

# Razvoj sustava za upravljanje jednom granom trofaznog izmjenjivača koristeći CHIL metodologiju na Arduino i TI platformi

---

**Bedeković, Robert**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*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:200:894171>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-02**

*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 diplomski studij Elektrotehnika**

**Razvoj sustava za upravljanje jednom granom trofaznog  
izmjenjivača koristeći CHIL metodologiju na Arduino i TI  
platformi**

**Diplomski rad**

**Robert Bedeković**

**Osijek, 2024.**

# SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD .....  | 1  |
| 2. PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA.....  | 2  |
| 3. MATEMATIČKI MODEL JEDNOFAZNOG IZMJENJIVAČA SA BIPOLARNOM PULSNO-ŠIRINSKOM MODULACIJOM ..... | 3  |
| 3.1. Izmjenjivači.....   | 3  |
| 3.2. Upravljanje.....  | 6  |
| 4. IMPLEMENTACIJA I IZRADA UPRAVLJAČKOG SUSTAVA IZMJENJIVAČA .....                             | 14 |
| 4.1. Princip rada .....  | 14 |
| 4.2. Komponente .....  | 14 |
| 4.3. Shema sklopa.....   | 15 |
| 4.4. Objašnjenje generiranja matrice vremena trajanja impulsa .....                            | 17 |
| 4.5. Pojašnjenje kôda.....   | 20 |
| 4.6. Izrada makete .....   | 24 |
| 4.7. Testiranje rada sklopa.....   | 26 |
| 5. SIMULACIJSKA MJERENJA U MATLAB SIMULINKU.....   | 29 |
| 5.1. Dobivanje upravljačkih signala sa Arduina-a .....   | 35 |
| 5.2. Rezultati simulacije pomoću teorijskih upravljačkih signala.....                          | 36 |
| 5.3. Rezultati simulacije pomoću stvarnih snimljenih upravljačkih signala .....                | 42 |
| 6. TESTIRANJE UPRAVLJAČKOG SUSTAVA IZMJENJIVAČA PREKO TYPHOON HIL-A .....                      | 48 |
| 6.1. Mjerni postav.....  | 48 |
| 6.2. Typhoon HIL model.....  | 50 |
| 6.3. Rezultati HIL simulacija – valni oblici .....   | 54 |
| 6.4. Rezultati HIL simulacija – harmonijska analiza napona.....                                | 56 |
| 6.5. Rezultati HIL simulacija – harmonijska analiza struja .....                               | 57 |

|   |    |
|---|----|
| 6.6. Uspoređivanje dobivenih valnih oblika..... | 60 |
| 7. PRIJEDLOG ZA DORADU MAKETE .....             | 65 |
| 8. ZAKLJUČAK .....                              | 67 |
| LITERATURA.....                                 | 68 |
| SAŽETAK.....                                    | 70 |
| ABSTRACT .....                                  | 71 |
| ŽIVOTOPIS .....                                 | 72 |
| PRILOZI.....                                    | 73 |

## 1. UVOD

Od početka razvoja elektrotehnike kao znanosti, kao problem se javlja kako istosmjernim izvorima napajati izmjenična trošila. Razvojem elektronike kao podgrane elektrotehnike došlo se do rješenja koja su ekonomski i tehnički prihvatljiva. Neka od rješenja zahtijevala su korištenje transformatora koji je skupo i robusno rješenje [1]. Danas se energetska elektronika nalazi u gotovo svemu što nas okružuje, bilo da se radi o sustavima neprekidnog napajanja, proizvodnji električne energije, industriji, telekomunikacijama ili u kućanstvu [2]. Zbog visokih frekvencija rada, danas su svi energetski pretvarači relativno malih dimenzija čime se štedi na cijeni i prostoru. Stupanj djelovanja ovakvih uređaja danas doseže do 99% [3].

Izmjenjivači kao elektronički energetski pretvarači, povezuju istosmjerne izvore i izmjenična trošila i postaju sve bitniji u kontekstu povećanja globalne potražnje za energijom i sve većom pažnjom na održivosti i prelazak na obnovljive izvore energije. Kroz razvoj i inovaciju njihova će uloga svake godine biti sve važnija.

Dostupna maketa u prethodnim radovima [4][5] radila je ispravno samo pri određenim parametrima. Iz tog razloga urađeno je novo upravljanje na Arduino mikrokontroleru. Upravljanje je bipolarna pulsno-širinska modulacija primijenjena na jednoj grani trofaznog autonomnog izmjenjivača u simulacijskim programima MATLAB Simulink i Typhoon HIL te nudi korisniku unos i prikaz odabranih parametara modulacije.

## 2. PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

M. Pavin [4] u svom diplomskom radu opisuje upravljanje trofaznog autonomnog naponskog izmjenjivača pulsno-širinskom modulacijom. Koristi SA828 integrirani krug s kojim dobiva prihvatljive rezultate te predlaže poboljšanje korištenjem Arduino mikrokontrolera.

P. Galić [5] u svom diplomskom radu opisuje upravljanje autonomnog trofaznog naponskog izmjenjivača pulsno-širinskom modulacijom. Za izvršenje upravljanja korišten je Arduino mikrokontroler koji uspoređuje spremljene vrijednosti sinusnog i trokutastog signala. Zbog nedostataka Arduino mikrokontrolera predlaže korištenje drugog mikrokontrolera s više memorije i većom procesorskom moći ili optimizaciju i modifikaciju kôda.

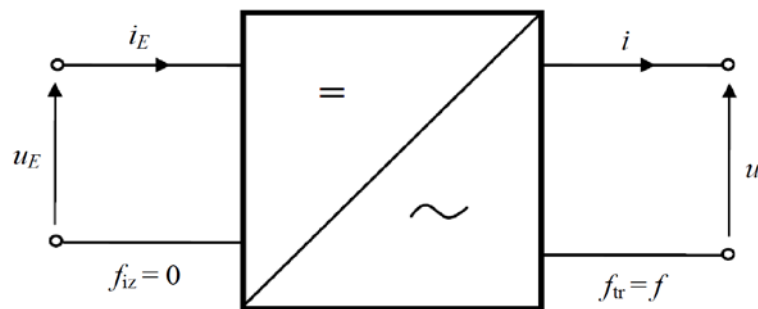
R. Bedeković [6] u svom završnom radu izrađuje maketu i upravljanje autonomnog jednofaznog naponskog izmjenjivača u mosnom spoju pulsno-širinskom modulacijom. Za upravljanje koristi Arduino mikrokontroler sa statički spremljenim tablicama rezultata (eng. *hard-coded values*), odnosno impulsa upravljačkih pinova koji su prethodno izračunati i spremljeni u memoriju. Zaključuje da se korištenjem Arduina lako i jeftino implementira sinusno pulsno-širinska modulacija s unaprijed izračunatim vrijednostima.

S. A. Zulkifli [7] u svom radu je testirao Arduino za upravljanje trofaznim izmjenjivačem. Koristio je Arduino zbog jednostavnog upravljanja i niske cijene. Zaključio je da je MATLAB dobar program za implementiranje sinusno pulsno-širinske modulacije zbog zadovoljavajuće razine programskog jezika i da je moguće Arduinom upravljati kompleksnijim kontrolerom.

### 3. MATEMATIČKI MODEL JEDNOFAZNOG IZMJENJIVAČA SA BIPOLARNOM PULSNO-ŠIRINSKOM MODULACIJOM

#### 3.1. Izmjenjivači

Izmjenjivači su pretvarači energetske elektronike koji povezuju istosmjerni sustav mreže i izmjenični sustav trošila [1]. Najčešća primjena je u elektromotornim pogonima napajanih iz istosmjerne mreže, napajanja u sustavima neprekidnog napajanja ili u sustavima spajanja fotoćelija i ostalih istosmjernih izvora na izmjeničnu napojnu mrežu [1]. Dodatno se primjenjuju u aktivnim filtrima, visokonaponskim istosmjernim mrežama te njihovom povezivanju, fleksibilnim izmjeničnim prijenosnim sustavima (FACTS), električnim automobilima... Na slici 3.1. prikazan je simbol jednofaznog izmjenjivača prikazanog kao dvoprilaz.



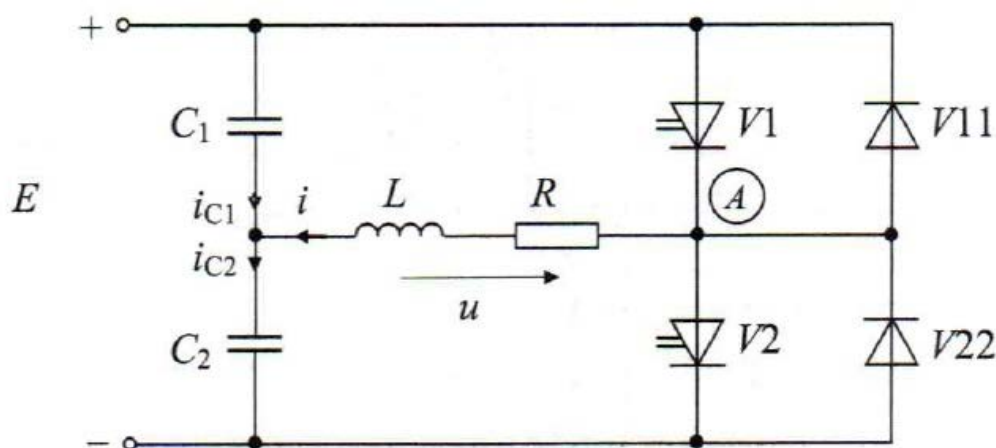
Slika 3.1. Simbol jednofaznog izmjenjivača prikazan kao dvoprilaz

Zahtjev izmjenjivača za pretvaračkim komponentama zadovoljavaju strujno dvosmjerne sklopke ili strujno jednosmjerne sklopke u kombinaciji sa antiparalelnom diodom koja tu kombinaciju također čini strujno dvosmjernom. Pretvaračke sklopke koje zadovoljavaju gornji kriterij su: bipolarni tranzistor (eng. *bipolar junction transistor*) ili kraće BJT, MOSFET (eng. *metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*), JFET (eng. *junction field-effect transistor*), bipolarni tranzistor sa izoliranim gejtom (eng. *insulated-gate bipolar transistor*) ili kraće IGBT, GTO tiristor (eng. *gate turn-off thyristor*)... Od svih navedenih u praksi se najčešće koriste MOSFET-i i IGBT-ovi u kombinaciji sa antiparalelnom diodom zbog najboljih karakteristika.

Izmjenjivači se dijele prema frekvenciji rada; ako zavise o mreži koja im diktira frekvenciju, nazivaju se zavisni, odnosno neautonomni, a ako ne zavise o postojećoj mreži, odnosno izmjenjivač sam sebi definira frekvenciju rada, nazivaju se nezavisni odnosno autonomni. Prema snazi, odnosno broju faza, izmjenjivači se dijele na jednofazne i trofazne. Iduća podjela je prema vrsti izvora pa prema tome izmjenjivači mogu biti strujni i naponski. Posljednja podjela je podjela

prema topologiji spoja. Najčešće korištene topologije su mosni spoj, polumosni spoj i spoj sa srednjom točkom.

U ovom radu koristi se jedna grana trofaznog upravljivog autonomnog izmjenjivača s topologijom polumosnog spoja (eng. *Half-Bridge*) koji je prikazan na slici 3.2. Sastoji se od dvije pretvaračke komponente, u ovom slučaju MOSFET-a koji je modeliran antiparalelnim spojem upravljivog ventila  $V1$  i idealne diode  $V11$ , odnosno antiparalelnim spojem upravljivog ventila  $V2$  i idealne diode  $V22$ .

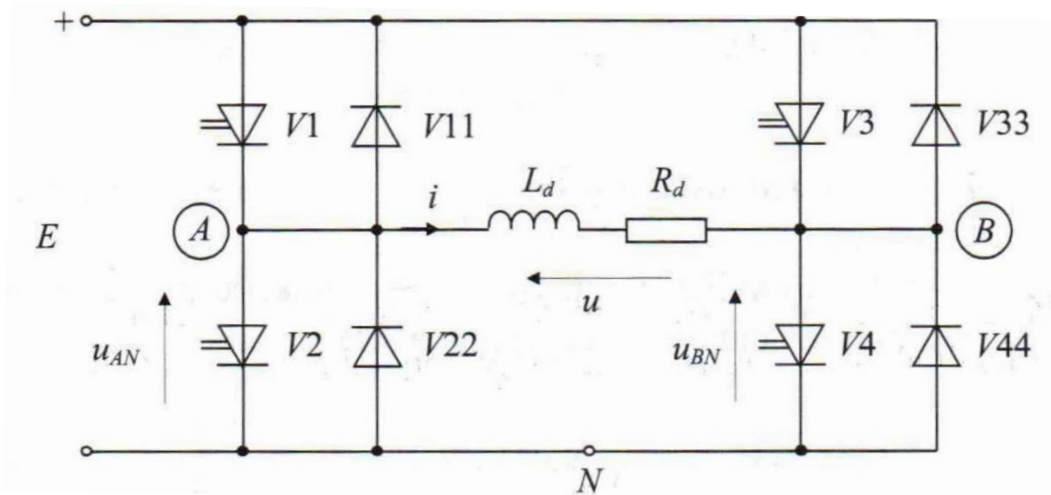


Slika 3.2 Topologija polumosnog spoja autonomnog naponskog izmjenjivača

Uz pretvaračke komponente koriste se dvije pasivne komponente, u ovom slučaju kondenzatori, koji imaju ulogu dijelila napona. Dodatno u shemi postoji istosmjerni naponski izvor i izmjenično trošilo koje je također pasivni element, odnosno serijski spoj radnog otpora i induktiviteta. U simulacijama i mjerenjima korišteno je trošilo od  $800 \Omega$  i  $0.3 \text{ H}$ .

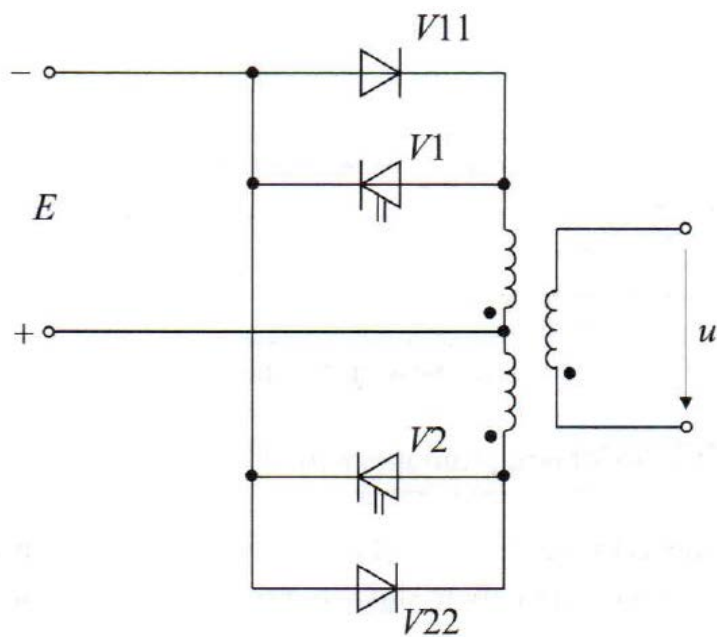
Uz polumosni spoj, postoji još i mosni spoj (eng. *full-bridge*) prikazan na slici 3.3. koji umjesto dva kondenzatora kao u polumosnom spoju koristi dodatne dvije pretvaračke komponente. Prednost takve vrste spoja je puni napon izvora na trošilu za razliku od polumosnog spoja na kojem se javlja 50 % napona izvora na trošilu zbog jednakog omjera kapacitivnosti na naponskom djelilu. Mana mosnog spoja je manji stupanj djelovanja u odnosu na polumosni spoj. Razlog tome je što kod mosnog spoja u svakom trenutku dva poluvodička ventila vode struju trošila, dok kod polumosnog u svakom trenutku struju vodi samo jedan poluvodički ventil. Zbog tih razloga kod izmjenjivača s nižim nazivnim naponima, kao na primjer  $12 \text{ V}$  i  $24 \text{ V}$ , praksa je koristiti polumosni spoj jer pad napona na poluvodičkim ventilima koji većinom varira između  $1$  i  $3 \text{ V}$  čini značajan udio nazivnog napona te mu značajno narušava stupanj djelovanja [1].





