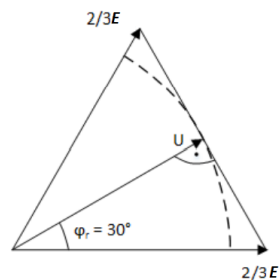
Slika 4.5. Položaj prostornih vektora

Postoje ipak određena ograničenja modulacije prostornog vektora koja se moraju uzeti u obzir. Jedna od njih je ograničenje maksimalne amplitude napona uz uvjet da je  $m_a \leq 1$ . Amplitudni modulacijski indeks  $m_a$  u pulsno-širinskoj modulaciji se definira kao omjer vršne vrijednosti referentnog signala i vršne vrijednosti signala nosioca [3].

$$m_a = \frac{\hat{U}_r}{\hat{U}_{r,M}} \quad (4-21)$$

Gdje je  $\hat{U}_r$ -referentni napon, a  $\hat{U}_{r,M}$  maksimalna amplituda referentnog napona.

Kod modulacije prostornog vektora napona,  $m_a$  će predstavljati omjer dobivene amplitude prostornog vektora napona i maksimalne vršne vrijednosti napona upisane kružnice šesterokuta. Iz slike 4.6. se vidi da vektor napona opisuje kružnicu određenog polumjera. Polumjer te kružnice predstavlja maksimalnu amplitudu napona prostornog vektora. Vrhovi tih vektora sjedaju u kutove šesterokuta, odnosno radi se o upisanoj kružnici šesterokuta prema slici 4.4. Kružnica koja upisuje šesterokut predstavlja modul maksimalnog iznosa prostornog vektora napona  $U$ . U ovome slučaju iznos modulacijskog indeksa iznosi  $m_a=1$ . Pri određivanju maksimalne amplitude napona uzet je prvi sekstant te je preko njega prikazana maksimalna amplituda prostornog vektora napona prema slici 4.6.:

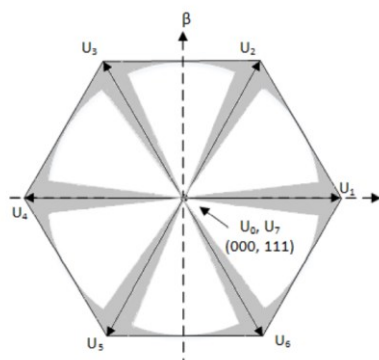


**Slika 4.6.** Prikaz maksimalne amplitude napona

Maksimalna amplituda napona može odrediti preko Pitagorinog poučka prema sl. 4.6.:

$$U = \frac{2}{3}E \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = \frac{\sqrt{3}}{3}E \quad (4-22)$$

Drugo ograničenje je vrijeme vođenja ventila koja se mogu realizirati. Kako je već ranije navedeno, realizacija idealnih ventila u praksi nije moguća, odnosno ne postoji ventil koji će trenutno uklopiti i iskllopiti, već im za to treba neko određeno vrijeme [6]. Oba ograničenja su prikazana na slici 4.7. gdje su sivom bojom označeni prostorni vektori napona koje je nemoguće realizirati dok su bijelom oni koji su izvedivi u praksi.

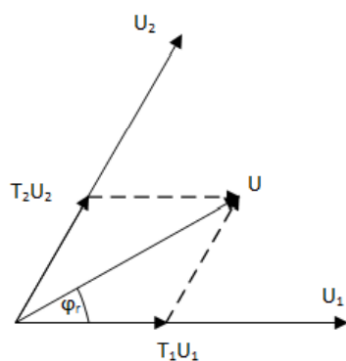


**Slika 4.7.** Prikaz položaja prostornih vektora napona koje se ne mogu realizirati [2]

Promatranjem prvog sekstanta na slici 4.8. koji je omeđen vektorima  $U_1$  i  $U_2$  određuje se rezultantni ili referentni vektor napona  $\vec{u}(t)$ . Za prvi sekstant, položaj rezultantnog vektora  $u(t)$  definiran je sklopnim stanjima  $V_1$  i  $V_2$ , dok je amplituda definirana nul-vektorima  $U_0$  i/ili  $U_7$ . O idealnom redosljedju sklapanja ventila za određene sekstante biti će rečeno nešto više kasnije. U slučaju kada nul-vektori iznose 0 tada vektorski zbroj vektora  $U_1$  i  $U_2$  je konstantan te se rezultantni ili referentni vektor određuje prema [4]:

$$UT_s = \sum_{i=1}^2 U_i T_i \quad (4-23)$$

gdje su:  $U$  - rezultantni ili referentni vektor,  $T_s$  - sklopni period,  $U_i$  - aktivni vektor, a  $T_i$  - vrijeme koje određuje koliko će pojedini vektor biti aktivan. Aktivna vremena pojedinih vektora ili vremena vođenja se određuju prema slici 4.8.



**Slika 4.8** Određivanje vremena vođenja pojedinih sklopnih stanja za prvi sekstant

Aktivno vrijeme svakog vektora se računski može odrediti prema [4]:

$$\begin{aligned}\frac{T_1}{T_s} &= \frac{3}{\sqrt{3}} \frac{|U|}{E} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \varphi_r\right) \\ \frac{T_2}{T_s} &= \frac{3}{\sqrt{3}} \frac{|U|}{E} \sin(\varphi_r) \\ T_s &= \sum_{i=0}^2 t_i\end{aligned}\quad (4-24)$$

gdje su:  $|U|$  - amplituda vektora napona,  $E$  - napon istosmjernog izvora, a  $\varphi_r$  - kut koji rezultantni vektor zatvara s realnom osi  $d$ - $q$  sustava. Poopćenjem prethodne jednadžbe može se odrediti rezultantni vektor za svaki sekstant:

$$\begin{aligned}\frac{T_1}{T_s} &= \frac{3}{\sqrt{3}} \frac{|U|}{E} \sin\left(k\frac{\pi}{3} - \varphi_r\right) \\ \frac{T_2}{T_s} &= \frac{3}{\sqrt{3}} \frac{|U|}{E} \sin\left(\varphi_r - (k-1)\frac{\pi}{3}\right) \quad k = 1,2,3,4,5,6 \\ T_s &= t_0 + t_k - t_{k-1}\end{aligned}\quad (4-25)$$

gdje  $k$  predstavlja broj sekstanta u kojemu se rezultantni vektor trenutno nalazi.

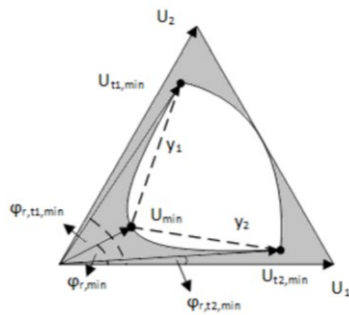
Da bi se odredila vremena vođenja uzet će se jedan sekstant iz slike 4.5. Preko slike 4.9. i jednadžbi (4-24) i (4-25) dobivaju se izrazi za minimalna vremena vođenja sklopnih stanja  $t_{1,min}$  i  $t_{2,min}$  i minimalnu amplitudu prostornog vektora napona  $U_{min}$ . Poznavanjem jednadžbe (4-23) i aproksimiranjem zabranjenih zona pravcima  $y_1$  i  $y_2$ , minimalna vremena vođenja se izračunavaju preko izraza (4-24), (4-25) i preko kutova koji se zatvaraju između karakterističnih točaka koji se ne mogu realizirati (Slika 4.7.). Amplitude tih vektora su izračunate prema izrazu (4-23) i jednake su maksimalnoj amplitudu napona  $\hat{U}$ . Prema tome vrijedi:

$$\begin{aligned}\varphi_{r,t_1min} &= \frac{\pi}{3} - \arcsin\left(\frac{\sqrt{3}ET_{1,min}}{3UT_s}\right) \\ \varphi_{r,t_2min} &= \arcsin\left(\frac{\sqrt{3}ET_{2,min}}{3UT_s}\right), \quad k = 1,2,3,4,5,6\end{aligned}\quad (4-26)$$

ili u poopćenom obliku za svaki sekstant:

$$\varphi_{r,t_1min} = k\frac{\pi}{3} - \arcsin\left(\frac{\sqrt{3}ET_{1,min}}{3UT_s}\right)\quad (4-27)$$

$$\varphi_{r,t_2,min} = \arcsin \left( \frac{\sqrt{3}ET_{2,min}}{3UT_s} + (k+1)\frac{\pi}{3} \right), \quad k = 1,2,3,4,5,6$$



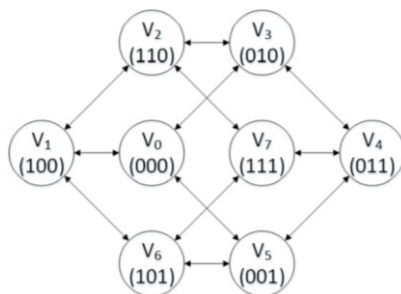
Slika 4.9 Minimalna vremena vođenja za prvi sekstant

Minimalna amplituda vektora napona prema [4]:

$$|U_{min}| = \frac{\sqrt{3}Et_{min}}{3T_s\varphi_{r,min}} \quad (4-28)$$

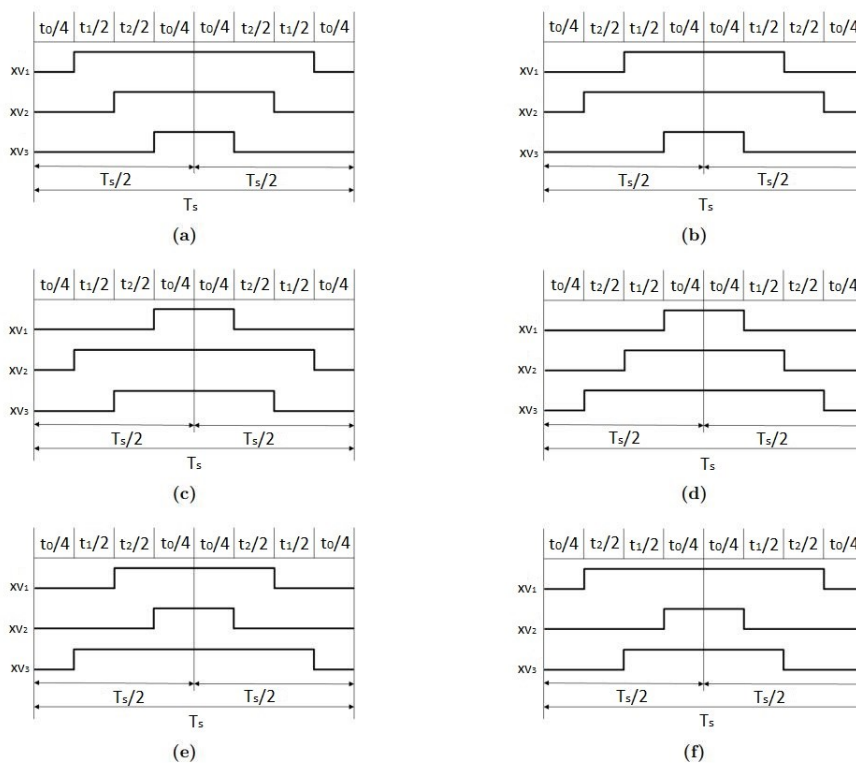
#### 4.5. Optimalan redoslijed sklapanja ventila

Kako bi se smanjili sklopni gubici i poboljšao harmonijski spektar valnih oblika potrebno je odrediti optimalan redoslijed sklapanja ventila. Dva uvjeta koja trebaju biti zadovoljena su da prelazak iz jednog sklopnog stanja u drugi zahtjeva isklapanje jednog ventila dok sljedeće sklopno stanje uklapa drugi ventil iz iste grane. Drugi uvjet nalaže da prelazak iz jednog sekstanta u drugi zahtjeva minimalan broj sklapanja ventila. Iz ova dva uvjeta i prema [7] može se odrediti optimalan redoslijed sklapanja ventila koji je prikazan na slici 4.10.



Slika 4.10. Optimalan redoslijed sklopnih stanja pri modulaciji prostornog vektora napona

Jedan od mogućih redosljeda sklapanja je simetrični ili centrirani obrazac. Oznake  $xv_1, xv_3, xv_5$  predstavljaju upravljive ventile gornjeg dijela grane izmjenjivača, dok su  $xv_2, xv_4, xv_6$  iz donjeg dijela grane i komplementarni su ventilima iz gornjeg dijela grane izmjenjivača. Iako je obrazac podijeljen na 8 dijelova ili segmenata, dva srednja segmenta predstavljaju jedno sklopno stanje pa se taj segment gleda kao jedan. Zbog toga se taj obrazac još naziva 7-segmentni obrazac sklapanja, a prikazan je na slici 4.11.



**Slika 4.11.** 7-segmentni obrazac sklapanja za (a) 1. sekstant, (b) 2. sekstant, (c) 3. sekstant, (d) 4. sekstant, (e) 5. sekstant, (f) 6. sekstant

Prema slici 4.11 (a) uzet će se prvi sekstant kao primjer za provjeru jesu li ispunjeni navedeni uvjeti za minimiziranje sklopnih gubitaka i poboljšanje harmonijskog spektra napona. Iz slike 4.11. (a) se vidi da je došlo do prelaska iz prvog sklopnog stanja (000) u drugo sklopno stanje (100) uklapanjem samo jednog ventila  $xv_1$  te je postignuto minimiziranje sklopnih gubitaka promjenom sklopnog stanja uključenjem jednog jednog ventila.

Sumiranjem svih vremena vođenja dobije se sklopni period  $T_s$  po jednadžbi (4-24). Upotrebom nul vektora  $U_0$  smanjuje se broj sklapanja tako da svaki sklopni period uvijek počinje i završava sklopnim stanjem  $V_0$ , dok središnji segment sekvence je uvijek sklopno

stanje  $V_7$ . Može se primijetiti ako se redosljed 7-segmentnog obrasca prikaže tablično (tablica 4.1) da svaki ventili izmjenjivača samo jednom uklopi i isklopi u sklopnoj periodi. Vrijeme iznad valnih oblika na slici 4.11 je označeno tako da,  $t_0/4$  predstavlja četvrtinu trajanja od ukpnog vremena vođenja  $V_0$  i  $V_7$  u jednoj sklopnoj periodi  $T_s$ . Analogno tome  $t_1/2$  predstavlja polovinu vremena trajanja sklopnog stanja  $V_1$  u jednoj sklopnoj periodi. Ista logika vrijedi i za  $t_2/2$ .

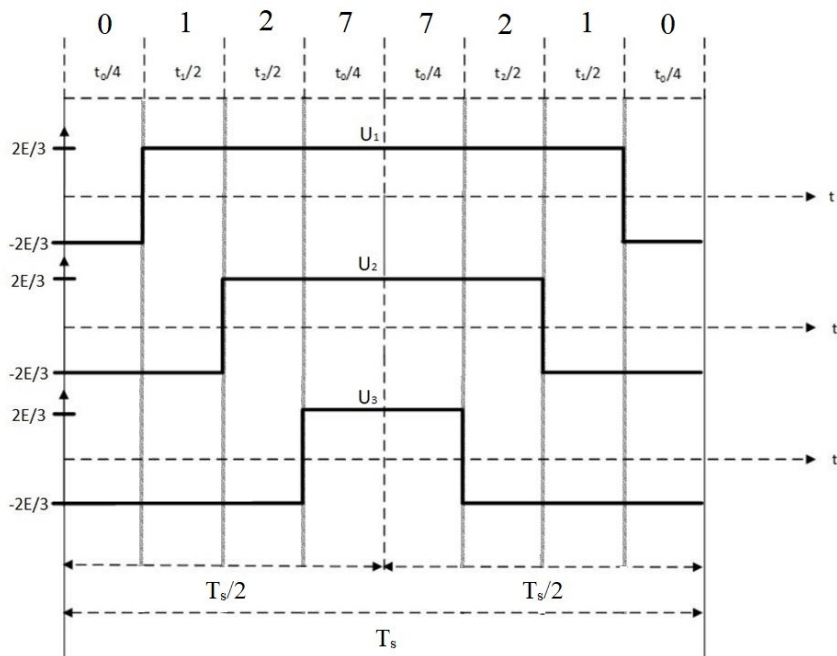
**Tablica 4.1.** Redosljed sklapanja po sekstantima

Sekstant	Segment						
	1	2	3	4	5	6	7
1	$V_0(000)$	$V_1(000)$	$V_2(110)$	$V_7(111)$	$V_2(110)$	$V_1(000)$	$V_0(000)$
2	$V_0(000)$	$V_3(000)$	$V_2(110)$	$V_7(111)$	$V_2(110)$	$V_3(000)$	$V_0(000)$
3	$V_0(000)$	$V_3(000)$	$V_4(000)$	$V_7(111)$	$V_4(000)$	$V_3(000)$	$V_0(000)$
4	$V_0(000)$	$V_5(000)$	$V_4(000)$	$V_7(111)$	$V_4(000)$	$V_5(000)$	$V_0(000)$
5	$V_0(000)$	$V_5(000)$	$V_6(000)$	$V_7(111)$	$V_6(000)$	$V_5(000)$	$V_0(000)$
6	$V_0(000)$	$V_1(000)$	$V_6(000)$	$V_7(111)$	$V_6(000)$	$V_1(000)$	$V_0(000)$

Iz tablice 4.1. se vidi da prijelaz rezultatnog vektora iz jednog sekstanta u drugi zahtjeva minimalan broj sklapanja. Time je zadovoljen drugi uvjet minimiziranja gubitaka pri sklapanjima te je poboljšana frekvencijski spektar.