Slika 3.3 Topologija mosnog spoja autonomnog naponskog izmjenjivača

Sljedeća topologija je izmjenjivač u spoju sa srednjom točkom prikazan na slici 3.4. Glavni nedostatak ovog spoja je korištenje transformatora s dva primarna namota sa srednjom točkom i jednim sekundarnim namotom. Oba primarna namota moraju biti jednakog omjera, odnosno transformator mora imati omjer  $N : N : 1$  kako bi se osigurala srednja vrijednost napona i struje na trošilu iznosa nula. Dodatni zahtjev je jaka magnetska veza primarnih namota s obzirom da se primarna struja „seli“ između primarnih namota nakon svakog sklapanja. Ova topologija je najmanje korištena zbog puno nedostataka koje je teško savladati dok ne nudi gotovo nikakve prednosti u odnosu na druge topologije.



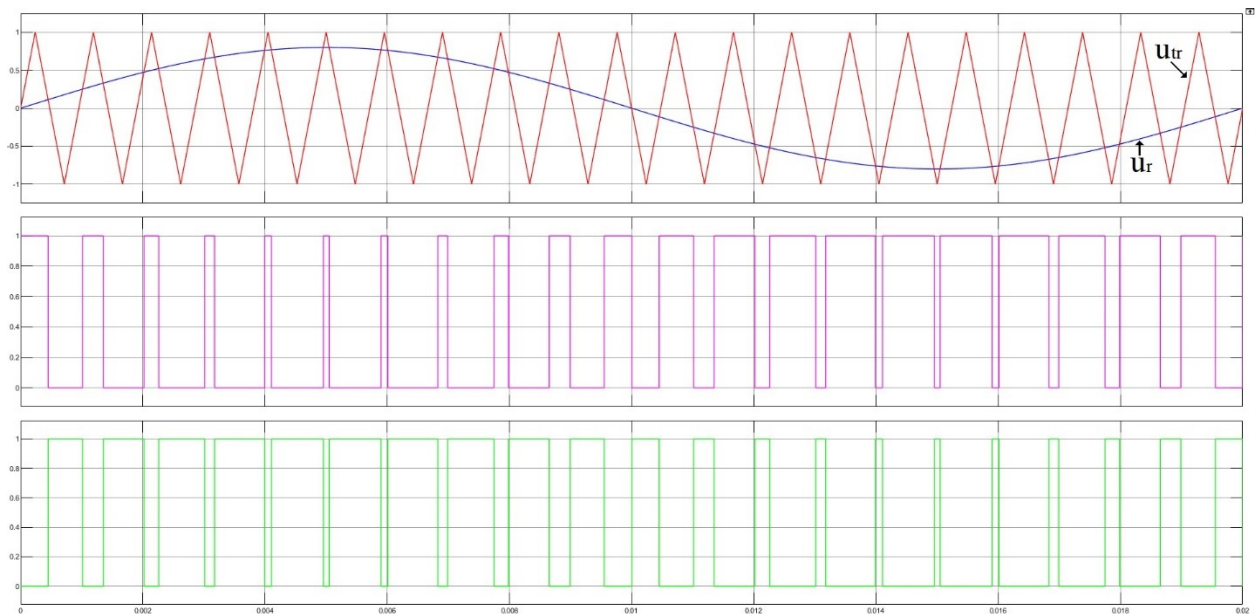
Slika 3.4. Izmjenjivač u spoju sa srednjom točkom

Uz navedene topologije postoje dodatne topologije izmjenjivača, koje se koriste za priključak fotonaponskih elektrana na mrežu, kao što su HERIC topologija izmjenjivača kompanije Sunways koja je poboljšana topologija u odnosu na mosni spoj, H5 topologija kompanije SMA unutar koje vode 3 upravljiva ventila u isto vrijeme, REFU topologija istoimene kompanije, trirazinska NPC topologija kompanije DANFOS, izmjenjivači s plivajućim kondenzatorima, kaskadne veze mostova, tandemski spojevi, matični izmjenjivači i drugi... Svaka od navedenih topologija ima svoje prednosti i mane te se ne može definirati koja je topologija najbolja.

### 3.2. Upravljanje

Pulsno-širinska modulacija (eng. *Pulse-width modulation*) ili kraće PWM je način upravljanja s kojim se postiže da se voltsekunde narinute na trošilo mijenjaju prema unaprijed zadanom zakonu. Način upravljanja prema kojem se gleda mijenjaju li se voltsekunde prema sinusnom zakonu naziva se sinusno pulsno-širinska modulacija [1]. Umjesto dodavanja filtera ispred trošila kojim se smanjuju izlazni harmonici, uz visoku cijenu filtera, veliku masu i fiksiranim kutovima upravljanja što znači da je pretvarač neupravljiv, koristi se bolji način upravljanja ventilima, odnosno pulsno-širinska modulacija. Ovaj način upravljanja omogućuje potpunu upravljivost sklopom koji nema upravljivi izvor uz značajno smanjenje ukupnog harmonijskog izobličenja struje trošila (eng. *Total harmonic distortion*) ili kraće THDI, odnosno prigušenje svih harmonika osim osnovnog bez žrtvovanja upravljivosti [6]. Postoji više vrsta pulsno-širinske modulacije: pravokutna, modificirana pravokutna, unipolarna sinusna, bipolarna sinusna koja je korištena u ovom radu, modulacija prostornog vektora, delta modulacija i druge [1]. Dodatne metode sinusne pulsno-širinske modulacije su sinusna nadmodulacija i modulacija injektiranjem trećeg harmonika kojima se povećava efektivna vrijednost osnovnog harmonika napona na trošilu uz pogoršanje harmoničke distorzije.

Osnovna ideja sinusno pulsno-širinske modulacije je generiranje pravokutnih signala tako da kad se perioda podjeli na  $N$  dijelova, svaka  $N$ -ta površina, odnosno volt-sekunde moduliranog signala budu jednake  $N$ -toj površini odnosno volt-sekundama referentnog signala. Takvi signali se dobivaju usporedbom referentnog sinusnog signala sa visokofrekventnim trokutastim signalom kao što je prikazano na slici 3.5. Točke presjecišta dvaju signala određuju vremena isključivanja i uključivanja pretvaračkih komponenti, u ovom radu MOSFET-a.



Slika 3.5. Karakteristični valni oblici napona i upravljačkih signala za  $m_f = 21$  i  $m_a = 0,8$  pri bipolarnoj SPWM

Ideja modulacije je uzeta iz telekomunikacija. Općenito, modulacija je proces injektiranja izmjeničnog signala niske frekvencije (modulacijske frekvencije) u izmjenični signal visoke frekvencije (prijenosne frekvencije). U ovom slučaju, modulacijska frekvencija željena je frekvencija napona i struje na trošilu, dok je prijenosna frekvencija jednaka sklopnoj frekvenciji autonomnog izmjenjivača [4]. Parametri SPWM su modulacijski faktor  $m_f$  te dubina modulacije odnosno modulacijski indeks  $m_a$ . Modulacijski faktor se definira kao omjer prijenosne frekvencije  $f_0$  i modulacijske frekvencije  $f$ . Dubina modulacije se definira kao omjer amplitude referentnog, odnosno sinusnog napona  $\hat{U}_r$  i amplitude trokutastog napona  $\hat{U}_{tr}$ .

$$m_f = \frac{f_0}{f} \quad (3-1)$$

$$m_a = \frac{\hat{U}_r}{\hat{U}_{tr}} \quad (3-2)$$

Dvije glavne podjele sinusno-pulsno širinske modulacije su unipolarna i bipolarna čiji su upravljački signali prikazani na slikama 3.6. i 3.7. Kod bipolarne modulacije, kad je referentni sinusni signal  $u_r$  veći od trokutastog  $u_{tr}$ , napon na trošilu jednak je polovici napona izvora, a kad je  $u_r$  manji od  $u_{tr}$ , napon na trošilu jednak je negativnoj polovici napona izvora u slučaju topologije polumosnog spoja. Upravljački napon koji se generira bipolarnom SPWM je dvorazinski. Traži se zrcalna simetrija, odnosno jednakosti pozitivnih i negativnih volt-sekundi kako se ne bi pojavljivali parni harmonici. Prema tome modulacijska frekvencija mora biti neparan broj. Iz tablice 3.1. mogu se vidjeti stanja upravljačkih signala, dok se na slici 3.8. mogu vidjeti

karakteristični valni oblici napona i upravljačkih signala za  $m_f = 7$  i  $m_a = 0,75$  pri bipolarnoj SPWM. Kad se perioda rada  $T$  podjeli na  $N$  jednakih dijelova. U  $k$ -toj sklopnoj periodi ( $k=1,2,\dots,N$ ) vrijedi da je:

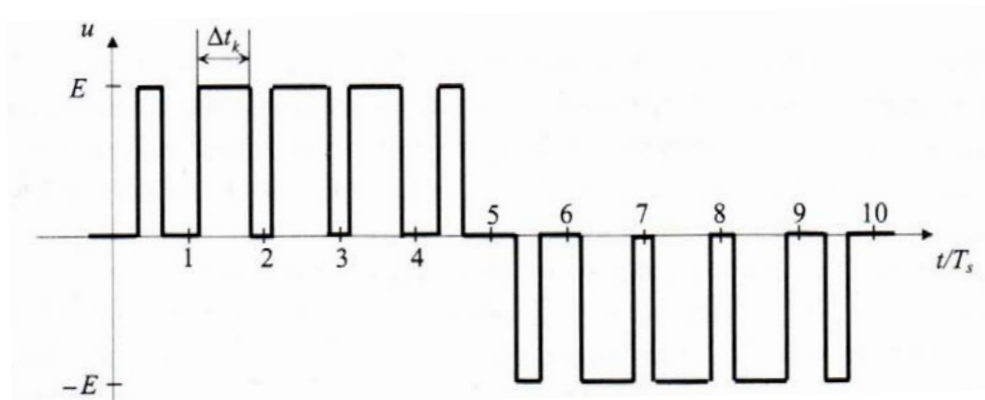
$$x_{v1} = \begin{cases} 1 & t_{k-1} \leq t \leq t_{k-1} + \Delta t_k \\ 0 & t_{k+1} + \Delta t_k \leq t \leq t_k \end{cases} \quad (3-3)$$

Trajanje uklopljenosti  $\Delta t_k$  upravljivog ventila mijenja se prema izrazu:

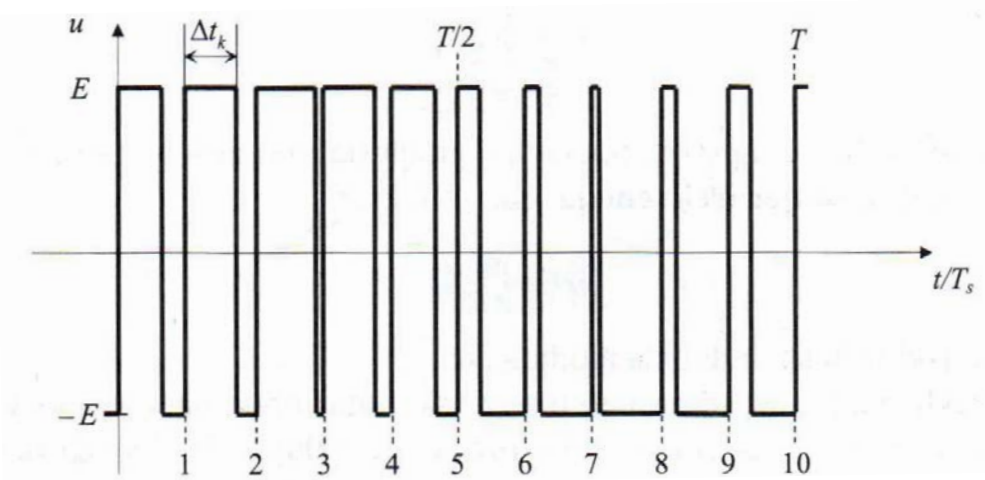
$$\frac{\Delta t_k}{T_s} = \frac{1}{2} (1 + m_a \sin \omega t) \quad t_k - 1 \leq t \quad (3-4)$$

gdje je:

- $x_{v1}$  – stanje upravljačkog ventila
- $\Delta t_k$  – Trajanje uklopljenosti upravljivog ventila
- $T_s$  – sklopna perioda
- $m_a$  – dubina modulacije



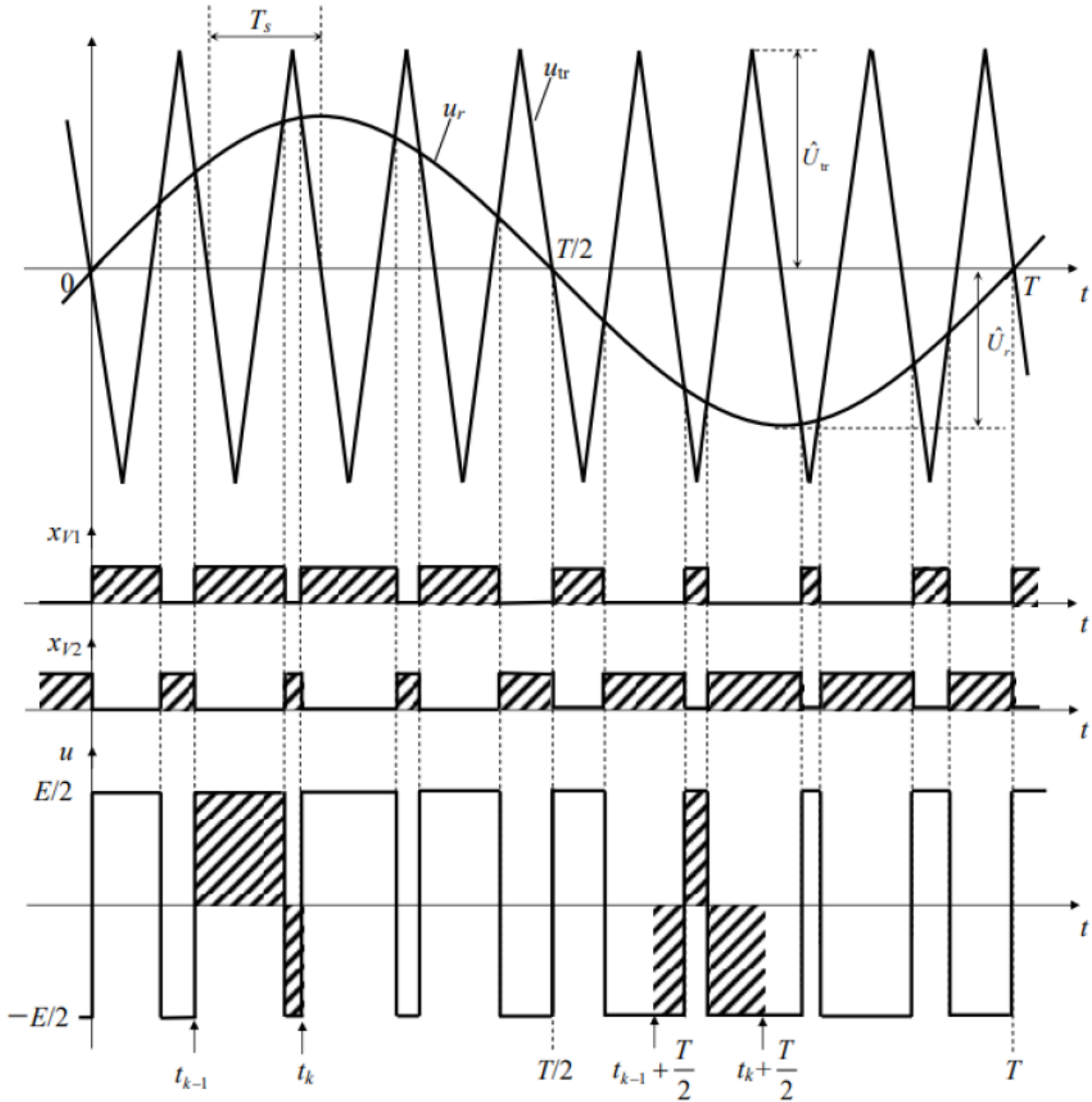
Slika 3.6. Trorazinski valni oblik napona trošila – unipolarna SPWM



Slika 3.7. Dvorazinski valni oblik napona trošila – bipolarna SPWM

Tablica 3.1. Stanja upravljačkih signala kod bipolarne modulacije

|                | $x_{v1}$ | $x_{v2}$ |
|----------------|----------|----------|
| $u_r > u_{tr}$ | 1        | 0        |
| $u_r < u_{tr}$ | 0        | 1        |

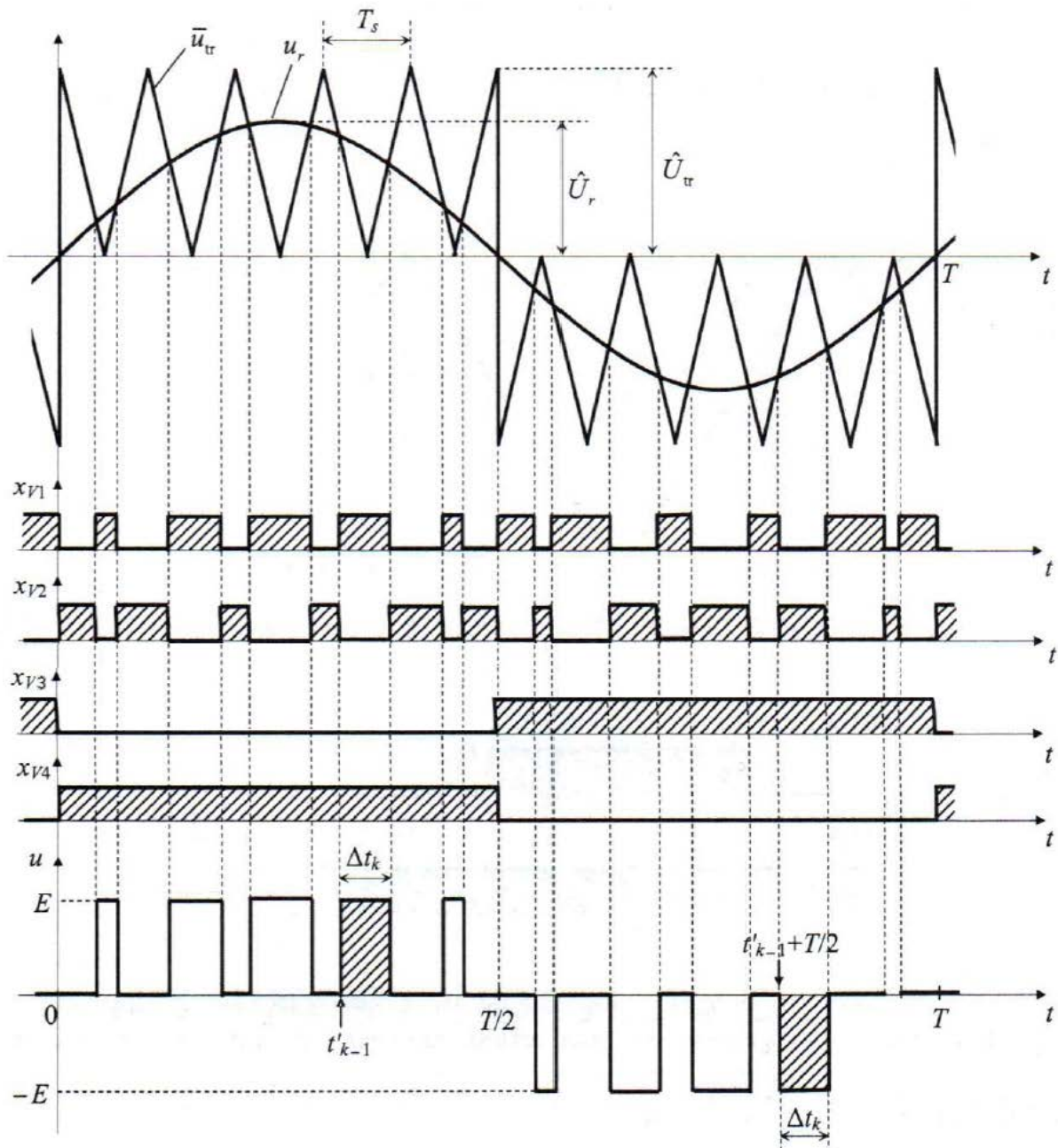


Slika 3.8. Karakteristični valni oblici napona i upravljačkih signala za  $m_f = 7$  i  $m_a = 0,75$  pri bipolarnoj SPWM

Kod unipolarne SPWM osnovni princip rada je, također kao kod bipolarne, usporedba referentnog sinusnog napona  $u_r$  sa sada ispravljenim trokutastim naponom  $\bar{u}_{tr}$  čime se generiraju upravljački impulsi za upravljanje ventila  $V1$  i  $V2$  sa slike 3.3. koji rade protutaktno. Za vrijeme pozitivne poluperiode uklopljen je ventil  $V4$  te je ispravljeni trokutasti napon pozitivan, dok je za vrijeme negativne poluperiode uklopljen ventil  $V3$  sa slike 3.3. te je ispravljeni trokutasti napon negativan. U praksi se upotrebljava zbog manjeg THD-a odnosno boljeg sadržaja viših harmonika u usporedbi sa bipolarnom modulacijom, no ima duplo više upravljačkih signala i ne može se koristiti na svim topologijama izmjenjivača. Također kao i u bipolarnoj modulaciji traži se zrcalna simetrija kako se ne bi pojavljivali parni harmonici. Prema tome traži se paran broj omjera  $T/T_s$  što je uvijek osigurano zbog toga što se ispravljanjem trokutastog napona poduplava sklopna frekvencija. Iz tablice 3.2. mogu se vidjeti stanja upravljačkih signala, dok se na slici 3.9. vide karakteristični valni oblici napona i upravljačkih signala za  $m_f = 5$  i  $m_a = 0,75$  pri unipolarnoj SPWM.

Tablica 3.2. Stanja upravljačkih signala kod unipolarne modulacije

|           |                      | $X_{v1}$ | $X_{v2}$ | $X_{v3}$ | $X_{v4}$ |
|-----------|----------------------|----------|----------|----------|----------|
| $u_r > 0$ | $u_r > \bar{u}_{tr}$ | 1        | 0        | 0        | 1        |
|           | $u_r < \bar{u}_{tr}$ | 0        | 1        |          |          |
| $u_r < 0$ | $u_r > \bar{u}_{tr}$ | 1        | 0        | 1        | 0        |
|           | $u_r < \bar{u}_{tr}$ | 0        | 1        |          |          |



Slika 3.9. Karakteristični valni oblici napona i upravljačkih signala za  $m_f = 5$  i  $m_a = 0,75$  pri unipolarnoj SPWM

Uz unipolarnu i bipolarnu SPWM postoje još sinkrona i asinkrona modulacija. Asinkrona modulacija je modulacija pri kojoj se frekvencija rada kontinuirano mijenja te modulijski omjer frekvencije pri konstantnoj prijenosnoj frekvenciji  $f_0$  može biti necjelobrojan broj. Posljedica toga je pojava subharmonika koji su općenito malih amplituda u usporedbi s harmonicima. Naponski subharmonici mogu uzrokovati dodatna neželjena strujna opterećenja u radno-induktivnim trošilima kao što su motori. Rješenje tog problema je sinkrona modulacija koja mijenja sinkrono prijenosnu frekvenciju  $f_0$  prema frekvenciji rada  $f$  tako da njihov omjer tvori konstantan cijeli broj.

Budući da se iz sheme polumosnog spoja autonomnog naponskog izmjenjivača sa slike 3.2. uočava da napon na trošilu može biti jedino  $+E/2$  ili  $-E/2$ , odnosno ne može biti nula, modulacija koja se tada mora koristiti je bipolarna SPWM.

Zbog pulsno-širinske modulacije javljaju se veliki udjeli harmonijskih članova u naponu trošila (THDU) koji se potiskuju u više harmonike s povećanjem modulacijskog faktora. Harmonici struje dodatno se prigušuju jer se radno-induktivna trošila ponašaju kao nisko propusni filter odnosno više prigušuju harmonike veće frekvencije. Posljedice nesinusne struje na elektromotorima su oscilatorni momenti, povećani gubitci i zagrijavanje motora, buka u pogonu... Normirane vrijednosti amplituda harmonika napona za bipolarnu i unipolarnu SPWM su prikazani u tablici 3.3. i 3.4.

Tablica. 3.3. Bipolarna sinusna pulsno-širinska modulacija: normirane vrijednosti amplituda harmonika  $\hat{U}(n)/(E/2)$  za  $m_f \geq 9$  [2]

| 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     |
| $m_f$         | 1,242                     | 1,15  | 1,006 | 0,818 | 0,601 |
| $m_f \pm 2$   | 0,016                     | 0,061 | 0,131 | 0,22  | 0,318 |
| $m_f \pm 4$   |                           |       |       |       | 0,018 |
| $2m_f \pm 1$  | 0,19                      | 0,326 | 0,37  | 0,314 | 0,181 |
| $2m_f \pm 3$  |                           | 0,024 | 0,071 | 0,139 | 0,212 |
| $2m_f \pm 5$  |                           |       |       | 0,013 | 0,033 |
| $3m_f$        | 0,335                     | 0,123 | 0,083 | 0,171 | 0,113 |
| $3m_f \pm 2$  | 0,044                     | 0,139 | 0,203 | 0,176 | 0,062 |
| $3m_f \pm 4$  |                           | 0,012 | 0,047 | 0,104 | 0,157 |
| $3m_f \pm 6$  |                           |       |       | 0,016 | 0,044 |
| $4m_f \pm 1$  | 0,163                     | 0,157 | 0,008 | 0,105 | 0,068 |
| $4m_f \pm 3$  | 0,012                     | 0,07  | 0,132 | 0,115 | 0,09  |
| $4m_f \pm 5$  |                           |       | 0,034 | 0,084 | 0,119 |
| $4m_f \pm 7$  |                           |       |       | 0,017 | 0,05  |



Tablica. 3.4. Unipolarna sinusna pulsno-širinska modulacija: normirane vrijednosti amplituda harmonika  $\hat{U}(n)/E$  za  $m_f \geq 9$  [2]

| 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     |
| $2m_f \pm 1$  | 0,19                      | 0,326 | 0,37  | 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                     | 0,07  | 0,132 | 0,115 | 0,09  |
| $4m_f \pm 5$  |                           |       | 0,034 | 0,084 | 0,119 |
| $4m_f \pm 7$  |                           |       |       | 0,017 | 0,05  |

Izraz za amplitudu osnovnog harmonika kod bipolarne pulsno-širinske modulacije u polumosnom spoju glasi:

$$U(1) = \frac{E}{2} \cdot m_a \quad (3-5)$$

Izraz za ukupnu harmonijsku distorziju napona glasi:

$$THDU = \sqrt{\frac{U^2}{U^2(1)} - 1} = \sqrt{\frac{2}{m_a^2} - 1} \quad (3-6)$$

Gdje je:

- $U(1)$  – osnovni harmonik napona
- $E$  – napon istosmjernog izvora
- $m_a$  – dubina modulacije
- THDU – ukupna harmonijska distorzija napona
- $U$  – efektivna vrijednost napona

U tablici 3.5. se vidi promjena THDU za različite vrijednosti dubine modulacije bipolarne modulacije

Tablica. 3.5. Promjena THDU za različite vrijednosti  $m_a$  bipolarne modulacije

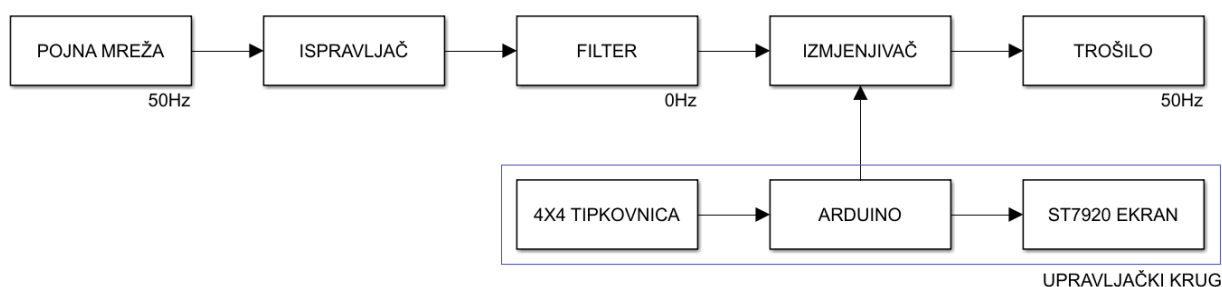
| $m_a$ | 0,4     | 0,6     | 0,8     | 1    |
|-------|---------|---------|---------|------|
| THDU  | 339,12% | 213,44% | 145,77% | 100% |

## 4. IMPLEMENTACIJA I IZRADA UPRAVLJAČKOG SUSTAVA IZMJENJIVAČA

Zadatak diplomskog rada je razviti upravljanje bipolarne pulsno-širinske modulacije jedne grane trofaznog autonomnog izmjenjivača u simulacijskom programu Typhoon HIL i MATLAB Simulink-u, te upravljački algoritam implementirati na Arduino mikrokontroler, uz pomoćni ekran i tipkovnicu, preko pripadajuće razvojne platforme. Posljednje je izrada makete koja se može koristiti za upravljanje postojećeg izmjenjivača razvijenim upravljačkim sustavom.