Kako bi se odredili iznosi faznih napona za bilo koji sekstant, prvo će se nacrtati fazni naponi za prvi sekstant (Slika 4.12) [4]:





Slika 4.12. Fazni naponi prvog sektanta

Ma slici 4.12 brojevi iznad vremena trajanja segmenata predstavljaju sklopna stanja, a okomite linije dijele ukupnu sklopnu periodu na segmente.

Određivanjem srednje vrijednosti napona  $U_a$  valnog oblika prikazanog na slici 4.12. prema izrazu:

$$U_a(0) = \frac{1}{T} \int_0^{T_s} U_a(t) dt \quad (4-29)$$

dobije se srednja vrijednost napona faze  $a$  koja je izražena preko vremena vođenja ventila i napona istosmjernog izvora:

$$U_a(0) = \frac{2}{3} E \frac{T_s - T_0}{T_s} \quad (4-30)$$

Primjenom istog postupka mogu se odrediti naponi sve tri faze u bilo kojem sektantu (tablica 4.2.):

Tablica 4.2 Iznosi faznih napona po sektantima [4]

	Sekstant 1	Sekstant 2	Sekstant 3	Sekstant 4	Sekstant 5	Sekstant 6
$ u_a(t) $	$\frac{2}{3}E \frac{T_s - T_0}{T_s}$	$\frac{2}{3}E \frac{T_1 - T_2}{T_s}$	$\frac{2}{3}E \frac{T_0 - T_s}{T_s}$	$\frac{2}{3}E \frac{T_0 - T_s}{T_s}$	$\frac{2}{3}E \frac{T_2 - T_1}{T_s}$	$\frac{2}{3}E \frac{T_s - T_0}{T_s}$
$ u_b(t) $	$\frac{2}{3}E \frac{T_2 - T_1}{T_s}$	$\frac{2}{3}E \frac{T_s - T_0}{T_s}$	$\frac{2}{3}E \frac{T_s - T_0}{T_s}$	$\frac{2}{3}E \frac{T_1 - T_2}{T_s}$	$\frac{2}{3}E \frac{T_0 - T_s}{T_s}$	$\frac{2}{3}E \frac{T_0 - T_s}{T_s}$
$ u_c(t) $	$\frac{2}{3}E \frac{T_0 - T_s}{T_s}$	$\frac{2}{3}E \frac{T_0 - T_s}{T_s}$	$\frac{2}{3}E \frac{T_2 - T_1}{T_s}$	$\frac{2}{3}E \frac{T_s - T_0}{T_s}$	$\frac{2}{3}E \frac{T_s - T_0}{T_s}$	$\frac{2}{3}E \frac{T_1 - T_2}{T_s}$

Prema tablici 4.2 fazni naponi sve tri faze se mogu izračunati preko napona istosmjernog izvora  $E$  i vremena vođenja pojedinih sklopnih stanja.

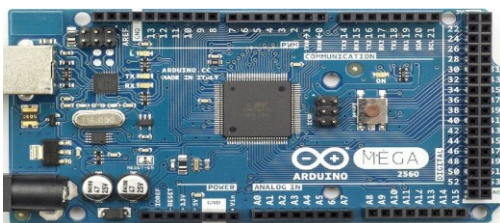
U sljedećem poglavlju biti će opisan postupak implementacije emulacije i mjernog sustava, preko kojeg će se vršiti mjerenje i obrada rezultata.

## 5. EMULACIJA UPRAVLJANJA TROFAZNOG IZMJENJIVAČA POMOĆU MIKROKONTROLERA I HIL SUČELJA

Implementacija algoritma trofaznog neupravljivog izmjenjivača i algoritma modulacije prostornog vektora će se vršiti na *Typhoon HIL* hardveru i njemu pripadajućem softveru. MATLAB Mathworks softver će preko serijske komunikacije putem MATLAB skripte davati parametre za generiranje upravljačkih impulsa na Arduino Mega pločicu. Arduino pločica je spojena sa vodičima na vanjske IN/OUT pinove hardvera preko kojih se šalju generirani upravljački impulsi.

### 5.1. Arduino mikrokontroler

Arduino Mega će pokretanjem Arduino skripte davati upravljačke signale na vanjske pinove hardvera Typhoon HIL uređaja. Izgled Arduino pločice je prikazan na slici 5.1.



Slika 5.1. *Arduino Mega pločica*

Za Algoritam upravljanja neupravljivim izmjenjivačem koristit će se frekvencija od 50 Hz. Pin "A0" Arduina je spojen na analogni ulaz "A1" Typhoon HIL-a preko kojeg će se mijenjati frekvencija upravljačkih signala.

U Arduino programskom paketu otvoren je napisani kod koji služi za generiranje upravljačkih električnih impulsa za upravljanje trofaznim izmjenjivačem. Klikom na gumb "prenesi", napisani Arduino kod se preko spojene serijske USB komunikacije implementira na Arduino pločicu. Postupak je prikazan na slici 5.2.

A screenshot of the Arduino IDE software interface. The window title is 'Mega640p\_v4 (Arduino 1.8.16 (Windows Store 1.8.10))'. The main area shows a code editor with C++ code for an Arduino Mega. The code includes comments and function calls for setting up a frequency and generating PWM signals. A 'Pretnesi' (Upload) button is visible at the top left of the code editor area.

```
1 #include <Arduino.h>
2 #include <SPI.h>
3 #include <Wire.h>
4 #include <EEPROM.h>
5 #include <math.h>
6
7 // Definiranje pinova
8 #define A0_PIN A0
9 #define A1_PIN A1
10 #define A2_PIN A2
11 #define A3_PIN A3
12 #define A4_PIN A4
13 #define A5_PIN A5
14 #define A6_PIN A6
15 #define A7_PIN A7
16 #define A8_PIN A8
17 #define A9_PIN A9
18 #define A10_PIN A10
19 #define A11_PIN A11
20 #define A12_PIN A12
21 #define A13_PIN A13
22 #define A14_PIN A14
23 #define A15_PIN A15
24 #define A16_PIN A16
25 #define A17_PIN A17
26 #define A18_PIN A18
27 #define A19_PIN A19
28 #define A20_PIN A20
29 #define A21_PIN A21
30 #define A22_PIN A22
31 #define A23_PIN A23
32 #define A24_PIN A24
33 #define A25_PIN A25
34 #define A26_PIN A26
35 #define A27_PIN A27
36 #define A28_PIN A28
37 #define A29_PIN A29
38 #define A30_PIN A30
39 #define A31_PIN A31
40 #define A32_PIN A32
41 #define A33_PIN A33
42 #define A34_PIN A34
43 #define A35_PIN A35
44 #define A36_PIN A36
45 #define A37_PIN A37
46 #define A38_PIN A38
47 #define A39_PIN A39
48 #define A40_PIN A40
49 #define A41_PIN A41
50 #define A42_PIN A42
51 #define A43_PIN A43
52 #define A44_PIN A44
53 #define A45_PIN A45
54 #define A46_PIN A46
55 #define A47_PIN A47
56 #define A48_PIN A48
57 #define A49_PIN A49
58 #define A50_PIN A50
59 #define A51_PIN A51
60 #define A52_PIN A52
61 #define A53_PIN A53
62 #define A54_PIN A54
63 #define A55_PIN A55
64 #define A56_PIN A56
65 #define A57_PIN A57
66 #define A58_PIN A58
67 #define A59_PIN A59
68 #define A60_PIN A60
69 #define A61_PIN A61
70 #define A62_PIN A62
71 #define A63_PIN A63
72 #define A64_PIN A64
73 #define A65_PIN A65
74 #define A66_PIN A66
75 #define A67_PIN A67
76 #define A68_PIN A68
77 #define A69_PIN A69
78 #define A70_PIN A70
79 #define A71_PIN A71
80 #define A72_PIN A72
81 #define A73_PIN A73
82 #define A74_PIN A74
83 #define A75_PIN A75
84 #define A76_PIN A76
85 #define A77_PIN A77
86 #define A78_PIN A78
87 #define A79_PIN A79
88 #define A80_PIN A80
89 #define A81_PIN A81
90 #define A82_PIN A82
91 #define A83_PIN A83
92 #define A84_PIN A84
93 #define A85_PIN A85
94 #define A86_PIN A86
95 #define A87_PIN A87
96 #define A88_PIN A88
97 #define A89_PIN A89
98 #define A90_PIN A90
99 #define A91_PIN A91
100 #define A92_PIN A92
101 #define A93_PIN A93
102 #define A94_PIN A94
103 #define A95_PIN A95
104 #define A96_PIN A96
105 #define A97_PIN A97
106 #define A98_PIN A98
107 #define A99_PIN A99
108 #define A100_PIN A100
109 #define A101_PIN A101
110 #define A102_PIN A102
111 #define A103_PIN A103
112 #define A104_PIN A104
113 #define A105_PIN A105
114 #define A106_PIN A106
115 #define A107_PIN A107
116 #define A108_PIN A108
117 #define A109_PIN A109
118 #define A110_PIN A110
119 #define A111_PIN A111
120 #define A112_PIN A112
121 #define A113_PIN A113
122 #define A114_PIN A114
123 #define A115_PIN A115
124 #define A116_PIN A116
125 #define A117_PIN A117
126 #define A118_PIN A118
127 #define A119_PIN A119
128 #define A120_PIN A120
129 #define A121_PIN A121
130 #define A122_PIN A122
131 #define A123_PIN A123
132 #define A124_PIN A124
133 #define A125_PIN A125
134 #define A126_PIN A126
135 #define A127_PIN A127
136 #define A128_PIN A128
137 #define A129_PIN A129
138 #define A130_PIN A130
139 #define A131_PIN A131
140 #define A132_PIN A132
141 #define A133_PIN A133
142 #define A134_PIN A134
143 #define A135_PIN A135
144 #define A136_PIN A136
145 #define A137_PIN A137
146 #define A138_PIN A138
147 #define A139_PIN A139
148 #define A140_PIN A140
149 #define A141_PIN A141
150 #define A142_PIN A142
151 #define A143_PIN A143
152 #define A144_PIN A144
153 #define A145_PIN A145
154 #define A146_PIN A146
155 #define A147_PIN A147
156 #define A148_PIN A148
157 #define A149_PIN A149
158 #define A150_PIN A150
159 #define A151_PIN A151
160 #define A152_PIN A152
161 #define A153_PIN A153
162 #define A154_PIN A154
163 #define A155_PIN A155
164 #define A156_PIN A156
165 #define A157_PIN A157
166 #define A158_PIN A158
167 #define A159_PIN A159
168 #define A160_PIN A160
169 #define A161_PIN A161
170 #define A162_PIN A162
171 #define A163_PIN A163
172 #define A164_PIN A164
173 #define A165_PIN A165
174 #define A166_PIN A166
175 #define A167_PIN A167
176 #define A168_PIN A168
177 #define A169_PIN A169
178 #define A170_PIN A170
179 #define A171_PIN A171
180 #define A172_PIN A172
181 #define A173_PIN A173
182 #define A174_PIN A174
183 #define A175_PIN A175
184 #define A176_PIN A176
185 #define A177_PIN A177
186 #define A178_PIN A178
187 #define A179_PIN A179
188 #define A180_PIN A180
189 #define A181_PIN A181
190 #define A182_PIN A182
191 #define A183_PIN A183
192 #define A184_PIN A184
193 #define A185_PIN A185
194 #define A186_PIN A186
195 #define A187_PIN A187
196 #define A188_PIN A188
197 #define A189_PIN A189
198 #define A190_PIN A190
199 #define A191_PIN A191
200 #define A192_PIN A192
201 #define A193_PIN A193
202 #define A194_PIN A194
203 #define A195_PIN A195
204 #define A196_PIN A196
205 #define A197_PIN A197
206 #define A198_PIN A198
207 #define A199_PIN A199
208 #define A200_PIN A200
209 #define A201_PIN A201
210 #define A202_PIN A202
211 #define A203_PIN A203
212 #define A204_PIN A204
213 #define A205_PIN A205
214 #define A206_PIN A206
215 #define A207_PIN A207
216 #define A208_PIN A208
217 #define A209_PIN A209
218 #define A210_PIN A210
219 #define A211_PIN A211
220 #define A212_PIN A212
221 #define A213_PIN A213
222 #define A214_PIN A214
223 #define A215_PIN A215
224 #define A216_PIN A216
225 #define A217_PIN A217
226 #define A218_PIN A218
227 #define A219_PIN A219
228 #define A220_PIN A220
229 #define A221_PIN A221
230 #define A222_PIN A222
231 #define A223_PIN A223
232 #define A224_PIN A224
233 #define A225_PIN A225
234 #define A226_PIN A226
235 #define A227_PIN A227
236 #define A228_PIN A228
237 #define A229_PIN A229
238 #define A230_PIN A230
239 #define A231_PIN A231
240 #define A232_PIN A232
241 #define A233_PIN A233
242 #define A234_PIN A234
243 #define A235_PIN A235
244 #define A236_PIN A236
245 #define A237_PIN A237
246 #define A238_PIN A238
247 #define A239_PIN A239
248 #define A240_PIN A240
249 #define A241_PIN A241
250 #define A242_PIN A242
251 #define A243_PIN A243
252 #define A244_PIN A244
253 #define A245_PIN A245
254 #define A246_PIN A246
255 #define A247_PIN A247
256 #define A248_PIN A248
257 #define A249_PIN A249
258 #define A250_PIN A250
259 #define A251_PIN A251
260 #define A252_PIN A252
261 #define A253_PIN A253
262 #define A254_PIN A254
263 #define A255_PIN A255
264 #define A256_PIN A256
265 #define A257_PIN A257
266 #define A258_PIN A258
267 #define A259_PIN A259
268 #define A260_PIN A260
269 #define A261_PIN A261
270 #define A262_PIN A262
271 #define A263_PIN A263
272 #define A264_PIN A264
273 #define A265_PIN A265
274 #define A266_PIN A266
275 #define A267_PIN A267
276 #define A268_PIN A268
277 #define A269_PIN A269
278 #define A270_PIN A270
279 #define A271_PIN A271
280 #define A272_PIN A272
281 #define A273_PIN A273
282 #define A274_PIN A274
283 #define A275_PIN A275
284 #define A276_PIN A276
285 #define A277_PIN A277
286 #define A278_PIN A278
287 #define A279_PIN A279
288 #define A280_PIN A280
289 #define A281_PIN A281
290 #define A282_PIN A282
291 #define A283_PIN A283
292 #define A284_PIN A284
293 #define A285_PIN A285
294 #define A286_PIN A286
295 #define A287_PIN A287
296 #define A288_PIN A288
297 #define A289_PIN A289
298 #define A290_PIN A290
299 #define A291_PIN A291
300 #define A292_PIN A292
301 #define A293_PIN A293
302 #define A294_PIN A294
303 #define A295_PIN A295
304 #define A296_PIN A296
305 #define A297_PIN A297
306 #define A298_PIN A298
307 #define A299_PIN A299
308 #define A300_PIN A300
309 #define A301_PIN A301
310 #define A302_PIN A302
311 #define A303_PIN A303
312 #define A304_PIN A304
313 #define A305_PIN A305
314 #define A306_PIN A306
315 #define A307_PIN A307
316 #define A308_PIN A308
317 #define A309_PIN A309
318 #define A310_PIN A310
319 #define A311_PIN A311
320 #define A312_PIN A312
321 #define A313_PIN A313
322 #define A314_PIN A314
323 #define A315_PIN A315
324 #define A316_PIN A316
325 #define A317_PIN A317
326 #define A318_PIN A318
327 #define A319_PIN A319
328 #define A320_PIN A320
329 #define A321_PIN A321
330 #define A322_PIN A322
331 #define A323_PIN A323
332 #define A324_PIN A324
333 #define A325_PIN A325
334 #define A326_PIN A326
335 #define A327_PIN A327
336 #define A328_PIN A328
337 #define A329_PIN A329
338 #define A330_PIN A330
339 #define A331_PIN A331
340 #define A332_PIN A332
341 #define A333_PIN A333
342 #define A334_PIN A334
343 #define A335_PIN A335
344 #define A336_PIN A336
345 #define A337_PIN A337
346 #define A338_PIN A338
347 #define A339_PIN A339
348 #define A340_PIN A340
349 #define A341_PIN A341
350 #define A342_PIN A342
351 #define A343_PIN A343
352 #define A344_PIN A344
353 #define A345_PIN A345
354 #define A346_PIN A346
355 #define A347_PIN A347
356 #define A348_PIN A348
357 #define A349_PIN A349
358 #define A350_PIN A350
359 #define A351_PIN A351
360 #define A352_PIN A352
361 #define A353_PIN A353
362 #define A354_PIN A354
363 #define A355_PIN A355
364 #define A356_PIN A356
365 #define A357_PIN A357
366 #define A358_PIN A358
367 #define A359_PIN A359
368 #define A360_PIN A360
369 #define A361_PIN A361
370 #define A362_PIN A362
371 #define A363_PIN A363
372 #define A364_PIN A364
373 #define A365_PIN A365
374 #define A366_PIN A366
375 #define A367_PIN A367
376 #define A368_PIN A368
377 #define A369_PIN A369
378 #define A370_PIN A370
379 #define A371_PIN A371
380 #define A372_PIN A372
381 #define A373_PIN A373
382 #define A374_PIN A374
383 #define A375_PIN A375
384 #define A376_PIN A376
385 #define A377_PIN A377
386 #define A378_PIN A378
387 #define A379_PIN A379
388 #define A380_PIN A380
389 #define A381_PIN A381
390 #define A382_PIN A382
391 #define A383_PIN A383
392 #define A384_PIN A384
393 #define A385_PIN A385
394 #define A386_PIN A386
395 #define A387_PIN A387
396 #define A388_PIN A388
397 #define A389_PIN A389
398 #define A390_PIN A390
399 #define A391_PIN A391
400 #define A392_PIN A392
401 #define A393_PIN A393
402 #define A394_PIN A394
403 #define A395_PIN A395
404 #define A396_PIN A396
405 #define A397_PIN A397
406 #define A398_PIN A398
407 #define A399_PIN A399
408 #define A400_PIN A400
409 #define A401_PIN A401
410 #define A402_PIN A402
411 #define A403_PIN A403
412 #define A404_PIN A404
413 #define A405_PIN A405
414 #define A406_PIN A406
415 #define A407_PIN A407
416 #define A408_PIN A408
417 #define A409_PIN A409
418 #define A410_PIN A410
419 #define A411_PIN A411
420 #define A412_PIN A412
421 #define A413_PIN A413
422 #define A414_PIN A414
423 #define A415_PIN A415
424 #define A416_PIN A416
425 #define A417_PIN A417
426 #define A418_PIN A418
427 #define A419_PIN A419
428 #define A420_PIN A420
429 #define A421_PIN A421
430 #define A422_PIN A422
431 #define A423_PIN A423
432 #define A424_PIN A424
433 #define A425_PIN A425
434 #define A426_PIN A426
435 #define A427_PIN A427
436 #define A428_PIN A428
437 #define A429_PIN A429
438 #define A430_PIN A430
439 #define A431_PIN A431
440 #define A432_PIN A432
441 #define A433_PIN A433
442 #define A434_PIN A434
443 #define A435_PIN A435
444 #define A436_PIN A436
445 #define A437_PIN A437
446 #define A438_PIN A438
447 #define A439_PIN A439
448 #define A440_PIN A440
449 #define A441_PIN A441
450 #define A442_PIN A442
451 #define A443_PIN A443
452 #define A444_PIN A444
453 #define A445_PIN A445
454 #define A446_PIN A446
455 #define A447_PIN A447
456 #define A448_PIN A448
457 #define A449_PIN A449
458 #define A450_PIN A450
459 #define A451_PIN A451
460 #define A452_PIN A452
461 #define A453_PIN A453
462 #define A454_PIN A454
463 #define A455_PIN A455
464 #define A456_PIN A456
465 #define A457_PIN A457
466 #define A458_PIN A458
467 #define A459_PIN A459
468 #define A460_PIN A460
469 #define A461_PIN A461
470 #define A462_PIN A462
471 #define A463_PIN A463
472 #define A464_PIN A464
473 #define A465_PIN A465
474 #define A466_PIN A466
475 #define A467_PIN A467
476 #define A468_PIN A468
477 #define A469_PIN A469
478 #define A470_PIN A470
479 #define A471_PIN A471
480 #define A472_PIN A472
481 #define A473_PIN A473
482 #define A474_PIN A474
483 #define A475_PIN A475
484 #define A476_PIN A476
485 #define A477_PIN A477
486 #define A478_PIN A478
487 #define A479_PIN A479
488 #define A480_PIN A480
489 #define A481_PIN A481
490 #define A482_PIN A482
491 #define A483_PIN A483
492 #define A484_PIN A484
493 #define A485_PIN A485
494 #define A486_PIN A486
495 #define A487_PIN A487
496 #define A488_PIN A488
497 #define A489_PIN A489
498 #define A490_PIN A490
499 #define A491_PIN A491
500 #define A492_PIN A492
501 #define A493_PIN A493
502 #define A494_PIN A494
503 #define A495_PIN A495
504 #define A496_PIN A496
505 #define A497_PIN A497
506 #define A498_PIN A498
507 #define A499_PIN A499
508 #define A500_PIN A500
509 #define A501_PIN A501
510 #define A502_PIN A502
511 #define A503_PIN A503
512 #define A504_PIN A504
513 #define A505_PIN A505
514 #define A506_PIN A506
515 #define A507_PIN A507
516 #define A508_PIN A508
517 #define A509_PIN A509
518 #define A510_PIN A510
519 #define A511_PIN A511
520 #define A512_PIN A512
521 #define A513_PIN A513
522 #define A514_PIN A514
523 #define A515_PIN A515
524 #define A516_PIN A516
525 #define A517_PIN A517
526 #define A518_PIN A518
527 #define A519_PIN A519
528 #define A520_PIN A520
529 #define A521_PIN A521
530 #define A522_PIN A522
531 #define A523_PIN A523
532 #define A524_PIN A524
533 #define A525_PIN A525
534 #define A526_PIN A526
535 #define A527_PIN A527
536 #define A528_PIN A528
537 #define A529_PIN A529
538 #define A530_PIN A530
539 #define A531_PIN A531
540 #define A532_PIN A532
541 #define A533_PIN A533
542 #define A534_PIN A534
543 #define A535_PIN A535
544 #define A536_PIN A536
545 #define A537_PIN A537
546 #define A538_PIN A538
547 #define A539_PIN A539
548 #define A540_PIN A540
549 #define A541_PIN A541
550 #define A542_PIN A542
551 #define A543_PIN A543
552 #define A544_PIN A544
553 #define A545_PIN A545
554 #define A546_PIN A546
555 #define A547_PIN A547
556 #define A548_PIN A548
557 #define A549_PIN A549
558 #define A550_PIN A550
559 #define A551_PIN A551
560 #define A552_PIN A552
561 #define A553_PIN A553
562 #define A554_PIN A554
563 #define A555_PIN A555
564 #define A556_PIN A556
565 #define A557_PIN A557
566 #define A558_PIN A558
567 #define A559_PIN A559
568 #define A560_PIN A560
569 #define A561_PIN A561
570 #define A562_PIN A562
571 #define A563_PIN A563
572 #define A564_PIN A564
573 #define A565_PIN A565
574 #define A566_PIN A566
575 #define A567_PIN A567
576 #define A568_PIN A568
577 #define A569_PIN A569
578 #define A570_PIN A570
579 #define A571_PIN A571
580 #define A572_PIN A572
581 #define A573_PIN A573
582 #define A574_PIN A574
583 #define A575_PIN A575
584 #define A576_PIN A576
585 #define A577_PIN A577
586 #define A578_PIN A578
587 #define A579_PIN A579
588 #define A580_PIN A580
589 #define A581_PIN A581
590 #define A582_PIN A582
591 #define A583_PIN A583
592 #define A584_PIN A584
593 #define A585_PIN A585
594 #define A586_PIN A586
595 #define A587_PIN A587
596 #define A588_PIN A588
597 #define A589_PIN A589
598 #define A590_PIN A590
599 #define A591_PIN A591
600 #define A592_PIN A592
601 #define A593_PIN A593
602 #define A594_PIN A594
603 #define A595_PIN A595
604 #define A596_PIN A596
605 #define A597_PIN A597
606 #define A598_PIN A598
607 #define A599_PIN A599
608 #define A600_PIN A600
609 #define A601_PIN A601
610 #define A602_PIN A602
611 #define A603_PIN A603
612 #define A604_PIN A604
613 #define A605_PIN A605
614 #define A606_PIN A606
615 #define A607_PIN A607
616 #define A608_PIN A608
617 #define A609_PIN A609
618 #define A610_PIN A610
619 #define A611_PIN A611
620 #define A612_PIN A612
621 #define A613_PIN A613
622 #define A614_PIN A614
623 #define A615_PIN A615
624 #define A616_PIN A616
625 #define A617_PIN A617
626 #define A618_PIN A618
627 #define A619_PIN A619
628 #define A620_PIN A620
629 #define A621_PIN A621
630 #define A622_PIN A622
631 #define A623_PIN A623
632 #define A624_PIN A624
633 #define A625_PIN A625
634 #define A626_PIN A626
635 #define A627_PIN A627
636 #define A628_PIN A628
637 #define A629_PIN A629
638 #define A630_PIN A630
639 #define A631_PIN A631
640 #define A632_PIN A632
641 #define A633_PIN A633
642 #define A634_PIN A634
643 #define A635_PIN A635
644 #define A636_PIN A636
645 #define A637_PIN A637
646 #define A638_PIN A638
647 #define A639_PIN A639
648 #define A640_PIN A640
649 #define A641_PIN A641
650 #define A642_PIN A642
651 #define A643_PIN A643
652 #define A644_PIN A644
653 #define A645_PIN A645
654 #define A646_PIN A646
655 #define A647_PIN A647
656 #define A648_PIN A648
657 #define A649_PIN A649
658 #define A650_PIN A650
659 #define A651_PIN A651
660 #define A652_PIN A652
661 #define A653_PIN A653
662 #define A654_PIN A654
663 #define A655_PIN A655
664 #define A656_PIN A656
665 #define A657_PIN A657
666 #define A658_PIN A658
667 #define A659_PIN A659
668 #define A660_PIN A660
669 #define A661_PIN A661
670 #define A662_PIN A662
671 #define A663_PIN A663
672 #define A664_PIN A664
673 #define A665_PIN A665
674 #define A666_PIN A666
675 #define A667_PIN A667
676 #define A668_PIN A668
677 #define A669_PIN A669
678 #define A670_PIN A670
679 #define A671_PIN A671
680 #define A672_PIN A672
681 #define A673_PIN A673
682 #define A674_PIN A674
683 #define A675_PIN A675
684 #define A676_PIN A676
685 #define A677_PIN A677
686 #define A678_PIN A678
687 #define A679_PIN A679
688 #define A680_PIN A680
689 #define A681_PIN A681
690 #define A682_PIN A682
691 #define A683_PIN A683
692 #define A684_PIN A684
693 #define A685_PIN A685
694 #define A686_PIN A686
695 #define A687_PIN A687
696 #define A688_PIN A688
697 #define A689_PIN A689
698 #define A690_PIN A690
699 #define A691_PIN A691
700 #define A692_PIN A692
701 #define A693_PIN A693
702 #define A694_PIN A694
703 #define A695_PIN A695
704 #define A696_PIN A696
705 #define A697_PIN A697
706 #define A698_PIN A698
707 #define A699_PIN A699
708 #define A700_PIN A700
709 #define A701_PIN A701
710 #define A702_PIN A702
711 #define A703_PIN A703
712 #define A704_PIN A704
713 #define A705_PIN A705
714 #define A706_PIN A706
715 #define A707_PIN A707
716 #define A708_PIN A708
717 #define A709_PIN A709
718 #define A710_PIN A710
719 #define A711_PIN A711
720 #define A712_PIN A712
721 #define A713_PIN A713
722 #define A714_PIN A714
723 #define A715_PIN A715
724 #define A716_PIN A716
725 #define A717_PIN A717
726 #define A718_PIN A718
727 #define A719_PIN A719
728 #define A720_PIN A720
729 #define A721_PIN A721
730 #define A722_PIN A722
731 #define A723_PIN A723
732 #define A724_PIN A724
733 #define A725_PIN A725
734 #define A726_PIN A726
735 #define A727_PIN A727
736 #define A728_PIN A728
737 #define A729_PIN A729
738 #define A730_PIN A730
739 #define A731_PIN A731
740 #define A732_PIN A732
741 #define A733_PIN A733
742 #define A734_PIN A734
743 #define A735_PIN A735
744 #define A736_PIN A736
745 #define A737_PIN A737
746 #define A738_PIN A738
747 #define A739_PIN A739
748 #define A740_PIN A740
749 #define A741_PIN A741
750 #define A742_PIN A742
751 #define A743_PIN A743
752 #define A744_PIN A744
753 #define A745_PIN A745
754 #define A746_PIN A746
755 #define A747_PIN A747
756 #define A748_PIN A748
757 #define A749_PIN A749
758 #define A750_PIN A750
759 #define A751_PIN A751
760 #define A752_PIN A752
761 #define A753_PIN A753
762 #define A754_PIN A754
763 #define A755_PIN A755
764 #define A756_PIN A756
765 #define A757_PIN A757
766 #define A758_PIN A758
767 #define A759_PIN A759
768 #define A760_PIN A760
769 #define A761_PIN A761
770 #define A762_PIN A762
771 #define A763_PIN A763
772 #define A764_PIN A764
773 #define A765_PIN A765
774 #define A766_PIN A766
775 #define A767_PIN A767
776 #define A768_PIN A768
777 #define A769_PIN A769
778 #define A770_PIN A770
779 #define A771_PIN A771
780 #define A772_PIN A772
781 #define A773_PIN A773
782 #define A774_PIN A774
783 #define A775_PIN A775
784 #define A776_PIN A776
785 #define A777_PIN A777
786 #define A778_PIN A778
787 #define A779_PIN A779

```

## 5.2. Typhoon HIL

Typhoon HIL (eng. *hardware-in-the-loop*) je hardver koji se koristi za emuliranje različitih energetske i elektroničke sustava kako bi se dobila povratna informacija kako će se mreže ponašati u različitim uvjetima. Typhoon HIL se dijeli na dva dijela hardver i softver. Hardver dio služi kao fizička veza između softvera i osobe koja radi na uređaju. Na vanjskoj ploči nalaze se razni pinovi i konektori koji mogu biti analogni ulazi i izlazi i digitalni ulazi i izlazi. Prikaz hardvera nalazi se na slici 5.3, a vanjsko sučelje na slici 5.4.