### 4.1. Princip rada

Na slici 4.1. prikazan je blok dijagram upravljačkog sklopa koji je označen plavim pravokutnikom i postojeći izmjenjivač sa njihovim sastavnim dijelovima.



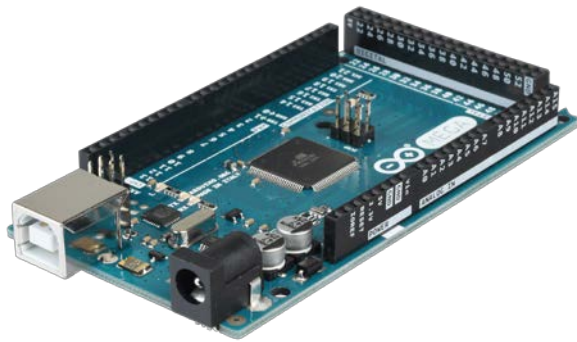
Sl. 4.1. Blok dijagram sklopa

### 4.2. Komponente

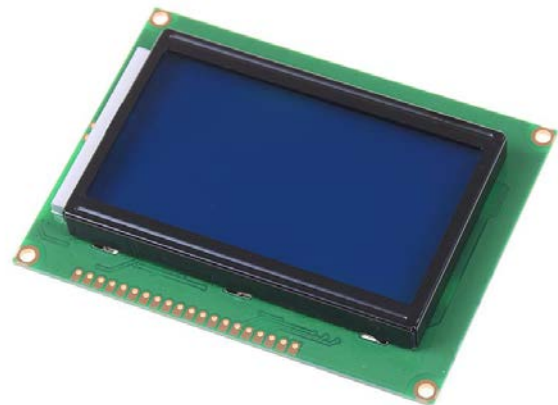
U tablici 4.1. je prikaz korištenih komponenti prilikom izrade sklopa. Trošilo za sve simulacije i mjerenja je serijski spoj otpora od 800  $\Omega$  i induktiviteta od 0.3 H.

Tablica 4.1. Korištene komponente sklopa

| Komponenta     | Vrijednost / ime komponente |
|----------------|-----------------------------|
| Mikrokontroler | Arduino Mega 2560           |
| Ekran          | ST7920                      |
| Tipkovnica     | keypad 4x4                  |
| Konektori      | 6mm                         |
| Kablovi        | Jumperi M-M i M-Ž           |
| LED dioda      | 6mm crvena                  |
| Otpornik       | 220 $\Omega$                |
| Tipkalo        | 6mm crveno                  |



Slika 4.2. Arduino mega 2560



Slika 4.3. LCD ekran ST7920

Arduino Mega 2560 je mikrokontrolerska ploča bazirana na ATmega2560 procesoru. Ima 54 digitalnih ulazno/izlaznih pinova (od kojih se 15 može koristiti kao PWM izlazi), 16 analognih ulaza, 4 UART-a (hardverski serijska porta), kristalni oscilator od 16 MHz, USB priključak, utičnicu za napajanje i ICSP zaglavlje [8]. Od svih Arduino razvojnih ploča jedino Arduino Mega 2560 zadovoljava sve potrebe ovog rada zbog velikog broja potrebnih digitalnih pinova i količine memorije. Arduino Mega 2560 je prikazan na slici 4.2.

ST7920 je LCD ekran rezolucije 128x64 piksela. Na njemu se nalazi 20 pinova, no u ovom radu je korišteno samo 7 (GND, VCC, RS, R/W, E, BLA i BLK). Dimenzije komponente su 93x70x12.5 mm, dok je ekran dimenzije 71.8x40 mm. Izgled ST7920 je prikazan na slici 4.3.

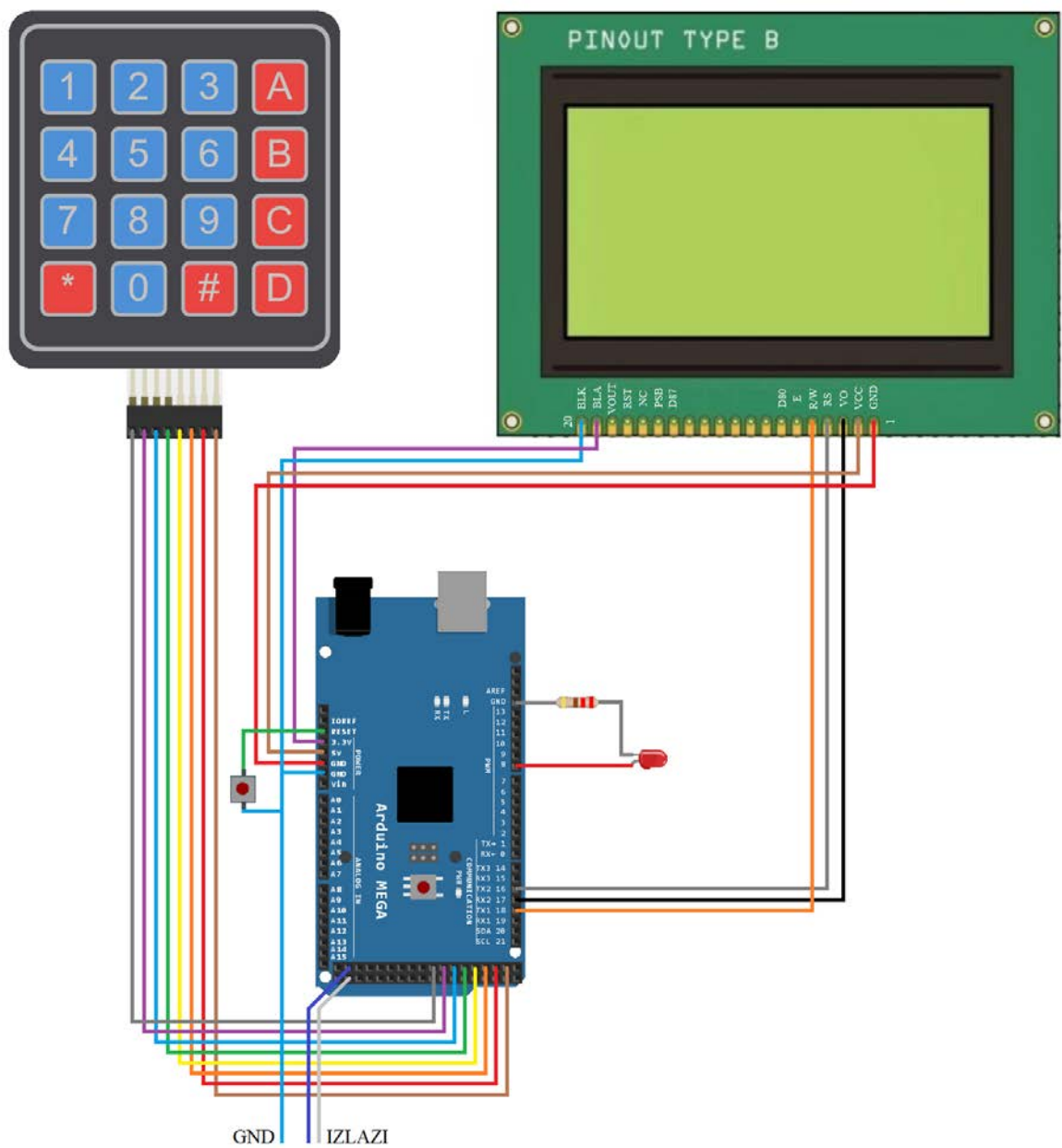
Tipkovnica Keypad 4x4 matrix koristi se za upravljanje programom odnosno odabir parametara modulacije. Tipkovnica se povezuje na Arduino sa 8 pinova od koji su 4 pina za redove, a 4 pina za stupce.

Reset gumb, spojen na reset i GND pin Arduina, služi za hardversko resetiranje programa kad program uđe u loop funkciju iz koje ne može izaći softverskim resetom.

Crvena LED dioda označava pokretanje upravljačkih signala na izlaznim pinovima, koja je strujno zaštićena serijskim spojem otpornika od 220  $\Omega$ .

### 4.3. Shema sklopa

Na slici 4.4. prikazana je shema upravljačkog sklopa.



Slika 4.4. Shema upravljačkog sklopa

U tablici 4.2. prikazano je povezivanje vanjskih komponenti sa Arduino pinovima radi jednostavnosti spajanja.

Tablica 4.2. Povezivanje komponenata sa Arduino pinovima

| Komponente     |         | Arduino pinovi |
|----------------|---------|----------------|
| Ekran          | GND     | GND            |
|                | VCC     | 5V             |
|                | RS      | RX217          |
|                | R/W     | RX216          |
|                | E       | RX118          |
|                | BLA     | 3.3V           |
|                | BLK     | GND            |
| Tipkovnica     | 1       | D22            |
|                | 2       | D24            |
|                | 3       | D26            |
|                | 4       | D28            |
|                | 5       | D30            |
|                | 6       | D32            |
|                | 7       | D34            |
|                | 8       | D36            |
| Reset gumb     | +       | RESET          |
|                | -       | GND            |
| Izlazni pinovi | Izlaz 1 | D52            |
|                | Izlaz 2 | D53            |
| LED i otpornik | A       | D8             |
|                | K       | GND            |

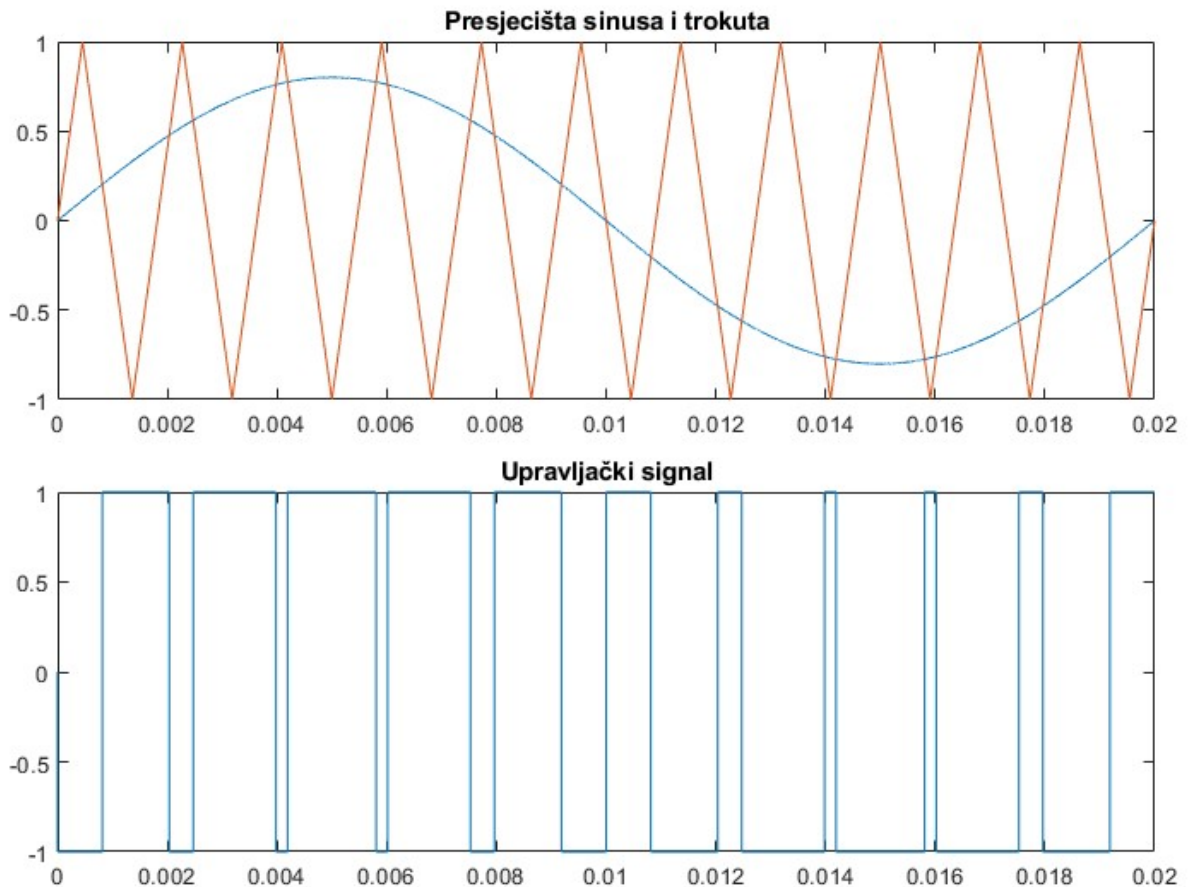
#### 4.4. Objašnjenje generiranja matrice vremena trajanja impulsa

Upravljačka matrica, odnosno niz brojeva koji označavaju vremena trajanja impulsa se generiraju unutar MATLAB skripte koja je prikazana na slici 4.5.

```
Editor - G:\My Drive\FERIT\Diplomski\4. semestar\Diplomski rad\Matlab\skripte\presjecista_sinusa_i_trokuta.m
presjecista_sinusa_i_trokuta.m x +
1      mf = 11;
2      ma = 0.8;
3      T = 0.02;
4      N = 1000000;
5      f=50;
6      t = 0:1/N:T-1/N;
7      trokut = sawtooth(mf*2*pi*f*(t+(f/mf)/(N/100)),1/2);
8      sinus = ma*sin(2*pi*f*t);
9      A = sign(sinus-trokut);
10     tiledlayout(2,1)
11     nexttile
12     plot(t,sinus,t,trokut);
13     title('Presjecišta sinusa i trokuta')
14     nexttile
15     plot(t,A);
16     title('Upravljački signal')
```

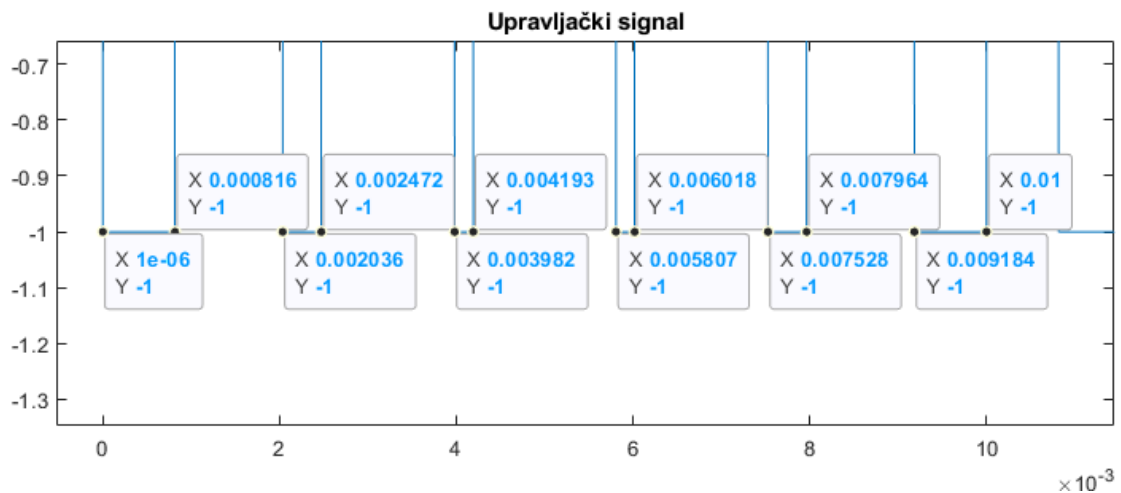
Slika 4.5. MATLAB skripta za generiranje upravljače matrice

Prije pokretanja skripte korisnik prvo unosi parametre dubine modulacije  $m_a$  i modulacijske frekvencije  $m_f$ , dok ostale parametre ne dira. Unutar skripte su definirani parametri: period  $T$ , preciznost, odnosno broj na koji se dijeli signal  $N$  i frekvencija sinusnog signala  $f$ . Generira se jednodimenzionalna matrica vremena  $t$  koja je kreće od '0' do ' $T-1/N$ ' sa korakom od  $N$ , jednodimenzionalna matrica trokut kao funkcija vremena, modulacijskog faktora, frekvencije i preciznosti kako bi se dobio trokutasti signal frekvencije  $m_f$  puta veći od 50 Hz sa pomakom tako da signal kreće od nule. Generira se jednodimenzionalna matrica sinus kao umnožak dubine modulacije i funkcije sinus sa parametrima vremena i frekvencije. Generira se jednodimenzionalna matrica  $A$  koja pomoću 'sign' funkcije sa parametrom razlike sinusa i trokuta vraća vrijednosti '1' ako je razlika sinusa i trokuta veća od '0', u suprotnom vraća vrijednosti '0'. Funkcijom 'plot' se matrice 'sinus', 'trokut' i 'A' prikazuju na ekranu kako bi korisnik vidio njihov oblik i izgled. Izgled gore navedenih matrica prikazan je na slici 4.6. s odabranim parametrima  $m_a = 0.8$  i  $m_f = 11$ .



Slika 4.6. Upravljački signal u slučaju  $m_a = 0.8$  i  $m_f = 11$

Klikom na rubove impulsa na upravljačkom signalu dobivaju se vremena kada se MOSFET uključuje, odnosno isključuje. Dovoljno je uzeti vremena od 0 do pola periode, odnosno 0,01 s pomnožena sa 1000000 kako bi se dobile vrijednosti u mikrosekundama, kao što je prikazano na slici 4.7., budući da se od 0,01 s do 0,02 s vremena trajanja impulsa ponavljaju obrnutim redom s obzirom da je modulacijska frekvencija neparna što stvara neparnu simetriju upravljačkog signala, odnosno simetriju u odnosu na y-os u ovom slučaju postavljenu na vrijednosti  $x = 0,01$  s.



Slika 4.7. Vremena trajanja impulsa

Gore navedene vremenske vrijednosti spremaju se kao niz, odnosno jednodimenzionalna matrica. U slučaju dubine modulacije iznosa 0.8 i modulacijske frekvencije iznosa 11 dobije se: {816, 2036, 2472, 3982, 4193, 5807, 6018, 7528, 7964, 9184, 10000}. U sljedećem nizu se stavljaju vrijednosti razlike sadašnjeg i prošlog elementa s čime se dobije vrijeme trajanja jednog impulsa, u ovom slučaju dobije se: {816, 1220, 436, 1510, 211, 1614, 211, 1510, 436, 1220, 816}. Vrijednost vremena trajanja svakog impulsa se umanjuje za 2 te se između svakog elementa umanjenog za 2 dodaje novi element iznosa 2 koji predstavlja mrtvo vrijeme (eng. *Dead Zone*) u kojem ne vodi niti jedan MOSFET s čime se osigurava da nema kratkog spoja izvora prema slici 3.2. Kad se naprave gornji koraci dobiva se niz: {813, 2, 1218, 2, 434, 2, 1508, 2, 209, 2, 1612, 2, 209, 2, 1508, 2, 434, 2, 1218, 2, 813}. Vremena trajanja impulsa druge poluperiode ponavljaju se obrnutim redom, dodaju se impulsima prve poluperiode te se dobiva finalni niz: {813, 2, 1218, 2, 434, 2, 1508, 2, 209, 2, 1612, 2, 209, 2, 1508, 2, 434, 2, 1218, 2, 813, 2, 813, 2, 1218, 2, 434, 2, 1508, 2, 209, 2, 1612, 2, 209, 2, 1508, 2, 434}.

Budući da je maksimalna dubina modulacije 41 što znači da ima 82 promjene stanja impulsa u upravljačkom signalu uz dodavanje mrtvog vremena između svake promjene, dobije se 164 promjene stanja. Radi lakšeg biranja koji upravljački signal se želi odabrati u kôdu, za svaki signal koji ima manje od 164 sklapanja, u koje spadaju svi signal modulacijske frekvencije 11, 21 i 31, dodaju se nule na kraju niza tako da dužina tog niza iznosi 164. U radu se može odabrati 16 kombinacija različitih parametara dubine modulacije i modulacijske frekvencije, odnosno 4x4 kao prikazano u tablici 4.3. To znači da je duljina jednodimenzionalne matrice 16x164 odnosno 2624 elementa. Svaki element niza odvojen je zarezom.

Tablica 4.3. prikaz svih kombinacija parametara

|                      |                      |                      |                      |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $m_a=0,4$ i $m_f=11$ | $m_a=0,4$ i $m_f=21$ | $m_a=0,4$ i $m_f=31$ | $m_a=0,4$ i $m_f=41$ |
| $m_a=0,6$ i $m_f=11$ | $m_a=0,6$ i $m_f=21$ | $m_a=0,6$ i $m_f=31$ | $m_a=0,6$ i $m_f=41$ |
| $m_a=0,8$ i $m_f=11$ | $m_a=0,8$ i $m_f=21$ | $m_a=0,8$ i $m_f=31$ | $m_a=0,8$ i $m_f=41$ |
| $m_a=1$ i $m_f=11$   | $m_a=1$ i $m_f=21$   | $m_a=1$ i $m_f=31$   | $m_a=1$ i $m_f=41$   |

## 4.5. Pojašnjenje kôda

Cijeli kôd se nalazi u prilogu 1. Početak kôda sadržava „include“ naredbe s kojima se inicijalizira korištena periferija i specijalne naredbe. Nadalje, 'U8g2lib.h' i 'U8x8lib.h' su biblioteke za rad s grafičkim ekranima, a 'SPI.h' i 'Wire.h' su biblioteke za rad s 'SPI' i 'I2C' komunikacijskim protokolima koji se u ovom radu koristi za komunikaciju ekrana s Arduinoom. 'Keypad.h' je



biblioteka za rad s matičnim tipkovnicama te 'Avr/io.h' i 'avr/pgmspace.h' su biblioteke za direktan pristup hardveru. Program započinje definirajući vrijednost varijabli P1 iznosa B00000001, P2 iznosa B00000010 i P0 iznosa B00000000 koje vrijede za cijeli kôd te se njihovom upotrebom smanjuje duljina kôda. Nakon toga izvršava se inicijalizacija ekrana i tipkovnice. Naredba za inicijalizaciju ekrana glasi 'U8G2\_ST7920\_128X64\_F\_SW\_SPI u8g2' sa argumentima koji daju različite parametre vezane za displej i komunikacijske pinove. Prvi argument definira rotaciju ekrana, drugi takt (eng. *Clock*), treći pin koji se koristi za podatkovni signal (eng. *data signal*), četvrti specificira pin koji se koristi za signal odabira čipa (eng. *chip select signal*) i peti specificira pin koji se koristi za resetiranje signala. Tipkovnica se inicijalizira tako da se prvo definira broj redaka i stupaca na matičnoj tipkovnici, u ovom slučaju obje vrijednosti su 4 s obzirom da je tipkovnica 4x4. Zatim se definira matrica 'keys' koja specificira fizički raspored tipki na tipkovnici, gdje svaka tipka ima pripadajuću vrijednost. Definiraju se pinovi Arduina koji su povezani na stupce i redove tipkovnice. Funkcijom 'makeKeymap(keys)' kreira se mapa koja povezuje fizičke tipke s vrijednostima definiranim unutar 'keys' matrice. Objekt 'myKeypad' koristi gornju funkciju zajedno s definiranim redovima i stupcima kako bi se omogućilo čitanje unosa s tipkovnice. Nakon toga definirane su varijable koje će se koristiti u kôdu: ledRed iznosa 8 tipa 'const int' koji predstavlja broj pina na koji je povezana LED dioda, 'ma' i 'mf' tipa 'float' (mf bi mogao biti integer, ali zbog funkcije koja pretvara float u string char-ova je postavljen na float, kako bi se lakše ispisala njegova vrijednost na ekranu), 'val' i 'len' tipa 'int', polje 'SPWM\_time' duljine 164 tipa 'int', char polja 'ma\_x' duljine 4 i 'mf\_x' duljine 3 te char polje 'SPWM\_pin' duljine 164 s ponavljajućim vrijednostima: 'P1, P0, P2, P0'. Posljednja i najvažnija varijabla je niz SPWM duljine 2624 tipa 'const static PROGMEM' koja je definirana i pojašnjena u poglavlju 4.4. unutar koje su definirana trajanja impulsa 'SPWM\_pin'. Ključna riječ PROGMEM se koristi za pohranu podataka u flash memoriju umjesto u SRAM. Pošto većina mikrokotrolera ima ograničenu količinu SRAM-a, ali relativno veliku količinu flash memorije. Korištenjem 'PROGMEM' se može optimizirati program i pohraniti statične podatke unutar flash memorije, čime se oslobađa SRAM za dinamičke varijable koje se mijenjaju tokom izvođenja programa. Definirane su funkcije 'unos\_ma', 'unos\_mf', 'unosMatrice' i 'resetFunc' koja softverski resetira program.

Unutar 'setup' funkcije prvo se koristi 'pinMode' funkcija koja postavlja pin sa danim imenom 'ledRed' na digitalni izlaz. Sljedeće se poziva 'Serial.begin()' funkcija koja inicijalizira serijsku komunikaciju između Arduino mikrokotrolera i ostalih uređaja, u ovom slučaju ekrana. Parametar navedene funkcije je brzina prijenosa podataka u bitovima po sekundi (eng. *baud rate*),

u radu se koristi vrijednost '115200'. Dodatno, može se koristiti parametar 'konfiguracija' (eng. *Config*) koji određuje broj bitova podataka, broj stop bitova i paritet kad se ne koristi taj parametar kao u ovom radu, automatski se podesi na '8N1' konfiguraciju odnosno 8 bitova podataka, 1 stop bit i bez pariteta. Nakon toga koristi se funkcija koja provjerava uspješnost početka komunikacije te ako nije uspostavljena kôd se pauzira 100 ms funkcijom 'delay' dok se ne uspostavi komunikacija. Nakon uspostave serijske komunikacije sa ekranom registar DDRB je podešen na B00000011 kako bi se digitalni pinovi 53 i 52 postavili kao izlazi. Port B sadrži 8 digitalnih pinova koji su redom: D53, D52, D51, D50, D10, D11, D12, D13. Registar PORTB je podešen na B00000000 kako bi digitalni pinovi 53 i 52 na početku i nakon reseta kôda bili postavljeni na 'LOW', odnosno 0 V. Nakon toga, na ekran se ispisuje početni tekst odnosno ispis poruke dobrodošlice. Za ispis se prvo koristi funkcija 'u8g2.begin' s kojom se inicijalizira 'U8g2' biblioteka koja omogućava rad sa ekranima kako bi se mogao koristiti ekran za prikazivanje teksta i grafike. Funkcijom 'u8g2.clearBuffer' se čisti dio memorije u mikrokontroleru gdje se pohranjuju podaci koji se prikazuju na ekranu kako bi se oslobodilo mjesto za novi tekst. Funkcijom 'u8g2.setFont' odabire se font kojim se ispisuje tekst na ekranu, parametar koji se daje toj funkciji je ime fonta koji se želi koristiti. Nadalje, funkcijom 'u8g2.drawStr' se ispisuju tekstualni nizovi na zaslonu. Prvi parametar funkcije je horizontalna koordinata početka niza u pikselima, drugi parametar je vertikalna koordinata početka niza u pikselima, treći parametar je tekstualni niz, odnosno string koji se želi prikazati na ekranu. Funkcijom 'u8g2.drawFrame' se crta okvir debljine jedan piksel, parametri funkcije su redom: početni piksel u x-osi, početni piksel u y-osi, duljina okvira x-osi u pikselima, duljina okvira u y-osi u pikselima. Funkcijom 'u8g2.drawLine' se crta linija, parametri funkcije su redom: početni piksel u x-osi, početni piksel u y-osi, krajnji piksel u x-osi, krajnji piksel u y-osi. Funkcijom 'u8g2.sendBuffer' služi za slanje sadržaja međuspremnika odnosno memorije na zaslon, s time se poboljšava brzina prikaza i izbjegava treperenje. Nakon ispisa početnog zaslona prelazi se na drugi zaslon pritiskom na tipku '#' s tipkovnice. Pozivaju se funkcije 'unos\_ma', 'unos\_mf' i 'unosMatrice'. Nakon njihovog izvršavanja iz niza 'SPWM' unutar niza 'SPWM\_time' funkcijom 'pgm\_read\_word\_near' čitaju se podatci iz flash memorije s mikrokontrolera ovisno o odabiru dubine modulacije i modulacijske frekvencije. Parametar funkcije je pokazivač na lokaciju podatka u flash memoriji koj glasi: 'SPWM+val\*164+j'. SPWM predstavlja prvu vrijednost niza 'SPWM', 'val\*164' predstavlja koji set od 16 zapisanih vrijednosti je odabran unutar funkcije unosMatrice te 'j' predstavlja vrijednost zbog koje se unutar for petlje zapisuje svaka vrijednost odabranog seta od 0 do 163. Funkcijom 'digitalWrite' pali se LED dioda koja indicira pokretanje upravljačkih signala. Posljednje unutar setup funkcije je ispis

posljednjeg zaslona koji govori da se kôd izvršava, koja dubina modulacije i modulacijska frekvencija su odabrane te pritiskom koje tipke se resetira program.

Unutar 'loop' funkcije, za duljinu niza ovisno o odabranoj modulacijskoj frekvenciji odabranoj u funkciji 'odabir\_parametara\_za\_izbor\_vrijednosti\_iz\_SPWM\_matrice' varijablom 'len', registar PORTB se postavlja na vrijednost polja 'SPWM\_pin' koji traje vremenom zapisanim unutar niza 'SPWM\_time' u mikrosekundama. Kad se te dvije funkcije izvrše, broj puta koji je definiran varijablom 'len', što označava jednu periodu signala, kôd unutar loop funkcije se ponavlja beskonačno puta sve dok se ne zaustavi gumbom 'reset'.