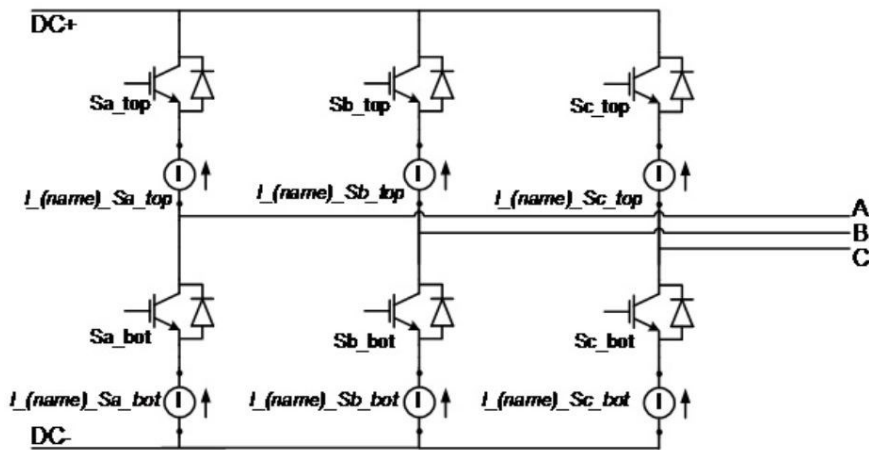
Slika 5.3. Izgled hardvera Typhoon HILa



Slika 5.4. Vanjsko sučelje s IN/OUT pinovima

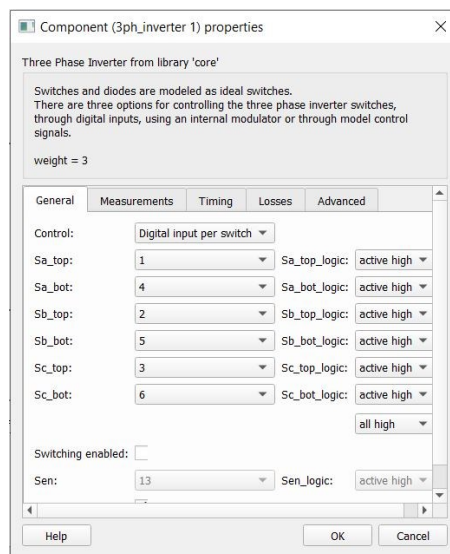
Softver Typhoon HIL se dijeli na Schematic editor i na HIL SCADA. *Schematic editor* služi za izgradnju električnih sklopovlja koja mogu biti već postojeća i nalaze se u knjižnici schematic editora ili korisnik može sastaviti svoje vlastito sklopovlje po želji. Implementacija algoritma upravljanja modulacije se vršila preko softvera Typhoon HIL. U Schematic editoru je odabrano iz knjižnice modela model inmd *open loop control* koji je preuređen za potrebe emuliranja. Na ulazu izmjenjivača je naponski istosmjerni izvor  $E$  čija je vrijednost postavljena na 320 V. Dvoklikom na blok "3ph\_inverter 1" otvara se skočni prozor gdje se nudi mogućnost konfiguracije pinova ventila izmjenjivača.

Preko sheme izmjenjivača (Slika 5.5.) koja je dana dvoklikom na blok "3ph\_inverter 1" mogu se odrediti oznake ventila te na koji način ih treba numerirati.



Slika 5.5. Shematski prikaz trofaznog izmjenjivača u Typhoon HIL Schematic Editoru

Brojevi postavljeni na ventilima izmjenjivača će odgovarati brojevima pinova na IN/OUT hardveru Typhoon HIL-a na koje će se dovoditi upravljački signali (Slika 5.6).



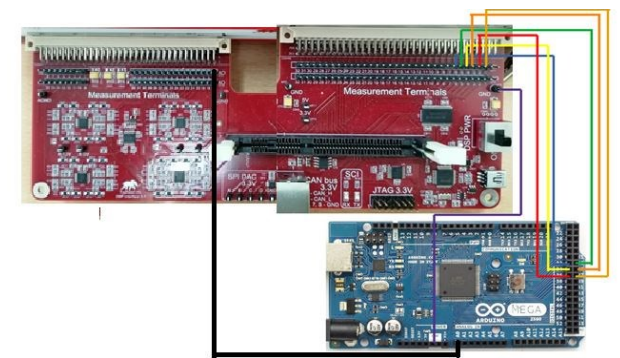
Slika 5.6. Prikaz postavki bloka 3ph\_inverter 1

Pinovi Arduino pločice spojeni su preko vodiča na vanjske pinove IN/OUT sučelja Typhoon HIL-a. Ti pinovi odgovaraju brojevima pinova postavljenim u bloku " 3ph\_inverter 1". Tablica 5.1. prikazuje spojene pinove IN/OUT sučelja i Arduino Mega pločice.

**Tablica 5.1.** Redosljed spajanja pinova

Arduino Mega digital output	Typhoon HIL modul digital input
pin 32	pin 6
pin 33	pin 5
pin 34	pin 4
pin 35	pin 3
pin 36	pin 2
pin 37	pin 1

Spajanje pinova prema tablici 5.1 prikazano je na slici 5.7

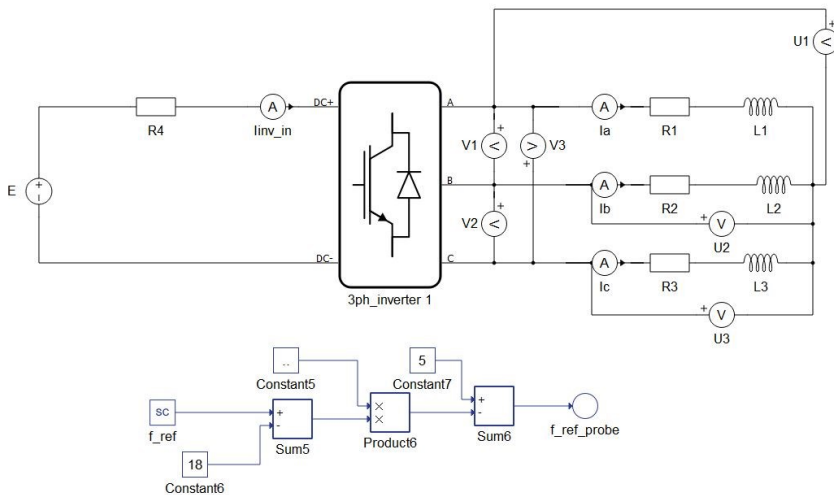


**Slika 5.7.** Arduino i Typhoon HIL hardverskog djela sustava

U shemi (Slika 5.8) a izlazu umjesto izmjeničnog motora je postavljeno trofazno simetrično trošilo spojeno u zvijezdu u obliku impedancije koja je modelirana kao serijska RL veza. Iznosi blokova radnih otpora "R1", "R2" i "R3" su postavljeni na 100  $\Omega$  dok su iznosi induktiviteta "L1", "L2" i "L3" postavljeni na 300 mH. Iznosi navedenih otpora i induktiviteta će se kroz emulaciju držati konstantnim. Dodani su u sklopovlje mjerni instrumenti za mjerenje napona "V1", "V2" i "V3" koji će mjeriti iznose linijskih napona, "U1", "U2" i "U3" koji će mjeriti iznose faznih napona, a "I1", "I2" i "I3" iznose struje.

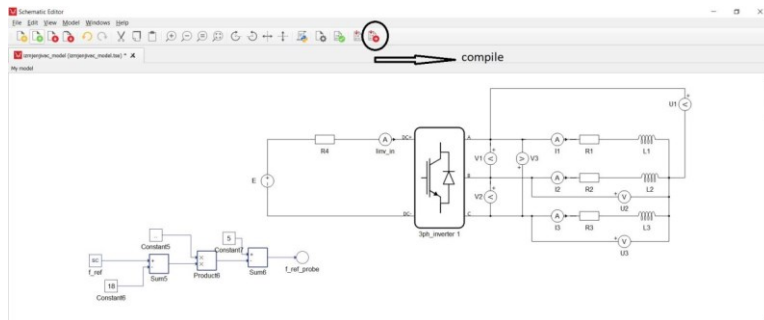
Također, dodan je blok za skaliranje frekvencije upravljačkih signala koji se dovode s Arduino mega pločice. Problem je nastao kod frekvencije upravljačkih signala jer je ona bila prevelika (reda MHz) te ju se jednostavnim zbrajanjem i množenjem konstantama skaliralo na iznos od 18 do 90 Hz. Za algoritam upravljanja neupravljivim izmjenjivačem koristit će se frekvencija od 50 Hz. Frekvencija dovedena s Arduino Mega pločica dovodi se na blok "f\_ref", a skalirana frekvencija se preko bloka "f\_ref\_probe" dovodi na blok "3ph\_inverter 1".

Nakon što je sve postavljeno u *Schematic Editoru* konačna shema prikazana je na slici 5.8



**Slika 5.8** Model trofaznog izmjenjivača u Typhoon HIL Schematic Editoru

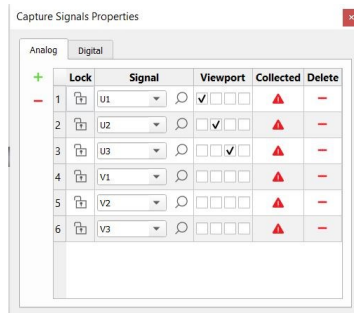
Nakon što je sve postavljeno, klikom na *compile* u *Schematic editoru* Typhoon HIL-a (Slika 5.9.) provodi se kompajliranje (prevođenje u strojni jezik i spuštanje programa na razinu FPGA mikrokontrolera Typhoon HIL-a) izrađenog sklopovlja.



**Slika 5.9.** Gumb *compile*

Nakon završetka kompajliranja otvara se novi prozor HIL SCADA u kojem se dodaju razni instrumenti za mjerenje. Za ovaj diplomski rad korišten je blok *Scope* u kojem će se prikazivati dobiveni valni oblici. Dvoklikom na *Scope* otvara se prozor gdje su prikazana četiri prozora za prikaz valnih oblika. Klikom na tipku *Force Trigger* dolazi do sakupljanja snimljenih signala. Klikom na tipku *Signals*, otvara se prozor *Capture Signals Properties* gdje se nudi odabir valnih oblika snimljenih preko mjernih instrumenata postavljenih u sklopovlje

*Schematic editora*. Klikom na kvadratiće pored, bira se u kojem će prozoru odabrani signal biti prikazan (Slika 5.10.).

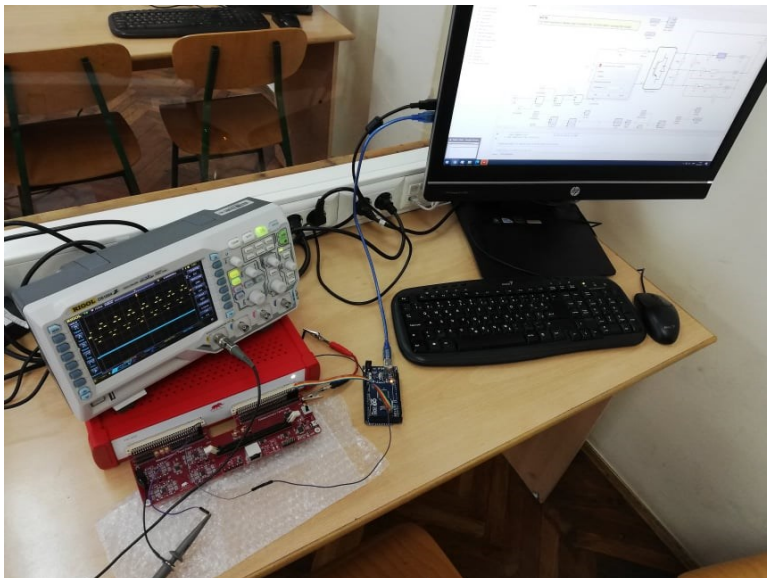


**Slika 5.10** Capture signal properties prozor

Više valnih oblika može odjednom biti prikazano, ako se npr. žele prikazati svi linijski naponi na jednom grafu. Snimljeni valni oblici će se klikom gumba *Export Captured Signals To File* spremirati kao \*.csv datoteka. Korištenjem MATLAB skripte, preko \*.csv datoteke će se iscrtavati dobiveni valni oblici te računati ukupno harmonijsko izobličenje.

Kompletan blokovski prikaz emulacijskog i mjernog sustava prikazan je na slici 5.11.

Nakon što je sve fizički spojeno i podešeno emulacijski i mjerni sustav u laboratoriju prikazan je na slici 5.11



**Slika 5.11** Emulacijski i mjerni sustav u laboratoriju prilikom mjerenja

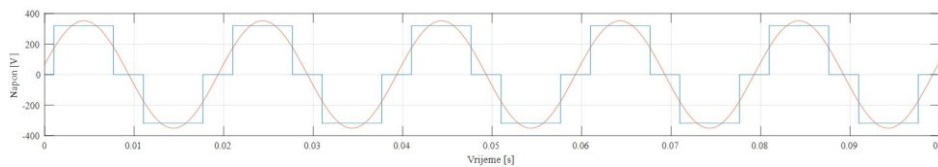


## 6. REZULTATI MJERENJA

U ovom poglavlju bit će prikazani valni oblici linijskog napona  $V$ , faznog napona  $U$  i struje  $I$ , te njihovi frekvencijski spektri preko kojih će se izračunati  $THD$ . Prvo će se pokazati rezultati mjerenja za neupravljivi trofazni izmjenjivač u mosnom spoju, a zatim rezultati modulacije prostornog vektora napona. Korištenjem MATLAB skripte, preko \*.csv datoteke će se iscrtavati valni oblici, valni oblik osnovnog harmonika napona te računati ukupno harmonijsko izobličenje.

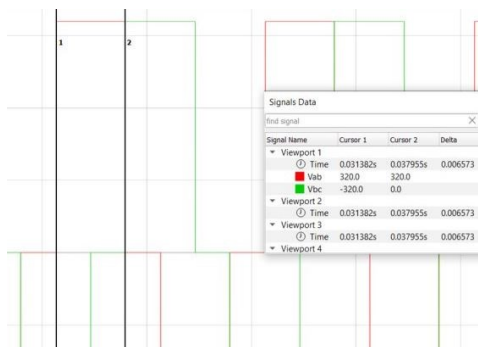
### 6.1. Neupravljivi trofazni izmjenjivač u mosnom spoju

U nastavku će biti prikazani valni oblici napona i struje, frekvencijski spektar te proračun  $THD$ -a za neupravljivi trofazni izmjenjivač u mosnom spoju. Linijski napon neupravljivog trofaznog izmjenjivača prikazan je na slici 6.1.



Slika 6.1 Linijski napon  $V$  na trošilu

Na slici 6.1 plavom bojom je prikazan valni oblik napona ili struje (u ovom slučaju za linijski napon) na trošilu, a crvenom bojom valni oblik osnovnog harmonika napona ili struje (u ovom slučaju za linijski napon). Isto vrijedi i za ostale slike na kojima su prikazani valni oblici. Iz prethodne slike se može uočiti da trajanje jednog perioda iznosi 20 ms odnosno da je frekvencija napona jednaka zadanih 50 Hz. Ovo vrijedi za sve ostale signale koji će se prikazati u nastavku. Preko pokazivača koji se može postaviti na dobivene signale odredit će se fazni pomak između faznih napona kao što je prikazano na slici 6.2.



Slika 6.2. Određivanje faznog pomaka napona

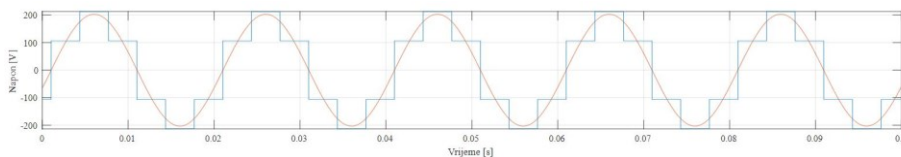
Iz očitanih vremena koji su označeni na slici pod *Viewport 2 Cursor 1 i 2* su izmjerena vremena  $t_1$  i  $t_2$ . Razlika ta dva vremena daje vrijeme koje je dio jedne periode. Pošto se radi o frekvenciji od 50 Hz trajanje jednog perioda iznosi  $T = 0,02$  sekunde. Dijeljenjem ta dva broja i množenjem s  $360^\circ$  dobije se fazni pomak između napona dvije faze. Postupak je prikazan ispod.

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 0,029119 - 0,022437 = 0,006682 \text{ s}$$

$$\varphi = \frac{\Delta t}{T} * 360 = \frac{0,006682}{0,02} * 360 = 120,76^\circ$$

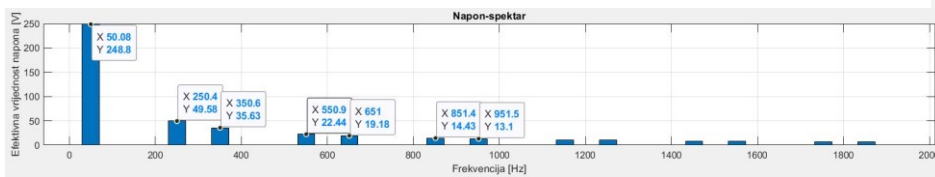
Kao rezultat dobije se iznos faznog pomaka od  $120,76^\circ$ . Razlog malog odstupanja je nepreciznost pri postavljanju kursora te je dobiveno odstupanje prihvatljivo.

Slika 6.3. prikazuje valni oblik faznog napona  $U_1$



**Slika 6.3.** Valni oblik faznog napona  $U$

Korištenjem jednažbi (3.7) i (3.8) izračunate su efektivne vrijednosti linijskog  $V$ , faznog  $U$  napona, efektivna vrijednost osnovnih harmonika  $V(1)$  i  $U(1)$  kao i ukupna harmonijska izobličenja faznog i linijskog napona,  $THDU$  i  $THDV$ . Kako bi se usporedile teorijske i izmjerene vrijednosti navedenih veličina korištena je MATLAB skripta koja služi za određivanje i prikaz frekvencijskog spektra izmjerenih vrijednosti. Typhoon HIL nudi mogućnost izvoza dobivenih valnih oblika u datoteku s ekstenzijom \*.csv. Dobivena \*.csv datoteka je stavljena u workspace te se preko skripte u MATLAB-u očitava a preko dobivenih vrijednosti iscrtava frekvencijski spektar. Na slici 6.4 prikazan je dobiveni frekvencijski spektar linijskog napona.



**Slika 6.4.** Frekvencijski spektar linijskog napona  $V$

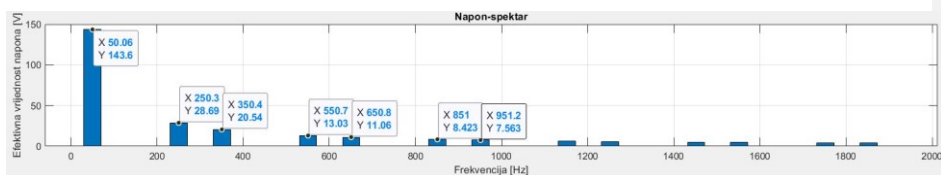
Na slici 6.4.  $X$  predstavlja frekvenciju harmonika, dok  $Y$  njegov iznos. Kako bi se odredilo o kojem se harmoniku radi, frekvencija harmonika se podjeli sa 50, zato što su frekvencije harmonika višekratnici broja 50 te dobiveni broj nakon dijeljenja označava redni

broj harmonika. Prema gore navedenome, moguće je kreirati tablicu 6.1. u kojoj su prikazane efektivne vrijednosti viših harmonika linijskog napona.

**Tablica 6.1.** Tablični prikaz spektralne analize linijskog napona

Redni broj harmonika	Iznos $V(n)$ [V]	Postotna vrijednost harmonika u odnosu na osnovni harmonik %
1	248,78	-
5	49,58	19,93
7	35,63	14,68
11	22,44	9,02
13	19,18	7,71
17	14,43	5,80
19	13,1	5,27

Isti postupak koji je proveden za linijski napon  $V$  se provodi i za fazni napon  $U$  i struju  $I$ .



**Slika 6.5.** Frekvencijski spektar faznog napona

Na slici 6.5 prikazan je frekvencijski spektar faznog napona. Može se primijetiti da efektivne vrijednosti harmonika faznog napona su manje od efektivnih vrijednosti linijskog napona.

**Tablica 6.2.** Efektivne vrijednosti harmonika faznog napona

Redni broj harmonika	Iznos [V]	Postotna vrijednost harmonika u odnosu na osnovni harmonik
1	248,78	-
5	49,58	19,93
7	35,63	14,68
11	22,44	9,02
13	19,18	7,71
17	14,43	5,80
19	13,1	5,27

%

1	143,6	-
5	28,69	19,97
7	20,54	14,3
11	13,03	9,07
13	11,06	7,7
17	8,423	5,87
19	7,563	5,27

Nakon dobivenih efektivnih vrijednosti harmonika linijskog i faznog napona korištenjem sljedećih jednažbi može se odrediti vrijednost ukupnog harmonijskog izobličenja faznog i linijskog napona:

$$THDU = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U(n)^2}}{U(1)} \quad (6-1)$$

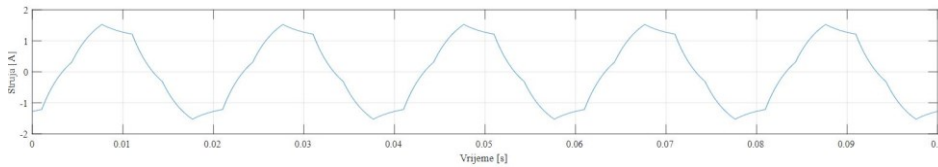
$$THDV = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V(n)^2}}{V(1)} \quad (6-2)$$

Tablica 6.3. prikazuje sve izračunate karakteristične vrijednosti dobivene teorijom, kao i karakteristične vrijednosti dobivene očitanjima iz MATLAB-a.

**Tablica 6.3.** Tablica karakterističnih vrijednosti

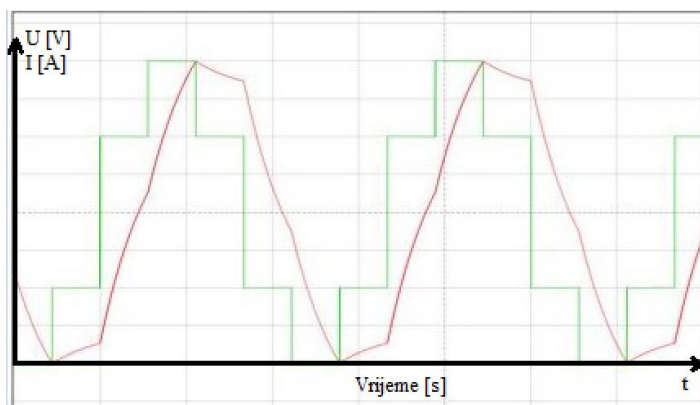
Veličina	Analitički	Emulacija
$U$ [V]	150,84	150,11
$U(1)$ [V]	144,5	143,6
$THDU$ [%]	31,1	27,7
$V$ [V]	261,72	260,88
$V(1)$ [V]	249,5	248,8
$THDV$ [%]	31,07	28,43

Iz dobivene tablice 6.3. može se zaključiti da izračunate vrijednosti faznog i linijskog napona  $U$  i  $V$  te vrijednosti efektivne vrijednosti prvog harmonika faznog i linijskog napona  $U(1)$  i  $V(1)$  odstupaju manje od 1 % što je tehnički prihvatljivo. Ukupno harmonijsko izobličenje  $THDU$  i  $THDV$  odstupa svega nekoliko postotaka. Razlog odstupanja je nesavršenost opreme i malih odstupanja u generiranju upravljačkih impulsa. Također istim postupkom će se prikazati valni oblik struje jedne faze, frekvencijski spektar i iznosi pojedinih harmonika fazne struje (Slika 6.6.).



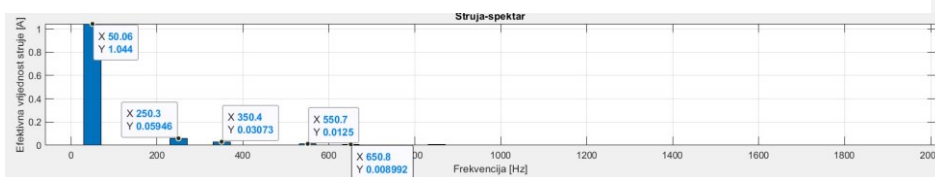
Slika 6.6. Valni oblik struje  $I_a$

Struja na trošilu nije sinusnog oblika (Slika 6.6). Struja ima takav valni oblik jer prati promjenu faznog napona (Slika 6.7.).



Slika 6.7. Tendencija promjene struje o faznom naponu

Frekvencijski spektar struje prikazan je na slici (6.8).



Slika 6.8. Frekvencijski spektar fazne struje

Iz frekvencijskog spektra struje  $I_a$  može se primjetiti da prvi harmonik struje je puno veći od ostalih nadharmonika koji su reda desetak mA. Harmonici iznad trinaestog nisu uzeti pri proračunu  $THDI$ -a jer su veličine reda  $\mu A$ , te zbog toga neće utjecati na konačan rezultat. Prema slici 6.8. napravljena je tablica 6.4.

Tablica 6.4. Tablični prikaz spektralne analize fazne struje

Redni broj harmonika	Iznos [A]	Postotna vrijednost harmonika u odnosu na osnovni harmonik %
1	1,044	-
5	0,05946	5,69
7	0,03073	2,943
11	0,0125	1,19
13	0,008992	0,86

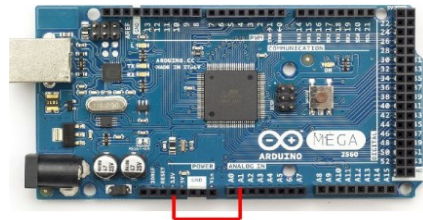
Korištenjem izraza:

$$THDI = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I(n)^2}{I(1)^2}} \quad (6-3)$$

dobije se vrijednost ukupnog harmonijskog izobličenja struje u iznosu od 6,45 %. Dobiveni iznos *THDI*-a je poželjan u praksi jer je valni oblik struje približan sinusnom obliku i neće izazivati velike gubitke pri napajanju izmjeničnih motora. Vrijednost i oblik struje na trošilu, pa tako i *THDI* ovisi o vrsti i simetričnosti trošila. Zbog toga se ne mogu usporediti dobivene vrijednosti *THDI*-a jer je ovo jedan karakteristični slučaj. Također, važno je još primijetiti kako u frekvencijskim spektrima napona i struje nema trećeg harmonika niti njegovih višekratnika jer se oni poništavaju pošto se radi o trofaznom simetričnom sustavu trošila.

## 6.2. Modulacija prostornog vektora

Za simulaciju modulacije prostornog vektora napona koristio se isti model u *Schematic Editoru*-u Typhoon HIL-a jer je razlika između algoritma upravljanja neupravljivog trofaznog izmjenjivača i modulacije prostornog vektora samo u generiranju upravljačkih impulsa pa je potrebno dovesti napajanje na Arduino pločicu prikazano na slici. 6.9. Korištenjem MATLAB skripte može se mijenjati vršna vrijednost prvog harmonika faznog napona i broj sklopnih perioda u jednom sekstantu. Preko Arduino pločice se generiraju upravljački impulsi koji se šalju na modul Typhoon HIL-a. Skripta za generiranje impulsa nalazi se u Prilogu 2. Za broj sklopnih perioda se uvijek uzima neparan broj. Postupak podešavanja parametara emulacije opisan je u poglavlju 6.2.2.



Slika 6.9. Spajanje pinova Arduino pločice

Na Arduino pločici potrebno je bilo na ulaz "A1" konstantno napajanje od 5 V za generiranje upravljačkih impulsa jer kod modulacije prostornog vektora napona neće se mijenjati frekvencija upravljačkih impulsa.

Prije računanja ukupnog harmonijskog izobličenja napona i struje prvo će se prikazati kompletan postupak prolaska prostornog vektora kroz prvi sekstant računajući pritom vremena vođenja ventila.

### 6.2.1. Izračun vremena vođenja sklopnih stanja

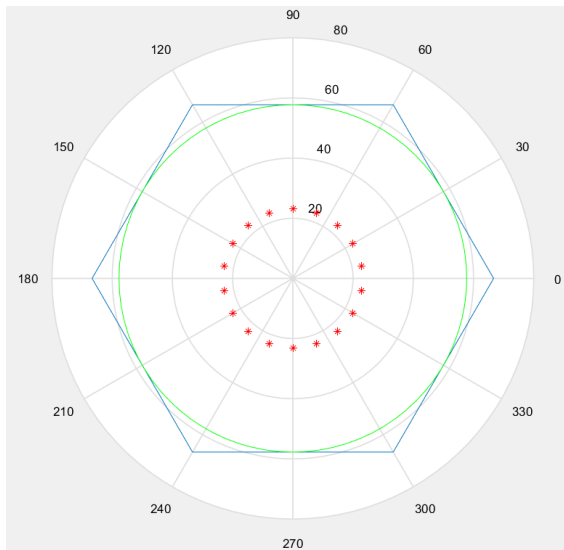
Za prikaz prolaska prostornog vektora uzeti će se da je broj sklopnih perioda u svakom sekstantu jednak 3, dok će vršna vrijednost prvog harmonika biti skalirana na 0,4 od ukupne vrijednosti (tablica 6.8). Drugim riječima, dubina modulacije će biti jednaka  $m_a = 0,4$ . Optimalan obrazac redosljeda sklopnih stanja za prvi sekstant prikazan je u tablici 6.5. Tablica 6.5. je sastavljena prema tablici 3.1.

Tablica 6.5. Redosljed sklopnih stanja za prvi sekstant

Sklopno stanje	Segment	Broj ponavljanja segmenata
V0 (000)	1	1
V1 (100)	2	1
V2 (110)	3	1
V7 (111)	4	2
V2 (110)	5	1
V1 (100)	6	1
V0 (000)	7	1

Iz tablice 6.5 se može primijetiti da za potrebna sklopna stanja najduže vodi ventil  $V1$  (pet segmenata), pa onda ventil  $V3$  (tri segmenta) i na kraju ventil  $V5$  (jedan segment). Uzevši da jedan sekstant ima iznos od  $60^\circ$  el. (odnosno šestinu od ukupne periode, koja ima trajanje od 20 ms, jer je frekvencija jednaka 50 Hz), može se odrediti koliko traje jedan sekstant u vremenskoj domeni. Prema gore navedenom, vrijeme trajanja jednog sekstanta iznosi 3,33 ms. Uzevši u obzir, da je u primjeru uzeto da u sekstantu ima tri sklopne periode, može se zaključiti da vrijeme trajanja svake sklopne periode iznosi 1,11 ms. Stoga, izmjenjivač ostaje u istom sklopnom stanju prilikom prelaska između jednog sekstanta u drugo. Prema slici 4.11

a) može se zaključiti da je prvi sekstant podijeljen na četiri dijela, gdje je svaki dio omeđen zvjezdicama ili zvjezdicom i granicom prelaska u drugi sekstant. Za razmatranje i određivanje vođenja ventila, uzet će se trenutak kada se vrh prostornog vektora nalazi na crvenoj zvjezdici (Slika 6.10.) nakon  $0^\circ$  gledajući obrnuto od smjera kazaljke na satu. Preko zvjezdice može se ucertati položaj i modul prostornog vektora u tom trenutku. Prema slici 6.8. vidi se da prva zvjezdica (odnosno prostorni vektor) je na položaju od  $\varphi_r = 10^\circ$ . Taj vektor se dobije kao linearna kombinacija dvaju vektora napona  $U_1$  (kojeg daje sklopno stanje  $V_1$ ) i vektora napona  $U_2$  (kojeg daje sklopno stanje  $V_2$ ). Vektor  $U_1$  je pod kutom  $0^\circ$ , a vektor  $U_2$  pod kutom  $60^\circ$ . Moduli tih vektora će proporcionalno ovisiti o vremenu vođenja sklopnih stanja. Mijenjanjem vremena vođenja sklopnih stanja mijenjaju se moduli prostornog vektora napona dani sklopnim stanjima  $V_1$  i  $V_2$  na način da se očuva linearnost pri vektorskom zbrajanju. Zbog toga vektor dobiven njihovim vektorskim zbrajanjem je uvijek iste amplitude dok se mijenja njegov fazni pomak. Na taj način vektor kruži i upisuje kružnicu u šesterokutu (Slika 6.10).