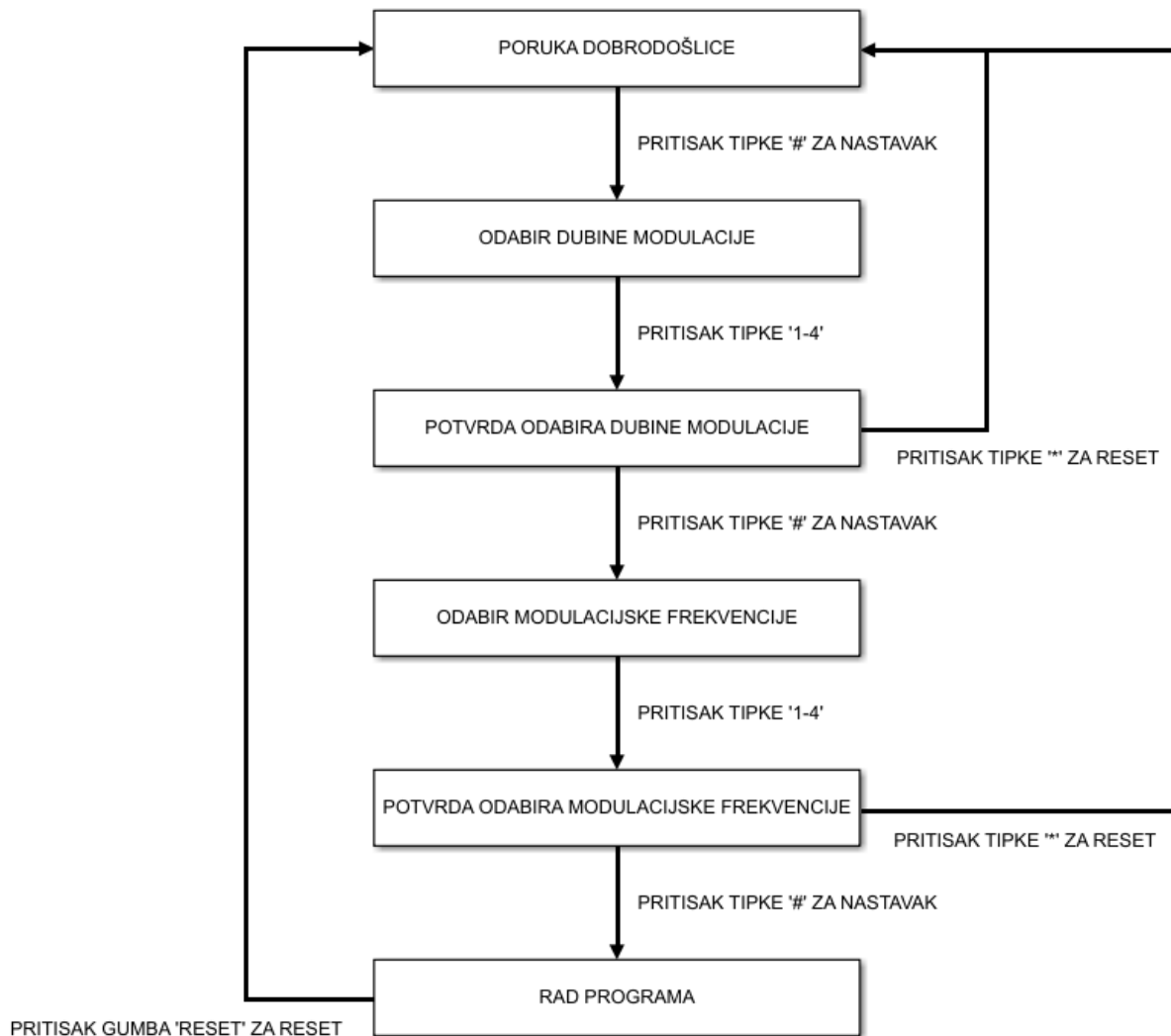
Unutar 'unos\_ma' funkcije prvo se na ekranu ispisuje tekst uputa kako odabrati dubinu modulacije. Pritiskom na gumb '1', dubina modulacije će biti '1', pritiskom na gumb '2', dubina modulacije će biti '0,8', pritiskom na gumb '3', dubina modulacije će biti '0,6', pritiskom na gumb '4', dubina modulacije će biti '0,4'. Funkcijom 'dtostrf' zapisana se 'float' vrijednost dubine modulacije pretvara u 'string' (niz znakova) formatu kako bi se decimalan broj prikazao na ekranu gdje je potrebno formatirati brojeve kao tekst. Prvi parametar funkcije je decimalan broj koji se želi pretvoriti u string, drugi parametar je širina resultantnog stringa u koji spadaju znakovi, brođane vrijednosti i decimalna točka, treći znak je preciznost odnosno broj decimalnih mjesta iza točke, četvrti i zadnji parametar je pokazivač na niz u koji će se smjestiti rezultat. Treba uzeti u obzir da niz bude dovoljno velik kako bi mogao pohraniti cijeli rezultat, uključujući decimalnu točku, znak za negativne brojeve i završni znak niza. Nakon toga se na ekranu ispisuje odabrana dubina modulacije te koju tipku pritisnuti za nastavak programa, a koju za reset. Navedene tipke se nalaze unutar beskonačne petlje kojima je uvjet izlaska iz petlje pritisak određene tipke. Pritiskom tipke '#' izlazi se iz petlje te se program nastavlja sa izvršavanjem, dok pritiskom tipke '\*' poziva se funkcija 'resetFunc' koja softverski resetira kôd.

Logika funkcije 'unos\_mf' potpuno je jednaka kao funkcija 'unos\_ma', no jedina razlika je da kôd funkcije 'unos\_mf' pritiskom na gumb '1', modulacijska frekvencija iznosi '11', pritiskom na gumb '2', modulacijska frekvencija iznosi '21', pritiskom na gumb '3', modulacijska frekvencija iznosi '31', pritiskom na gumb '4', modulacijska frekvencija iznosi '41'.

Unutar funkcije 'unosMatrice' ovisno o odabranoj dubini modulacije i modulacijskoj frekvenciji preko tipkovnice se dobivaju dvije vrijednosti koje nam služe za spremanje vrijednosti unutar niza 'SPWM\_time' kao što je objašnjeno unutar 'setup' funkcije. Vrijednosti 'val' koja se kreće od 0 do 15 označava koja kombinacija 4 dubine modulacije i 4 modulacijske frekvencije je

odabrana. Vrijenost 'len' označava duljinu odabrane kombinacije  $m_a$  i  $m_f$  nakon koje su svi elementi nule dok ne dođe do 164. vrijednosti, nakon koje kreće iduća kombinacija  $m_a$  i  $m_f$ .

Na slici 4.8. prikazan je blok dijagram rada programa.



Slika 4.8. Blok dijagram rada programa

## 4.6. Izrada makete

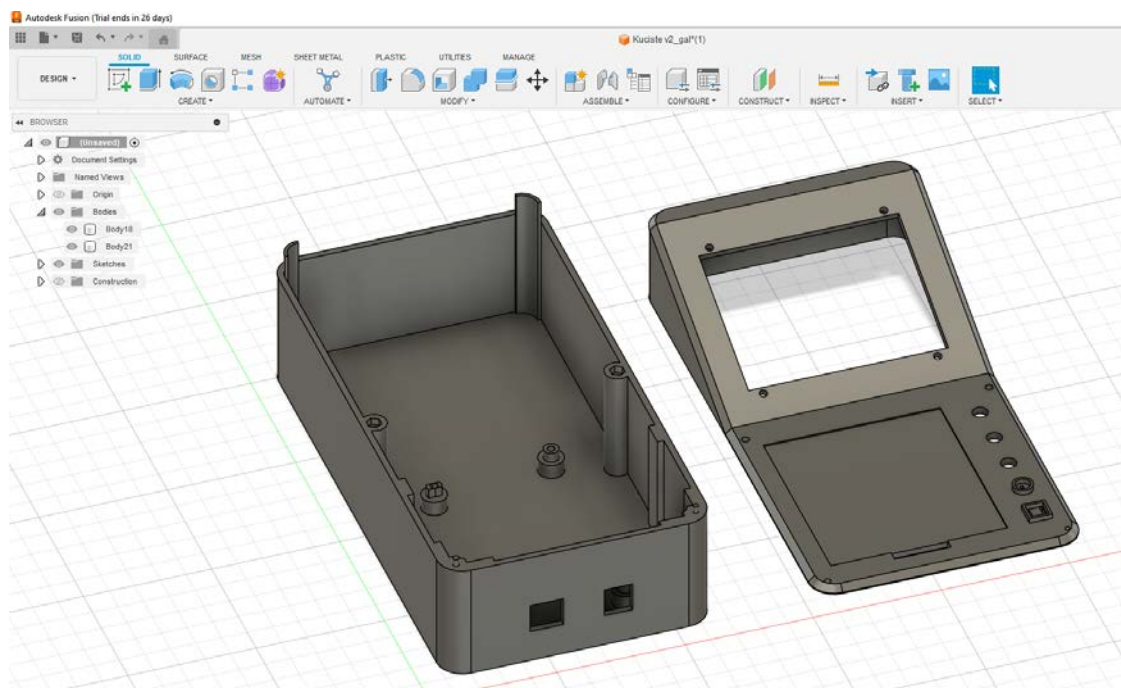
Maketa je spojena prema uputama iz tablice 4.2., za dio spojeva korišteni su „jumperi“, dok je dio žica zalemljeno na komponente. Spojene komponente sklopa su zašaraflljene u 3D printano kućište vijcima promjera 2.5 mm različitih dužina ovisno o komponenti. Kućište je 3D printano s *QIDI Tech Q1 pro* 3D printerom prikazanim na slici 4.9. Korišteni filament za printanje je 'PETG' odnosno Polietilen tereftalat glikol. PETG je termoplastični poliester koji pruža značajnu kemijsku

otpornost, izdržljivost i izvrsnu sposobnost oblikovanja za proizvodnju. PETG se može jednostavno vakuumirati i oblikovati pod pritiskom, kao i toplinski savijati zahvaljujući niskim temperaturama oblikovanja. To ga čini iznimno popularnim za potrošačke i komercijalne primjene koje uključuju 3D printanje ili druge tehnike proizvodnje topline [9].



Slika 4.9. QIDI Tech Q1 pro

3D model je napravljen unutar programa Autodesk Fusion. Fusion je profesionalna CAD/CAM/CAE/PCB platforma za integrirano 3D modeliranje temeljena na oblaku punog opsega koja omogućuje dizajn i izradu bilo čega [10]. Na slici 4.10. prikazan je 3D model kućišta za diplomski rad, dok je na slici 4.11. prikazan sklop postavljen u kućište.



Slika 4.10. 3D model kućišta



Slika 4.11. Finalni izgled sklopa

#### 4.7. Testiranje rada sklopa

Prije pokretanja programa prvo je potrebno dovesti napajanje Arduino mikrokontroleru, a to se vrši preko serijskog USB kabela ili pomoću 'DC jack'-a koji su izvedeni s prednje strane makete. Postoji još i mogućnost napajanja preko 'Vin' i 'GND' pinova, no oni nisu lako dostupni na maketi te se iz tog razloga ne preporuča takvo napajanje. Kad mikrokontroler dobije napajanje, program se pokreće te se na ekranu pojavljuje prvi slajd, odnosno poruka dobrodošlice sa osnovnim podacima o radu i uputama za nastavak.

Kad korisnik odabere tipku '#' pojavljuje se drugi slajd koji traži od korisnika unos dubine modulacije, a mogući odabir je 1, 0.8, 0.6 i 0.4.



Slika 4.12. Poruka dobrodošlice tokom rada sklopa



Slika 4.13. Odabir dubine modulacije tokom rada sklopa

Kad korisnik odabere dubinu modulacije prikaže se treći slajd u kojem se nalazi potvrda odabira dubine modulacije i upute za nastavak programa ili njegov reset.

Ukoliko se odabere reset, pritiskom na tipku '\*' program se softverski resetira i vraća se na prvi slajd. Ukoliko se odabere nastavak programa tipkom '#', otvara se četvrti slajd u kojem se od korisnika traži unos modulacijske frekvencije, a mogući odabir je 11, 21, 31 i 41.



Slika 4.14. Potvrda odabira dubine modulacije tokom rada sklopa



Slika 4.15. Odabir modulacijske frekvencije tokom rada sklopa

Kad korisnik odabere modulacijsku frekvenciju, prikaže se peti slajd u kojem se nalazi potvrda odabira modulacijske frekvencije i upute za nastavak programa ili njegov reset.

Ukoliko se odabere reset, pritiskom na tipku '\*' program se softverski resetira i vraća se na prvi slajd. Ukoliko se odabere nastavak programa, odnosno pokretanje upravljačkih impulsa tipkom '#', otvara se šesti i posljednji slajd te se aktivira vanjska crvena LED-ica koja indicira „puštanje“ upravljačkih signala na digitalne pinove D52 i D53 spojene na vanjske konektore. Na posljednjem slajdu su prikazani odabrani parametri unipolarne sinusno-pulsno-širinske modulacije te upute za ponovni unos parametara. Kad se pritisne crveni vanjski gumb program se hardverski resetira i vraća se na prvi slajd. Razlog korištenja hardverskog reseta je taj da ako bi koristili softverski reset, on bi se morao nalaziti unutar 'loop' petlje što bi značajno poremetilo izgled i tajming izlaznih valnih oblika.



Slika 4.16. Potvrda odabira modulacijske frekvencije tokom rada sklopa

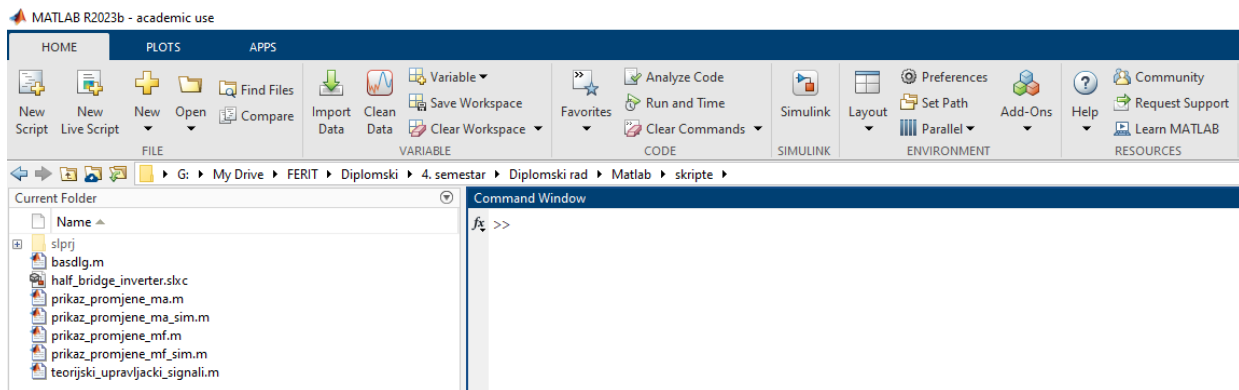


Slika 4.17. Posljednji slajd tokom rada sklopa



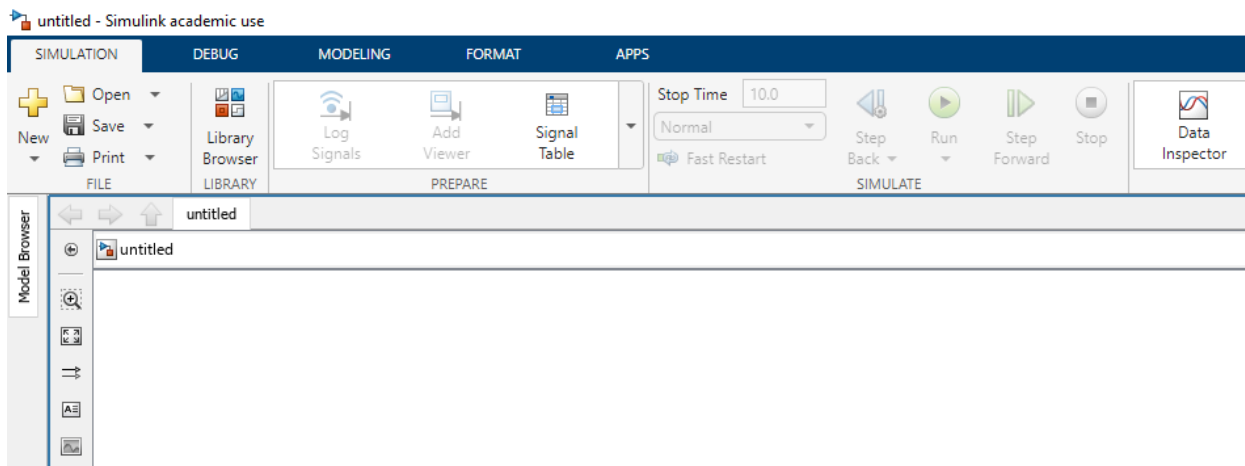
## 5. SIMULACIJSKA MJERENJA U MATLAB SIMULINKU

Za simulaciju je korišten MATLAB Simulink sa svim pripadajućim paketima. MATLAB je programska i numerička računalna platforma koju koriste milijuni inženjera i znanstvenika za analizu podataka, razvoj algoritama i stvaranje modela [11]. Prikaz programa se nalazi na slici 5.1.