**Slika 6.10.** Prikaz razmještaja prostornog vektora

Koristeći se izrazom (4-21) prvo će se odrediti maksimalna amplituda napona koja će se skalirati na  $m_a=0,8$  od početne vrijednosti kako bi se dobio napon  $|U|$ . Pomoću izraza (4-23) može se izračunati omjere vremena trajanja sklopnih stanja  $V_1$  i  $V_2$  u odnosu na ukupni sklopni period  $T_s$ . Postupak određivanja vremena vođenja sklopnih stanja se određuje na sljedeći način (ukoliko se kutevi se zapisuju u  $^\circ$ )

$$U = \frac{\sqrt{3}}{3} E = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot 320 = 184,75 \text{ V}$$

$$|U| = m_a \cdot U = 73,9 \text{ V}$$



$$\frac{T_1}{T_s} = \frac{3}{\sqrt{3}} \frac{|U|}{E} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \varphi_r\right) = \frac{3}{\sqrt{3}} \cdot \frac{73,9}{320} \cdot \sin(60 - 10) = 0,306$$

$$\frac{T_2}{T_s} = \frac{3}{\sqrt{3}} \frac{|U|}{E} \sin(\varphi_r) = \frac{3}{\sqrt{3}} \cdot \frac{73,9}{320} \cdot \sin(10) = 0,06945$$

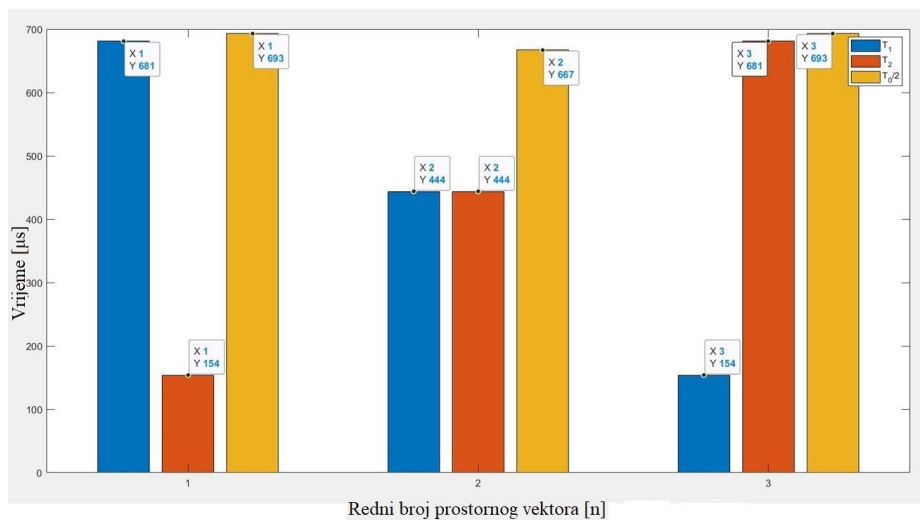
$$t_0 = 1 - \frac{T_1}{T_s} - \frac{T_2}{T_s} = 1 - 0,306 - 0,06945 = 0,62455$$

Ponovi li se postupak za  $\varphi_r = 30^\circ$  i  $\varphi_r = 50^\circ$  dobiju se sljedeći rezultati (tablica 6.6):

**Tablica 6.6.** Omjeri vremena trajanja sklopnih stanja

	$\varphi_r = 10^\circ$	$\varphi_r = 30^\circ$	$\varphi_r = 50^\circ$
$\frac{T_1}{T_s}$	0,306	0,1999	0,06945
$\frac{T_2}{T_s}$	0,06945	0,1999	0,306
$\frac{T_0}{T_s}$	0,62455	0,6002	0,62455

U tablici 6.6.  $T_1$  - vrijeme trajanja sklopnog stanja  $V1$ ,  $T_2$  - vrijeme trajanja sklopnog stanja  $V2$  dok  $T_0$  - vrijeme trajanja sklopnih stanja  $V0$  i  $V7$ .



**Slika 6.11.** Stupčasti prikaz trajanja sklopnih stanja

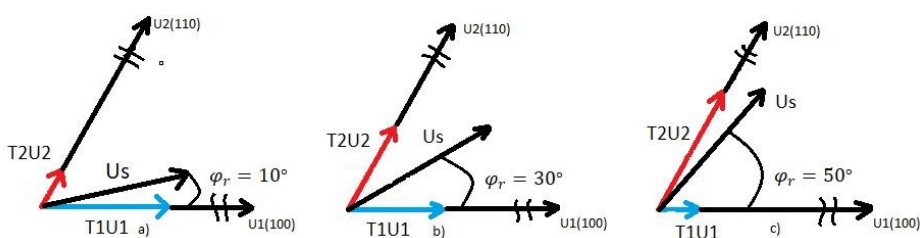
Slika 6.11. je dobivena pokretanjem MATLAB skripte koja grafički iscrtava stupčasti dijagram koji prikazuje vrijeme vođenja pojedinih sklopnih stanja ovisno o zadanim parametrima. Prema rezultatima emulacije prikazanim na slici 6.11. može se provjeriti jesu li dobro određena vremena vođenja ventila za određene kutove  $\varphi_r$ .

**Tablica 6.7.** Izmjerena i izračunata vremena trajanja sklopnih stanja za tri odabrana prostorna vektora u prvome sekstantu

	$T_1[\mu\text{s}]$		$T_2[\mu\text{s}]$		$T_0[\mu\text{s}]$		$T_s[\mu\text{s}]$	
	Rač.	Mj.	Rač.	Mj.	Rač.	Mj.	Rač.	Mj.
$\varphi_r = 10$	679,6	681	154,24	154	1387	1386	2220	2221
$\varphi_r = 30$	444,17	444	444,17	444	1333,6	1334	2221,9	2222
$\varphi_r = 50$	154,24	154	679,6	681	1387	1386	2220	2221

Tablica 6.7. prikazuje izračunate i izmjerene vrijednosti vremena vođenja pojedinih sklopnih stanja. Izračunate vrijednosti se dobiju tako da se zbroje ukupna vremena trajanja izmjerenih sklopnih stanja  $T_1$   $T_2$  i  $T_0$  te preko dobivenih omjera iz tablica 6.6. izračuna se točno vrijeme vođenja sklopnih stanja  $V1$  i  $V2$ . Može se primijetiti da na slici 6.11. vrijeme vođenja  $T_0$  je iskazano kao  $T_0/2$  te pri računanju ukupnog vremena vođenja treba prikazani broj pomnožiti s 2.

Prema tablici 6.7. izračunata i izmjerena vremena vođenja sklopnih stanja u zadanim trenutcima su približno jednaka. Zanimljivo je i za primijetiti pogledavši sliku 6.11. i tablicu 6.6. kako vrijeme vođenja  $T_1$  sklopnog stanja  $V1$  pri kutu  $\varphi_r = 50^\circ$  ima najduže vrijeme vođenja, a  $T_2$  ima najmanje, u odnosu na kutove  $30^\circ$  i  $50^\circ$ . To je zato što komponenta napona prostornog vektora koju daju sklopno stanje  $V1$  je najveća što je prostorni vektor napona bliže kutu  $0^\circ$  dok je komponenta prostornog vektora koju daje sklopno stanje  $V2$  najveća što je prostorni vektor bliže kutu  $60^\circ$ . Na polovici prvog sekstanta, odnosno kada se prostorni vektor napona nalazi na  $30^\circ$ , komponente se vektora  $V1$  i  $V2$  stanja izjednačavaju što se vidi iz vremena vođenja iz tablice 6.6. Ilustracija ovoga nalazi se na slici 6.12.



**Slika 6.12.** Komponente prostornog vektora za a)  $\varphi_r = 10^\circ$ , b)  $\varphi_r = 30^\circ$ , c)  $\varphi_r = 50^\circ$

Slika 6.12. prikazuje vektorski dijagram komponenata vektora napona sklopnih stanja za pojedine trenutke vođenja u prvom sekstantu. Pošto je u primjeru uzet  $m_a = 0,4$ , amplitude pojedinih komponenata vektora napona su puno manje u odnosu na maksimalnu

moguću amplitudu vektora  $U_1$  i  $U_2$ . Zbog preglednosti, mjerilo pri crtanju maksimalnih amplituda vektora  $U_1$  i  $U_2$  nije isto kao pri crtanju dobivenih amplituda vektora  $T1U1$  i  $T2U2$ . Zbog toga su vektori na slici presiječeni s dvije kose crte.

Ponovi li se isti postupak prema izrazima (3-14), proračun se može primijeniti za bilo koji sekstant i bilo koji trenutak unutar sekstanta, s naglaskom da se uvijek uzima neparan broj prostornih vektora po sekstantu. Uzme li se paran broj prostornih vektora, tada kut između susjednih prostornih vektora više nije cijeli broj. Zbog toga, optimalan redoslijed sklapanja nije više moguće slijediti. Također je važno napomenuti da uzimanjem parnog broja prostornih vektora napon na trošilu neće bit savršeno zrcalan preko  $x$  osi. Zbog toga će se pojaviti parni harmonici u spektralnoj analizi [3].

### 6.2.2. Rezultati emulacije

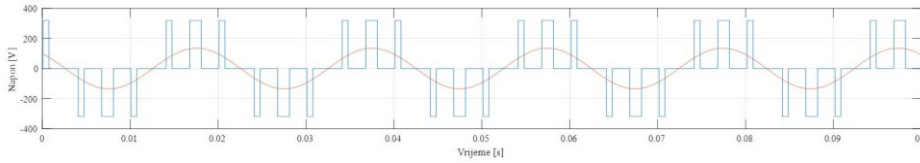
Pri emuliranju modulacije prostornog vektora, mijenjala su se dva parametra. Prvi parametar koji se mijenjao je amplitudni modulacijski indeks  $m_a$ , a drugi parametar je broj prostornih vektora po sekstantu  $n_{sv}$ . Promjenom tih parametara utvrdit će se na koji način oni utječu na izgled valnih oblika faznog i linijskog napona i trofazne struje te njima pripadajući harmonijski sadržaj. Promjenom parametra  $m_a$  mijenjala se vršna vrijednost prvog harmonika faznog napona, dok je drugi parametar bio  $n_{sv}$ , odnosno broj prostornih vektora po sekstantu. Parametri su se mijenjali u MATLAB skripti. Modulacijski indeks  $m_a$  je broj koji množi napon istosmjernog izvora  $E$  u formuli za  $U_{sv}$  u sedmoj liniji koda prikazan u Prilog 3.

Setovi mjerenja provedeni u emulaciji su prikazani tablicom 6.8.

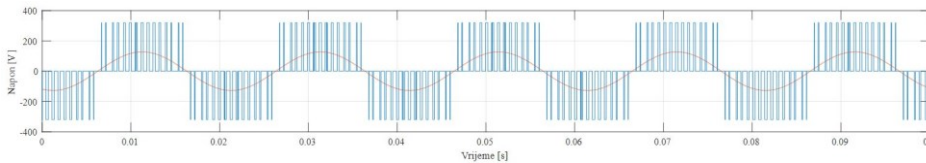
**Tablica 6.8.** Setovi mjerenja emulacije modulacije prostornog vektora

	$m_a$	$n_{sv}$
Prvi set mjerenja	0,4	1
Drugi set mjerenja	0,4	5
Treći set mjerenja	0,8	1

U prvom i drugom setu mjerenja emulacije mijenjat će se broj prostornih vektora  $n_{sv}$  dok će se dubina modulacije držati konstantnom. Na taj način će se utvrditi kako promjena broja prostornih vektora utječe na valne oblike i harmonijski spektar. U drugom setu mjerenja broj prostornih vektora  $n_{sv}$  će se držati konstantnim dok će se mijenjati dubina modulacije  $m_a$ . Na taj način će se utvrditi kako dubina modulacije utječe na izgled valnih oblika i harmonijskog spektra. Slika 6.13. i slika 6.14. prikazuju valni oblik linijskog napona prve faze pri promjeni broja prostornih vektora po sekstantu.

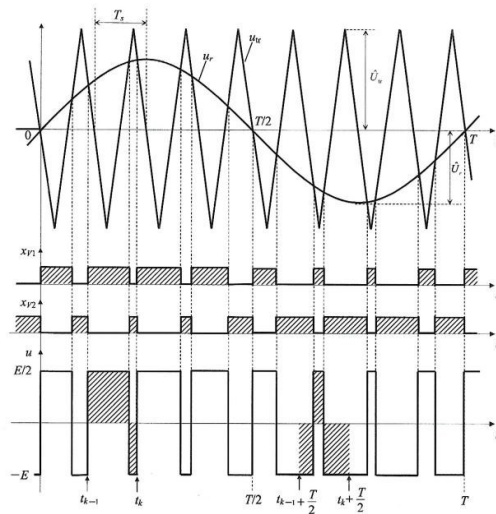


Slika 6.13. Linijski napon  $V m_a=0,4, n_{sv}=1$



Slika 6.14. Linijski napon  $V m_a=0,4, n_{sv}=5$

Vidi se na slikama 6.13. i 6.14. da pri  $n_{sv} = 1$  razmak i širina između pravokutnih impulsa je puno veća nego pri  $n_{sv}=5$ . Voltsekunde koje daje sinusni signal se računaju kao površina ispod sinusne krivulje. Aproximiranjem sinusne krivulje pomoću trokutastih impulsa se vrši na način da se u zadanim vremenskim intervalima odredi površina trokutastih signala, odnosno energija i izjednači se s onom energijom koju u istom vremenskom intervalu daje sinusni signal (Slika 6.15.) [3].



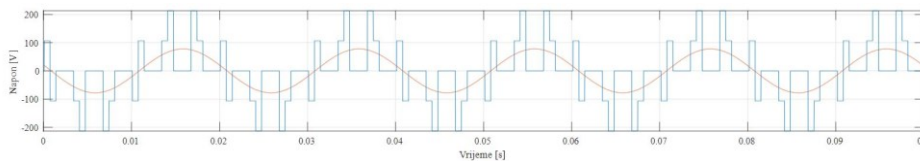
Slika 6.15. Valni oblici upravljačkih signala i napona

Slika 6.15. je korištena samo kao primjer kako aproksimirati voltsekunde pravokutnog i sinusnog signala. Primjeni li se ista logika aproksimiranja sinusnog signala pravokutnim impulsima, može se zaključiti da se modulacija prostornog vektora bazira na sinusnoj modulaciji.

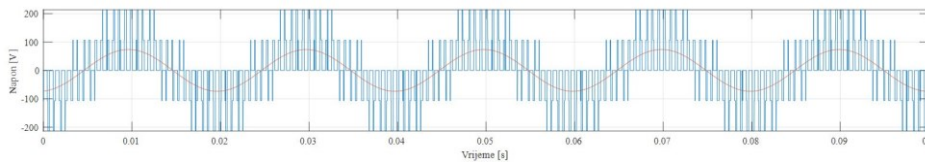
Na slici 6.16. se mogu vidjeti trenutki sklopnih stanja  $V0$  i  $V7$ . Kao što je već ranije rečeno za vrijeme tih sklopnih stanja dolazi do kratkog spoja na trošilu pa zbog toga iznos napona pada na nulu. Kada se sklopno stanje promjeni iz  $V0$  i/ili  $V7$  u neko drugo sklopno stanje tada je napon različit od nule.

**Commented [AB1]:** pripaziti na oznake sklopnih stanja. Treb ići  $V_0$ . Ovo je bitno zbog veće gore navedenog razloga označavanja ventila i linijskih napona.

Slike 6.16 i 6.17 prikazuju valne oblike faznog napona pri promjeni broja prostornih vektora po sekstantu  $n_{sv}$ .



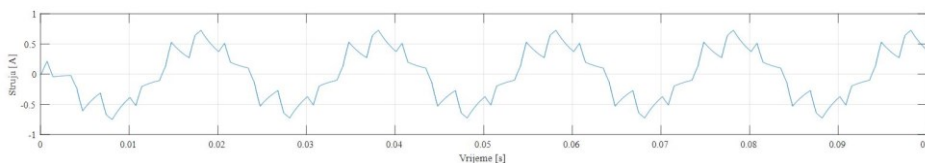
**Slika 6.16.** Fazni napon  $U$   $m_a=0,4$ ,  $n_{sv}=1$



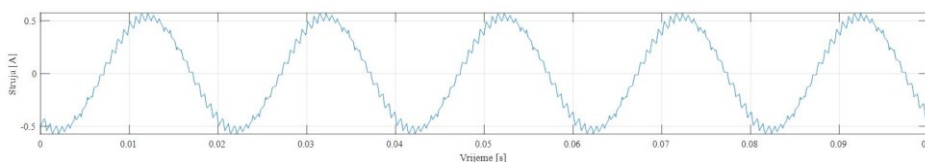
**Slika 6.17.** Fazni napon  $U$   $m_a=0,4$ ,  $n_{sv}=5$

Iz slika 6.16 i 6.17 se vidi da maksimalna vršna vrijednost napona ostaje ista, a povećao se broj presijecanja napona pri  $n_{sv} = 5$ .

Kao i ranije rečeno za linijski napon  $V$ , amplituda pravokutnih signala faznog napona  $U$  se drži konstantnom dok se širina pravokutnih impulsa povećava ili smanjuje. Pošto broj pravokutnih signala koji aproksimiraju sinusni signal za  $n_{sv}=1$  je manji, intervali aproksimacije sinusnog signala su veći pa zbog toga pokrivaju veću površinu što dovodi da proširenja dobivenih pravokutnih signala napona. Slike 6.18 i 6.19 prikazuju valni oblik struje trošila pri promjeni broja prostornih vektora napona u jednom sekstantu  $n_{sv}$ .



**Slika 6.18.** Struja na trošilu  $I$   $m_a=0,4$ ,  $n_{sv}=1$

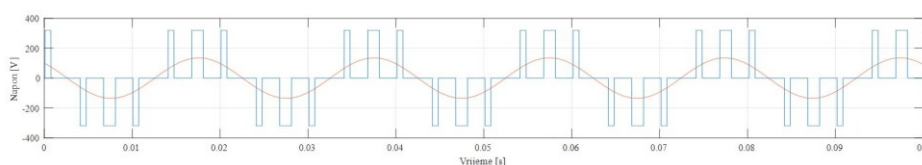


**Slika 6.19.** Struja na trošilu I  $m_a=0,4$ ,  $n_{sv}=5$

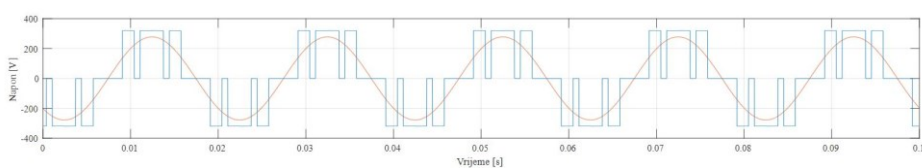
Na slikama 6.18. i 6.19. može se jasno vidjeti oscilacije struje. S povećanjem broja prostornih vektora struja poprima oblik bliži sinusnom, a promjenom sklopne frekvencije mijenja se i impedancija trošila.

Treći set mjerenja se uspoređivao s prvim setom. Mijenjala se vršna vrijednost osnovnog harmonika faznog napona  $U$ , odnosno modulacijski indeks  $m_a$ , a  $n_{sv}$  se držao konstantnim (tablica 6.8.).

Slike 6.20 i 6.21 prikazuju linijski napon pri promjeni modulacijskog indeksa  $m_a$ .



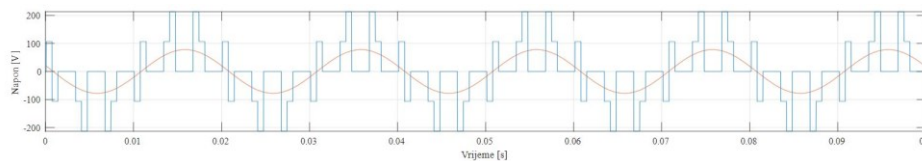
**Slika 6.20.** Linijski napon V  $m_a=0,4$ ,  $n_{sv}=1$



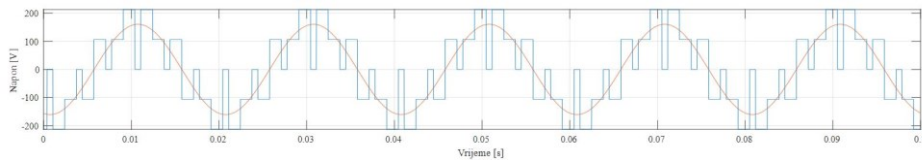
**Slika 6.21.** Linijski napon V  $m_a=0,8$ ,  $n_{sv}=1$

Iz slika 6.20. i 6.21. može se primijetiti da povećanjem dubine modulacijskog indeksa  $m_a$  povećala se vršna vrijednost osnovnog harmonika sinusnog signala. Površina koju zatvara sinusni signal s x-osi je veća pri modulacijskom indeksu  $m_a = 0,8$ . Zbog toga, kako bi se očuvale voltsekunde, širina pravokutnih signala se povećala.

Slike 6.22. i 6.23. prikazuju valno oblik faznog napona  $U$  pri promjeni modulacijskog indeksa  $m_a$ .



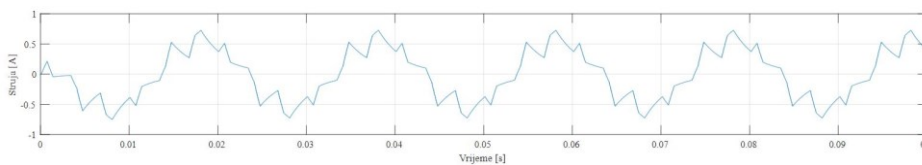
**Slika 6.22.** Fazni napon U  $m_a=0,4$ ,  $n_{sv}=1$



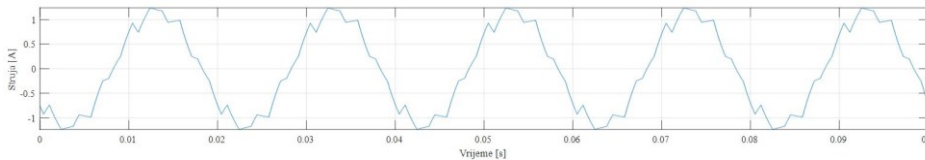
**Slika 6.23.** Fazni napon  $U$   $m_a=0,8, n_{sv}=1$

Iz slika 6.22. i 6.23. može se primjetiti da vrijedi isti zaključak kao i kod linijskog napona.

Slike 6.24. i 6.25. prikazuju valne oblike struje pri promjeni modulacijskog indeksa  $m_a$ .



**Slika 6.24.** Struja  $m_a=0,4, n_{sv}=1$



**Slika 6.25.** Struja  $m_a=0,8, n_{sv}=1$

Na slikama od 6.20 do 6.25. prikazani su valni oblici faznog  $U$  i linijskog  $V$  napona te fazne struje pri promjeni vršne vrijednosti prvog harmonika faznog napona. Došlo je proširenja pravokutnih signala linijskog i faznog napona zato što je pri većoj vrijednosti  $U_{sv}$  potrebno prenijeti veću energiju. Valni oblik struje pri većem  $n_{sv}$  bliži je sinusnom valnom obliku. U nastavku će se odrediti iznos  $THDV$ ,  $THDU$  i  $THDI$  te ih usporediti pri promjeni parametara  $m_a = 0,4$  i  $0,8$  i  $n_{sv} = 1$  i  $5$ . Tablica 6.9 prikazuje redne brojeve harmonika koji se pojavljuju i iznos njihovih efektivnih vrijednosti za sva četiri seta mjerenja za linijski napon  $V$ .

**Tablica 6.9.** Harmonijska analiza linijskog napona

Redni broj harmonika	Linijski napon $V$ [V]			
	$m_a=0,4, n_{sv}=1$	$m_a=0,8, n_{sv}=1$	$m_a=0,4, n_{sv}=5$	$m_a=0,8, n_{sv}=5$
1	95,59	196,7	90,21	180,1
5	48,49	83,02	-	-

7	90,83	64,06	-	-
29	-	-	71,69	61,68
31	-	-	69,61	48,91
THDV	107,7%	53,31%	110,7%	43,56%

Prema tablici 6.9. *THDV* linijskog napona je bio najlošiji kada je vršna vrijednost prvog harmonika napona skalirala na  $m_a = 0,4$ . Tada je vrijednost *THDV* premašivala iznos od 100 %. Takav *THDV* je očekivan, jer je prirodno da će korištenjem modulacijskih tehnika *THDV* biti visok. Ipak, treba uzeti u obzir i to, da su se uzimala samo prva dva dominantna harmonika te su ostali harmonici zanemarili (Slika 6.26.), pa zbog toga se dobije manje ukupno harmonijsko izobličenje od onog dobivenog analitičkom metodom. Ipak, s povećanjem broja prostornih vektora te povećanjem vršne vrijednosti osnovnog harmonika vektora *THDV* se znatno smanjio. Stoga, može se zaključiti da se harmonijsko izobličenje smanjuje na dva načina: Povećanjem amplitude prostornog vektora napona i povećanjem broja sklopnih perioda unutar periode rada.

Slika 6.26. prikazuje zanemarene nadharmonike osim prva dva dominantna nadharmonika.



Slika 6.26. Harmonijski sadržaj linijskog napona

Prema slici 6.26. harmonici koji su se uzimali u obzir pri analizi imaju prikazane efektivne vrijednosti napona i frekvencije (postavljen *Sticker* na figure u programu MATLAB) dok su ostali zanemareni.

Tablica 6.10 prikazuje redne brojeve harmonika koji se pojavljuju i iznos njihovih efektivnih vrijednosti za sva četiri seta mjerenja za fazni napon  $U$ .

Tablica 6.10. Harmonijska analiza faznog napona

Redni broj harmonika	Fazni napon $U$ [V]			
	$m_a = 0,4, n_{sv} = 1$	$m_a = 0,8, n_{sv} = 1$	$m_a = 0,4, n_{sv} = 5$	$m_a = 0,8, n_{sv} = 5$
1	55,03	113,6	52,11	104
5	28,8	48,03	-	-
7	53,07	36,94	-	-
29	-	-	41,51	35,67
31	-	-	40,24	28,14
THDU	109,7%	53,33%	110,9%	43,68%



Prema tablici 6.10. *THDU*-i faznog napona za iste parametre bili su približno jednaki onima od *THDV*. Može se primjetiti da efektivne vrijednosti linijskog napona harmonijskog spektra su za korijen od 3 puta veće u odnosu na efektivne vrijednosti faznog napona harmonijskog spektra.

**Tablica 6.11.** *Harmonijska analiza struje*

Redni broj harmonika	Struja I [A]			
	$m_a=0,4, n_{sv}=1$	$m_a=0,8, n_{sv}=1$	$m_a=0,4, n_{sv}=5$	$m_a=0,8, n_{sv}=5$
1	0,3968	0,8272	0,3797	0,7576
5	0,0633	0,0355	-	-
7	0,0796	0,0721	-	-
29	-	-	0,01523	0,0131
31	-	-	0,01381	0,0096
THDI	25,63%	9,71%	5,41%	2,14%

Prema tablici 6.11. najnepovoljnija vrijednost THDI se postigla pri parametrima  $m_a=0,4, n_{sv}=1$ . dok se najpovoljnija vrijednost postigla pri parametrima  $m_a=0,8, n_{sv}=5$ , što potvrđuje prethodni zaključak da se *THD* općenito modulacijom prostornog vektora može smanjiti skaliranjem vršne vrijednosti napona prostornog vektora i brojem sklopnih perioda rada. Pošto se radi o RL spoju trošila harmonici na višim frekvencijama će zbog proporcionalnosti iznosa impedancije s frekvencijom (a pošto je struja obrnuto proporcionalna impedanciji) dati puno manje efektivne vrijednosti struje pri višim frekvencijama. Odnosno razlog zašto je valni oblik bliže sinusu za veći  $n_{sv}$  je veći broj sklopnih perioda, gdje je aproksimacija voltsekundi napona bliža sinusu kod većeg broja sklopnih perioda, a promjenom sklopne frekvencije mijenja se i impedancija trošila. Zbog toga je izračunato harmonijsko izobličenje struje pri  $n_{sv}=5$  vrlo malo u odnosu na izračunato harmonijsko izobličenje linijskog i faznog napona za iste kombinacije parametara.

Budući da se u mjerenjima mijenjao broj vektora po sekstantu  $n_{sv}$ , mijenjao se i broj segmenata, tj. sklopnih stanja za isti sekstant. Iako ne postoji stroga definicija frekvencijskog modulacijskog indeksa  $m_f$  kod modulacije prostornog vektora napona, ovdje se može povući paralela sa unipolarnom PWM, gdje je frekvencijski modulacijski indeks definiran kao:

$$m_f = \frac{f_s}{f} \quad (6-1)$$

gdje je:  $f_s$ -sklopna frekvencija, a  $f$ -izlazna frekvencija.

Tablica 6.12. će biti poveznica između unipolarnog PWM-a i modulacije prostornog vektora napona za određivanje vrijednosti amplituda harmonika, gdje se preko  $m_f$ -a određuju amplitude harmonika.

**Tablica 6.12.** *Unipolarna pulsno-širinska modulacija: normirane vrijednosti amplituda harmonika*

Red harmonika	Modulacijski indeks $m_a$				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1
1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$2m_f \pm 1$	0,190	0,326	0,370	0,314	0,181
$2m_f \pm 3$		0,024	0,071	0,139	0,212
$2m_f \pm 5$				0,013	0,033
$4m_f \pm 1$	0,163	0,157	0,008	0,105	0,068
$4m_f \pm 3$	0,012	0,070	0,132	0,115	0,009
$4m_f \pm 5$			0,034	0,084	0,119
$4m_f \pm 7$				0,017	0,050

Prema tablicama 6.9. i 6.12. i slici 6.14. mogu se odrediti prva dva dominantna nadharmonika. Naime na slici 6.13. prebroji se broj presijecanja napona u jednoj poluperiodi. U slučaju prema slici 6.13. kada je  $n_{sv}=5$ , broj presijecanja je jednak 15. Tada je prema tablici 6.12. modulacijski omjer frekvencija  $m_f$  jednak 15. Prema tablici za 6.12. red harmonika koji će poprimiti prva dva dominantna je  $30 \pm 1$ , odnosno 29. i 31. nadharmonik. Navedenu tvrdnja se može potvrditi prema tablici 6.9. gdje prva dva dominantna nadharmonika jesu 29. i 31. nadharmonik. Drugi način za određivanje prva dva nadharmonika je preko  $n_{sv}$  i poluperiode. U jednoj poluperiodi ima 3 sekstanta, jer svaki sekstant iznosi  $60^\circ$  pa 3 daju  $180^\circ$ , što je pola periode. Ako je  $n_{sv}=5$ , 5 se pomnoži s 3 te se dobije da je  $m_f=15$ . Nakon što se odredi  $m_f$  postupak se ponavlja ponavlja kao i za prvi način. Kad se odredi  $m_f$ , prema tablici 6.12., mogu se odrediti sve amplitude harmonika za određene modulacijske indekse  $m_a$ . Usporede li se svi  $THD$  od neupravljivog izmjenjivača i modulacije prostornog vektora može se primijetiti da su se  $THDU$  i  $THDV$  povećali dok se  $THDI$  smanjio pri modulaciji prostornog vektora. Struja je pri toj modulaciji vrlo blizu sinusnog oblika i viši harmonici neće izazivati dodatne gubitke pri upravljanju izmjeničnim motorima.