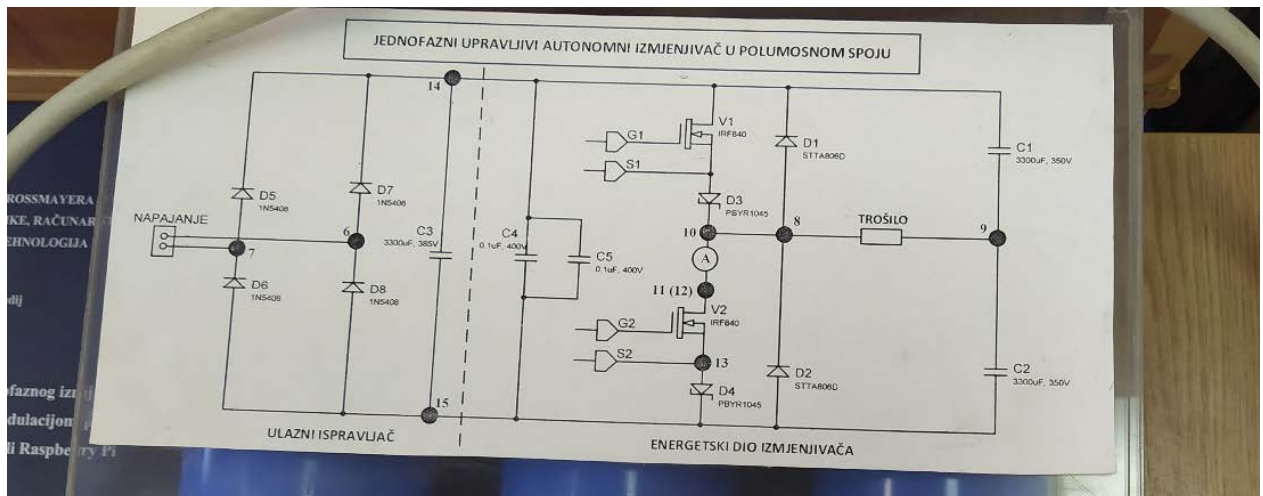
Slika 5.1. prikaz MATLAB-a

Neke od mogućnosti matlaba su istraživanje, modeliranje, analiza i vizualiziranje podataka, stvaranje skripta, funkcija i klasa, izrada desktop i web aplikacije, korištenje MATLAB-a s Pythonom, C/C++, Fortranom, Javom i drugim programskim jezicima, spajanje MATLAB-a na hardver, izvršenje velikih proračuna i paralelnih simulacija pomoću višejezgrenih stolnih računala, GPU-ova, skupine računala i oblaka, rad u okruženjima oblaka od MathWorks Clouda do javnih oblaka uključujući AWS i Azure [11]. On kombinira okruženje radne površine podešeno za iterativnu analizu i procese dizajna s programskim jezikom koji izravno izražava matematiku matrica i polja. MATLAB Simulink je blok dijagram okruženje koje se koristi za projektiranje sustava s višedomenskim modelima, simulaciju prije prelaska na hardver i implementaciju bez pisanja kôda. MATLAB Simulink - od koncepta do rada, kako bi transformirali razvoj složenih sustava, vodeće tvrtke na tržištu usvajaju dizajn temeljen na modelu sustavnim upotrebom modela kroz cijeli proces. Koriste virtualne modele za simulaciju i testiranje sustava rano i često, potvrđuju svoj dizajn fizičkim modelima, testiranjem hardvera u petlji i brzom izradom prototipova, generiranje C, C++, CUDA, PLC, Verilog i VHDL kôd proizvodne kvalitete i postavljanje kôda izravno na svoj ugrađeni sustav, održavanje digitalne niti sa sljedivošću kroz zahtjeve, arhitekturu sustava, dizajn komponenti, kôd i njegovo testiranje, proširenje modela na sustave koji rade za izvođenje prediktivnog održavanja i analize grešaka [12]. Prikaz programa se nalazi na slici 5.2.

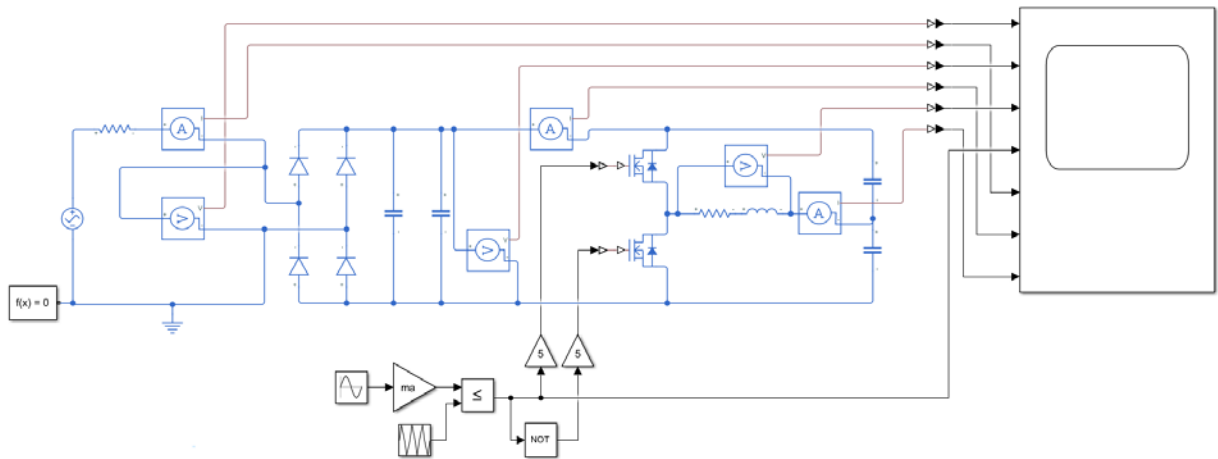


Slika 5.2. prikaz MATLAB Simulinka

Modelirana je shema jedne grane trofaznog upravljivog autonomnog izmjenjivača topologije polumosnog spoja po uzoru na već postojeću maketu koja je prikazana na slici 5.3. Maketa se sastoji od lančanog, odnosno kaskadnog spoja neupravljivog ispravljača i upravljivog polumosnog izmjenjivača. Model pretvarača sa teorijskim upravljačkim signalima unutar Simulinka prikazan je na slici 5.5.



Slika 5.3. Shema s makete pretvarača

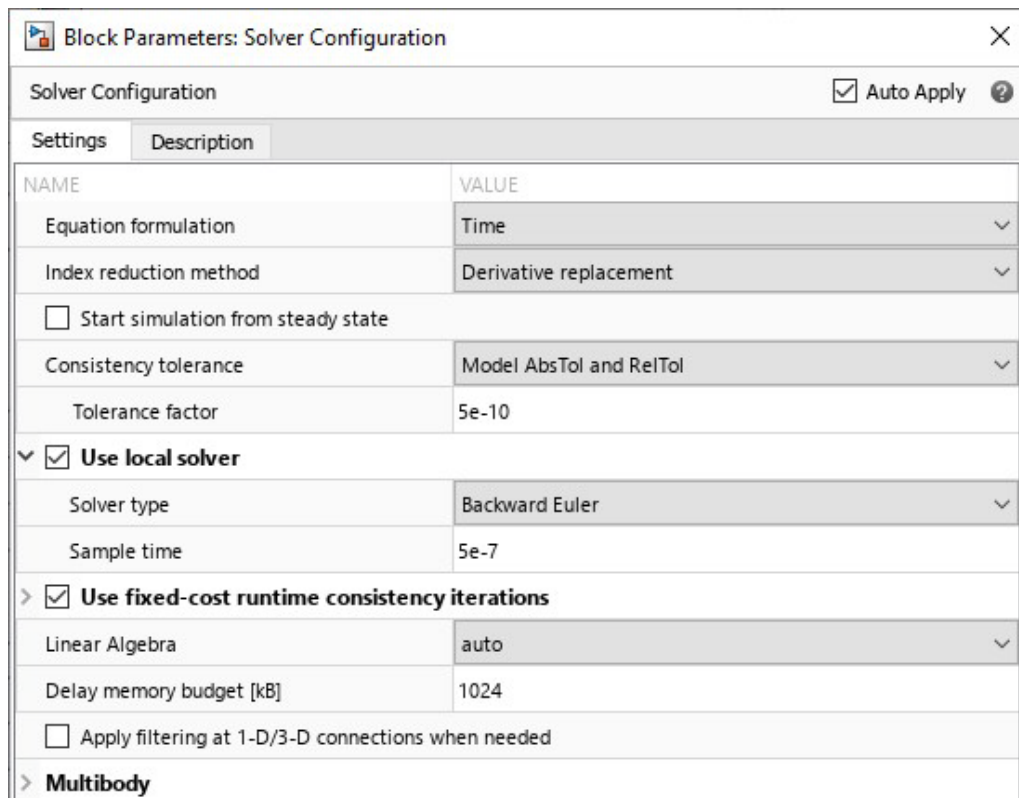


Slika 5.4. Shema pretvarača s teorijskim upravljačkim signalima unutar Simulinka

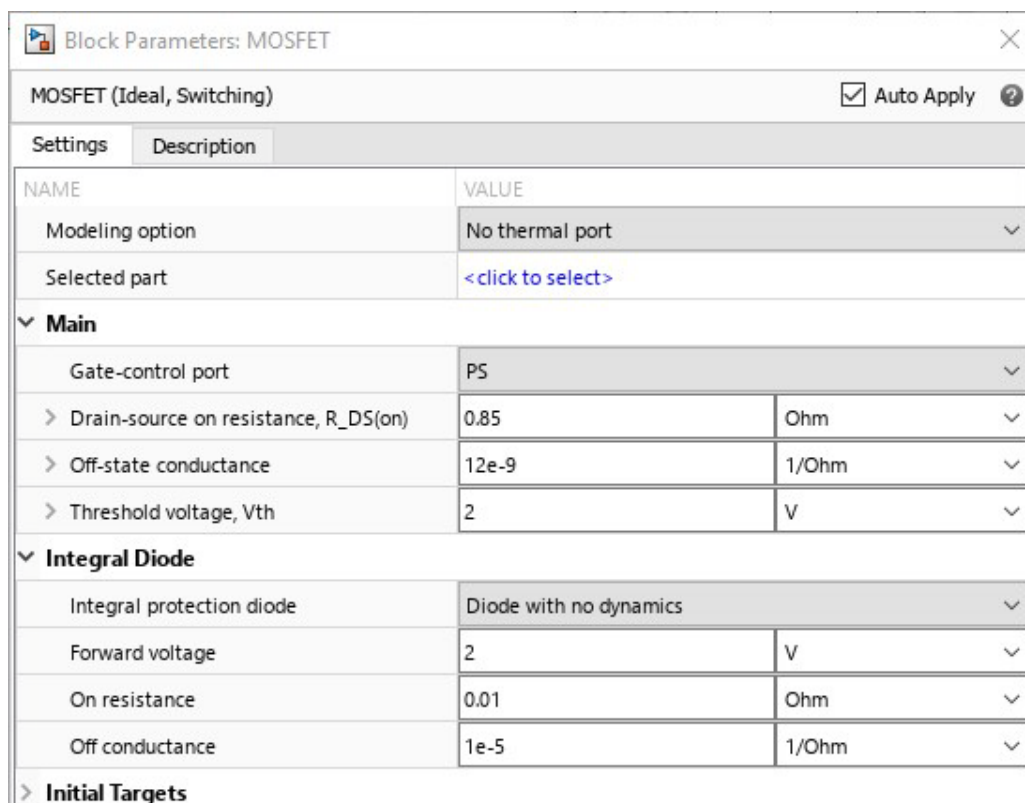
MATLAB blokovi koji su korišteni za izradu modela su: izmjenični izvor napona s podešenom amplitudom na 325,27 V, frekvencijom na 50Hz i fazni pomak od  $0^\circ$ , senzori napona i struje koji služe za mjerenje i snimanje struja i napona unutar scope-a, scope, diode s postavkama kao na slici 5.5., konfiguracija „rješavatelja“ (eng. *Solver Configuration*) s postavkama kao na slici 5.6., kondenzatori, MOSFET-ovi s postavkama kao na slici 5.7. i trošilo koje se sastoji od serijskog spoja otpora od  $800 \Omega$  i induktiviteta od 0.3 H. Blokovi za generiranje upravljačkih signala su 'sinusni izvor' podešen na 1 V i 50 Hz, 'gain' podešen na vrijednost  $m_a$  kako bi se vrijednost mogla mijenjati unutar m-skripte, ponavljajući niz (eng. *repeating sequence*) s postavkama podešenim kao na slici 5.8., usporedni operator podešen na ' $\leq$ ', logički operator 'NE' te dva gaina podešena na vrijednost 5 kako bi dobili vrijednosti upravljačkih impulsa od 5 V kao što se dobije s Arduina-a.

| Block Parameters: Diode |             |  |
|-------------------------|-------------|--|
| Diode                   |             | <input checked="" type="checkbox"/> Auto Apply ? |
| Settings                | Description |  |
| NAME                    | VALUE       |  |
| <b>Parameters</b>       |             |  |
| > Forward voltage       | 0.6         | V  |
| > On resistance         | 0.3         | Ohm  |
| > Off conductance       | 1e-8        | 1/Ohm  |
| > Initial Targets       |             |  |
| > Nominal Values        |             |  |