## 7. ZAKLJUČAK

Na temelju dobivenih rezultata moglo se zaključiti da u frekventijskom spektru linijskog i faznog napona te struje nema 3. harmonika zbog simetričnog napona na trošilo sve tri faze. Ukupno harmonijsko izobličenje trofazne struje na trošilu je približno sinusnom obliku.

Odradila su se dva seta mjerenja gdje se jedan parametar držao konstantnim dok se drugi mijenjao. S promjenom modulacijskog indeksa  $m_a$  utvrđeno je da se širina pravokutnih impulsa faznog i linijskog napona povećala što je dovelo do povećanja efektivne vrijednosti svih harmonika. Najviše se povećala efektivna vrijednost prvog harmonika u odnosu na nadharmonike što je dovelo do smanjenja ukupnog harmonijskog izobličenja.

Promjenom broja prostornih vektora po sekstantu promijenio se redni broj prva dva dominantna nadharmonika linijskog i faznog napona za .

Struja je imala najbliži valni oblik sinusnom i najmanje harmonijsko izobličenje s većim indeksom modulacije i većim brojem prostornih vektora po sekstantu, dok su fazni i linijski napon imali veće izobličenje što je sama posljedica korištenja modulacijskih tehnika.

Prema spektralnoj analizi napona i struje modulacije prostornog vektora napona utvrđeno je da broj sklopnih stanja, odnosno broj prostornih vektora po sekstantu, utječe kojeg reda će prva dva dominantna nadharmonika biti.

## Literatura

- [1] B. K. Bose: „Adjustable speed AC drives—A technology status review“, Proceedings of the IEEE, Feb. 1982.
- [2] I. Colak, E. Kabalci, R. Bayindir: „Review of Multilevel Voltage Source Inverter Topologies and Control Schemes“, Energy Conversion and Management, 2011.
- [3] I. Flegar: „Elektronički energetska pretvarači“, KIGEN, Zagreb, 2010.
- [4] M. Ugljar: „Implementacija modulacije prostornog vektora na CRIO FPGA platformi“, diplomski rad, Osijek 2018.
- [5] A. Busse, and J. Holtz: „Multiloop control of a unity power factor fast switching AC to DC converter“, 1982 IEEE Power Electronics Specialists conference, Cambridge, MA, USA, 1982,
- [6] N. P. Quang, J. A. Dittrich: „Vector Control of Three-Phase AC Machines“, Springer-Verlag, Berlin, 2015.
- [7] G. Erceg: „Upravljanje elektromotornim pogonima“, Zagreb, 2006.
- [8] P. Vas: „Sensorless Vector and Direct Torque Control“, Oxford University Press, 1998.
- [9] Typhoon HIL help
- [10] Arduino Mega datasheet na linku <http://eprints.polsri.ac.id/4598/8/File%20VIII%20%28Lampiran%29.pdf> pristupljeno 18.3.2021
- [11] MATLAB help manual

## Sažetak

Kroz diplomski rad opisana je analiza rada neupravljivog trofaznog izmjenjivača. Definiran je pojam prostornog vektora te su dani izrazi za određivanje vremena vođenja. Postavljen je optimalan redoslijed uklapanja ventila te je na osnovu optimalnog redoslijeda i danih izraza proračunata vremena vođenja. Opisan je algoritam upravljanja neupravljivim trofaznim izmjenjivačem i modulacija prostornog vektora. Provedena je implementacija algoritma upravljanja neupravljivim trofaznim izmjenjivačem u Typhoon HIL-u te je obavljena analiza rezultata. Također je obavljena implementacija modulacije prostornog vektora na Typhoon HIL platformi te je obavljena analiza rezultata

Ključne riječi: Prostorni vektor, modulacija prostornog vektora, sklopna stanja, algoritam upravljanja, Typhoon HIL, Arduino Mega, MATLAB

## Abstract

Trough this thesis the analysis of the operation of an uncontrollable three-phase inverter is described. The concept of the space vector is described and expressions for switching time calculation are given. Six step and space vector modulation are described. The implementation of six step algorithm in Typhoon HIL was described and the results were analyzed. The implementation of the space vector modulation in Typhoon HIL platform was also described and the results were analyzed.

Keywords: Space vector, space vector modulation, switching states, six step algorithm, Typhoon HIL, Arduino Mega, MATLAB

## PRILOG 1. Algoritam upravljanja trofaznim neupravljivim izmjenjivačem

```
1. /* Frekv min = 29Hz (ADC_value >> 2)
2. *
3. *
4. */
5. char SV_count=0;
6. char SV_pattern[6]={0b00110001, 0b00100011, 0b00101010, 0b00001110,
0b00011100, 0b00010101};
7. int ADC_value;
8. int add_OCRA;
9. ISR (TIMER1_COMPA_vect) {
10. PORTC = SV_pattern[SV_count];
11. //PORTC = ~PORTC;
12. if (SV_count < 5){
13.     SV_count = SV_count + 1;
14. }
15. else{
16.     SV_count = 0;
17. }
18. ADC_value = analogRead(A0); // read ADC conversion result (8 high
bites)
19. set_OCR();
20. }
21.void set_OCR(){
22. add_OCRA = (ADC_value >> 1) + 104; // values for 256 TMR1 prescaler
23. OCR1AH = add_OCRA >> 8;
24. OCR1AL = add_OCRA & 0xff;
25.
26. if((OCR1AH<<8) | OCR1AL) < 104){ // protection of too low OCR value
27.     OCR1AL = 104;
28.     OCR1AH = 0;
29. }
30. }
31. void setup() {
32. // put your setup code here, to run once:
33.
34.     delay(100); //startup delay
35.
36. DDRC = 0xff; // PORTC output
37. DDRF = 0x00000000; // PC0 analog input (A0 - arduino board)
38.
39. sei();// global interrupt enable
40.
41.     ADC_value = analogRead(A0); // read ADC conversion result (8 high
bites)
42.     set_OCR();
43.
44. //TMR1 setup
45. TCCR1A = 0b00000000;
46. TCCR1B = 0b00001100; // CTC on OCRA, prescaler 1/256
47. TIMSK1 = 0b00000010; // Interupt enable on compare A
48. }
49.
50. void loop() {}
```

## PRILOG 2. Modulacija prostornog vektora Arduino skripta

```
1. char slovo, nsv_A, nsv_B,prvo_pokretanje=0,SV_bank=0; // SV_bank = 0 A
bank, =1 B bank
2. char state_begin=0, swap_bank = 0;
3. char test=0;
4. char SV_pattern_A [6][60], SV_time_A[720], SV_pattern_B [6][60], 5.
SV_time_B[720];//nsv_max=15 (BITNO !!!!)
6. int serial_count=0, serial_count_limit_1_A=2, serial_count_limit_1_B=2,
7. s erial_count_limit_2_A=2, serial_count_limit_2_B=2, SV_time_count_max_A,
8. SV_time_count_max B, SV_pattern_count=0;
9. int SV_time_count=0,SV_pattern_count_max_A, SV_pattern_count_max_B;

10.char *SV_pattern_pointer_A = &SV_pattern_A[0][0];
11.char *SV_time_pointer_A = &SV_time_A[0];
12.char *SV_pattern_pointer_B = &SV_pattern_B[0][0];
13.char *SV_time_pointer_B = &SV_time_B[0];

14.ISR(TIMER1_COMPA_vect){
15.
16.   if (SV_bank == 0)
17.   {
18.     PORTC = *(SV_pattern_pointer_A + SV_pattern_count);
19.     OCR1AH = *(SV_time_pointer_A + SV_time_count ); //compare high reg
20.     OCR1AL = *(SV_time_pointer_A + SV_time_count + 1); //compare low
reg
21.
22.   }
23.   else
24.   {
25.     PORTC = *(SV_pattern_pointer_B + SV_pattern_count);
26.     OCR1AH = *(SV_time_pointer_B + SV_time_count ); //compare high reg
27.     OCR1AL = *(SV_time_pointer_B + SV_time_count + 1);
28.
29.   }
30.
31.   if( (SV_pattern_count + 1) < SV_pattern_count_max_A && SV_bank == 0)
32.   {   SV_pattern_count++; // Shift SV pattern counter
33.     SV_time_count = SV_time_count + 2; // Shift SV time counter
34.   }
35.   else if( (SV_pattern_count + 1) < SV_pattern_count_max_B && SV_bank
== 1)
36.   {   SV_pattern_count++; // Shift SV pattern counter
37.     SV_time_count = SV_time_count + 2; // Shift SV time counter
38.
39.   }
40.   else
41.   {   SV_pattern_count=0;// Reset SV pattern counter
42.     SV_time_count = 0;// Reset SV time counter
43.
44.     if(serial_count == 0 && swap_bank == 1)
45.     {
46.       if(SV_bank == 1)
47.       {   SV_bank = 0;
48.         }
49.       else
50.       {   SV_bank = 1;
51.         }
52.
53.       swap_bank = 0; // swap finshed
54.     }
55.   }
```

```

56.}
57.
58.
59.void setup() {
60.
61. //digital output setup
62. DDRC = 0b11111111;
63. PORTC = 0;
64.
65. //TMR1 setup
66. TCCR1A = (0 << WGM10) | (0 << WGM11); //
67. TCCR1B = (1 << WGM12) | (0 << WGM13); // CTC mode, TRM1 stoped
68. TIMSK1 = 0b00000010; // CTC interrupt enable
69.
70. //interrupt setup
71. //sei(); // Global interrupt enable
72. //interrupts();
73.
74. //serial init
75. UCSROB = 0;
76. UCSROB = (1<<RXEN0)|(1<<TXEN0);
77. UCSROC = 0b00000111;
78. UCSROA = (0<<U2X0);
79. UBRR0L = 103; // baud register 9600baud (103); 19.2K (51); 28.8K (34);
80.
81. }
82.
83. void loop() {
84. // put your main code here, to run repeatedly:
85. if(UCSR0A & (1<<RXC0))
86. { UCSROA = (0<<RXC0); // data ready reset
87. slovo = UDR0; // read serial
88.
89. while(UCSR0A & (0<<RXC0)){ // pool until data is recived
90. UCSROA = (1<<UDRE0);
91.
92. if(slovo == 'K' && serial_count == 0 && swap_bank == 0)
93. { serial_count = 1; //transmission start
94.
95. }
96. else if(serial_count == 1)
97. {
98. if (SV_bank == 0)
99. { nsv_A = slovo;
100.
101. serial_count_limit_1_A = 24*nsv_A+2;
102. serial_count_limit_2_A = serial_count_limit_1_A +
48*nsv_A;
103.
104. SV_pattern_count_max_A = serial_count_limit_1_A - 2;
105. SV_time_count_max_A = serial_count_limit_2_A -
106.serial_count_limit_1_A;
107. }
108. else
109. { nsv_B = slovo;
110.
111. serial_count_limit_1_B = 24*nsv_B+2;
112. serial_count_limit_2_B = serial_count_limit_1_B +
48*nsv_B;
113.
114. SV_pattern_count_max_B = serial_count_limit_1_B - 2;

```



```

115.          SV_time_count_max_B = serial_count_limit_2_B -
116.serial_count_limit_1_B;
117.      }
118.          serial_count++; //increase serial_count
119.
120.      }
121.      else if(serial_count >= 2 && serial_count <
serial_count_limit_1_A 122.&& SV_bank == 0)
123.      {
124.          *(SV_pattern_pointer_A + serial_count - 2) = slovo;
125.          serial_count++;
126.      }
127.      else if(serial_count >= 2 && serial_count <
serial_count_limit_1_B 128.&& SV_bank == 1)
129.      {
130.          *(SV_pattern_pointer_B + serial_count - 2) = slovo;
131.          serial_count++;
132.      }
133.      else if(serial_count >= serial_count_limit_1_A && serial_count <
134.serial_count_limit_2_A && SV_bank == 0)
135.      {
136.          *(SV_time_pointer_A + serial_count - serial_count_limit_1_A )
= 137.slovo;
138.          serial_count++;
139.      }
140.      else if(serial_count >= serial_count_limit_1_B && serial_count <
141.serial_count_limit_2_B && SV_bank == 1)
142.      {
143.          *(SV_time_pointer_B + serial_count - serial_count_limit_1_B )
= 144.slovo;
145.          serial_count++;
146.      }
147.      else if (slovo == 'K' && serial_count == serial_count_limit_2_A
&& 148.SV_bank == 0 && prvo_pokretanje == 1)
149.      { serial_count = 0; // end of data transmission
150.        swap_bank = 1; // need to swap banks
151.      }
152.      }
153.      else if (slovo == 'K' && serial_count == serial_count_limit_2_B
&& 154.SV_bank == 1 && prvo_pokretanje == 1)
155.      { serial_count = 0; // end of data transmission
156.        swap_bank = 1; // need to swap banks
157.      }
158.      }
159.      else if ( (prvo_pokretanje == 0) && (serial_count ==
serial_count_limit_2_A) && (SV_bank == 0))
160.      { prvo_pokretanje = 1;
161.        serial_count = 0;
162.        SV_pattern_count = 0;
163.        SV_time_count = 0;
164.        //SV_bank = 1; //switch to bank B
165.        //OCR load and TMR1 start
166.        OCR1AL = *(SV_time_pointer_A + SV_time_count + 1); //compare
167.low reg
168.        OCR1AH = *(SV_time_pointer_A + SV_time_count); //compare high
reg
169.        TCCR1B |= (1<<CS11); // clk/8 prescaler
170.        //PORTC = 255;
171.      }
172.
173.

```

```

174.     UDRO = slovo;

175.     while(UCSR0A & (0<<TXC0)){ // pool until data is send
176.         UCSR0A = (0<<TXC0);
177.         UCSR0A = (1<<UDRE0);
178.         //Serial.write(slovo);
179.
180.         UDRO = serial_count ;
181.
182.         while(UCSR0A & (0<<TXC0)){ // pool until data is send
183.             UCSR0A = (0<<TXC0);
184.             UCSR0A = (1<<UDRE0);
185.
186.         }
187.     }

```

### PRILOG 3. MATLAB skripta za mijenjanje parametara modulacije prostornog vektora

```

1. clear all; close all; clc; %Parametri
2. E=100;
3. f=50; %frekvencija magnetskog polja
4. Usv=0.4*E/sqrt(3);
5. Ts=1e-3;
6. nsv=5; %broj space vektora po sekstantu (samo neparni brojevi!!!!
1,3,5,7,...,15)
7. Fosc=16e6/8; % Efektivna frekvencija oscilatora (takt MCU-a)
8. Tu=0; %Vremena porasta/pada ventila
9. if isempty(instrfind)
10.s=serial('COM5','BaudRate',9600,'InputBufferSize',2,'Timeout' ,2);
11. fopen(s);
12. end
13. [vremena,nsv]=ProracunSVM_v2_dsp(E,f,Usv,Ts,nsv,Fosc,Tu);
14. [redosljed,vremena_MCU]=RedosljedSV(vremena,nsv);
15. SerialCommunicationPIC_v1(s,nsv,redosljed,vremena_MCU);
16. Vizualizacija_v1(nsv,redosljed,vremena_MCU,E,Usv,Fosc);
17. fclose(s);
18. delete(s);

```