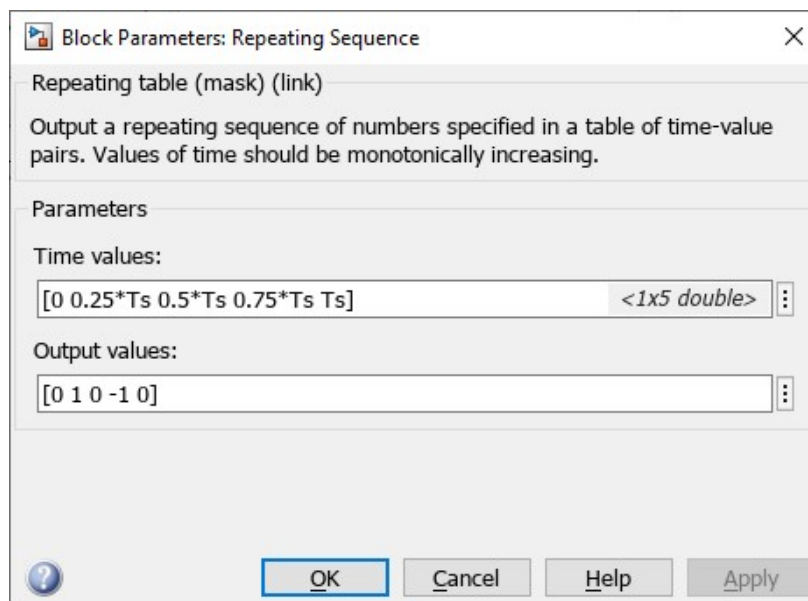
Slika 5.5. Postavke parametara diode



Slika 5.6. Postavke parametara bloka „Solver Configuration“

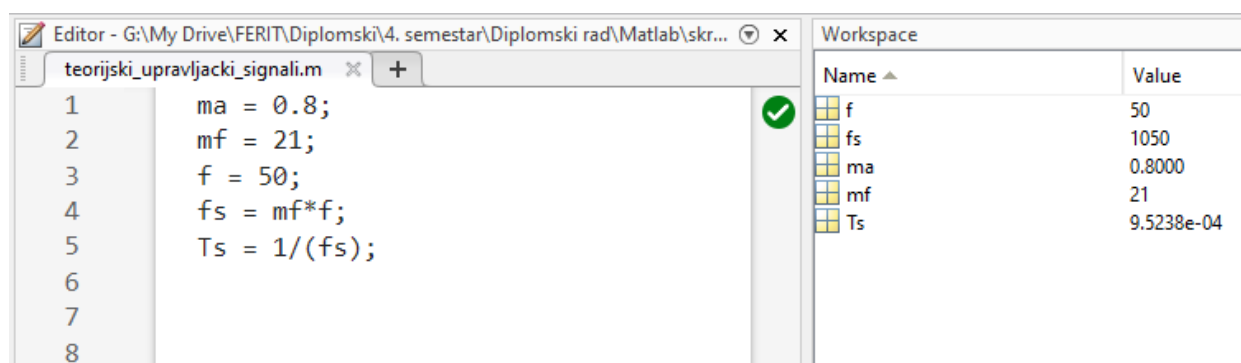


Slika 5.7. Postavke parametara MOSFET-a

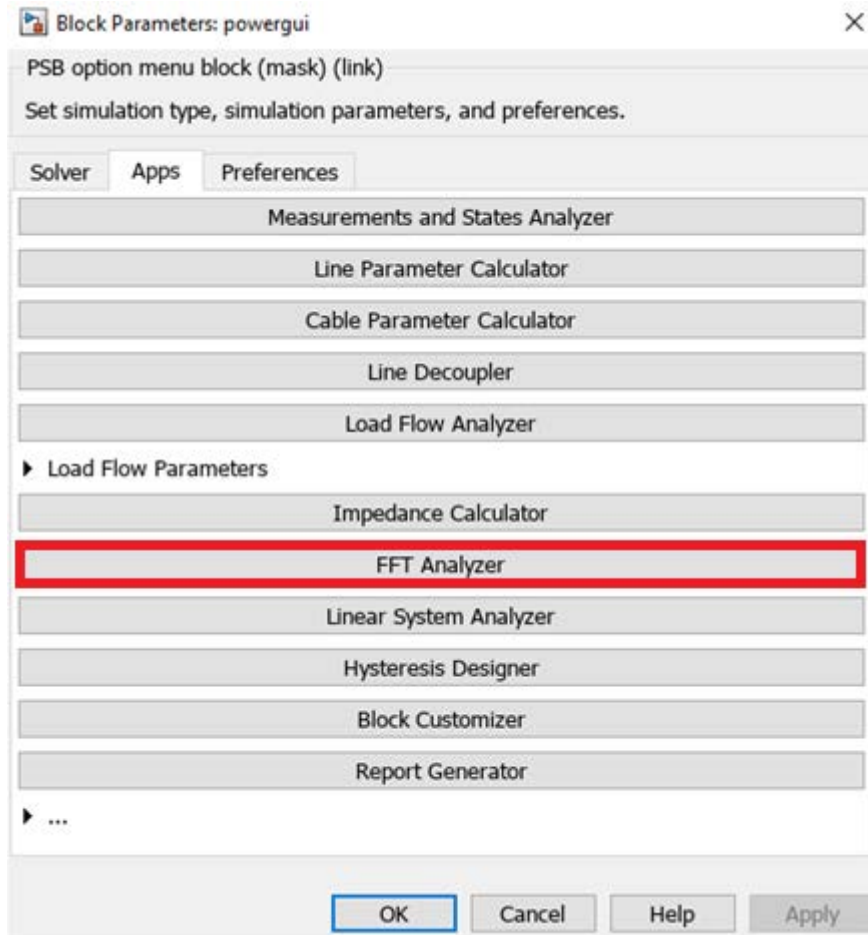


Slika 5.8. Postavke parametara bloka „Repeating Sequence“

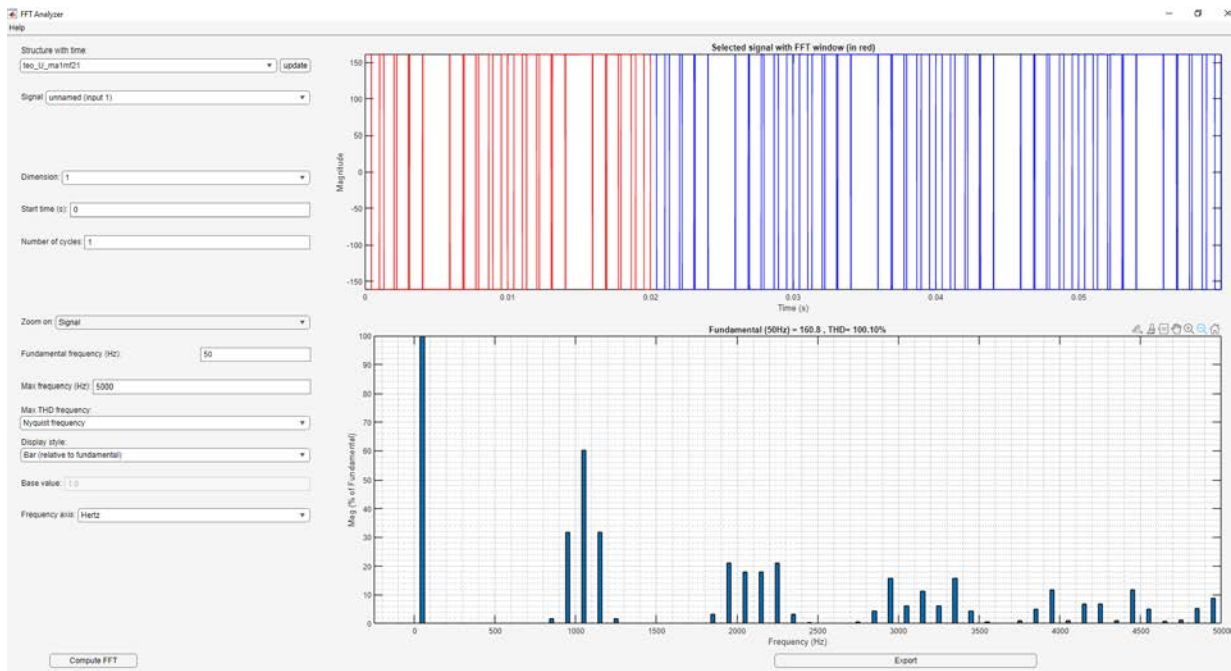
Parametri SPWM, odnosno  $m_a$  i  $m_f$ , mijenjaju se unutar m-skripte unutar MATLAB-a prikazanoj na slici 5.9. Za harmonijsku analizu korišten je blok POWERGUI. Nakon otvaranja bloka, unutar kartice 'aplikacije' (eng. *Apps*) u padajućem izborniku 'parametri tokova snaga' (eng. *Load Flow Parameters*), otvara se 'FFT analizator' (eng. *FFT Analyzer*) unutar kojeg se vrši harmonijska analiza signala što je prikazano na slici 5.10. Prikaz FFT Analizatora nalazi se na slici 5.11. unutar kojeg se vidi odabrani signal, odabrana fundamentalna frekvencija, maksimalna frekvencija koja ulazi u harmonijsku analizu te se prikazuje unutar prozora. Iznad prozora harmonijske analize, nakon pritiska na gumb 'izračunaj FFT' (eng. *Compute FFT*) ispisuje se amplituda osnovnog harmonika te THD signala. Umjesto grafičkog prikaza harmonijske analize može se odabrati tablični prikaz u kojem je lakše očitati vrijednosti.



Slika 5.9. m-skripta



Slika 5.10. POWERGUI blok



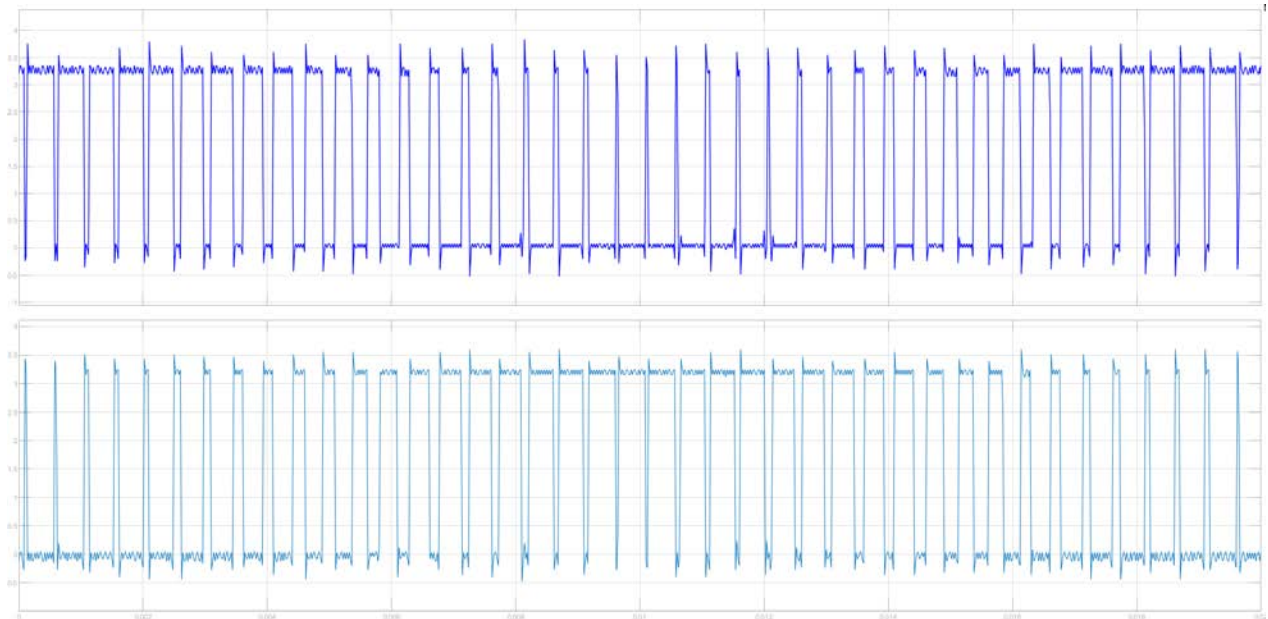
Slika 5.11. FFT Analizator

## 5.1. Dobivanje upravljačkih signala sa Arduina-a

Nakon snimanja upravljačkih valnih oblika s Arduino mikrokontrolera sa RIGOL DS1054Z osciloskopa, valni oblici su spremljeni u CSV formatu na USB stick, potom prebačeni na računalo, uređeni unutar Microsoft Excel-a kako bi MATLAB mogao direktno čitati vrijednosti te preko gumba unos podataka (eng. *Import Data*) uneseni i spremljeni u MATLAB Workspace. Nakon spremanja impulsa unutar Simulinka dodaje se blok ponavljajući niz unutar kojeg se postavljaju vremenske i izlazne vrijednosti na spremljene vrijednosti s workspace-a kako bi se mogle koristiti u simulaciji. Osciloskop snima vrijednosti za 24 ms kad se postavi vrijeme na 2 ms/div, dok je period jednog signala 20 ms. Kako bi se dobio periodički ponavljajući niz od 50 Hz potrebno je obrisati signal nakon 20 ms. Prikaz svih snimljenih upravljačkih signala u vlastitim 'ponavljajući niz' blokovima se nalazi na slici 5.12., dok se prikaz jednog snimljenog upravljačkog signala gornjeg i donjeg MOSFET-a nalazi na slici 5.13.

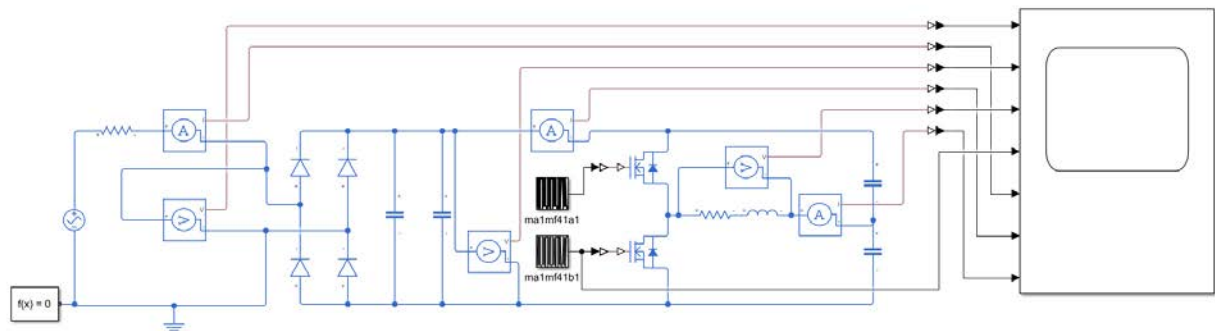


Slika 5.12. Prikaz snimljenih upravljačkih vrijednosti unutar Simulinka



Slika 5.13. Prikaz snimljenih upravljačkih signala

Model pretvarača sa snimljenim stvarnim upravljačkim signalima unutar Simulinka prikazan je na slici 5.14.



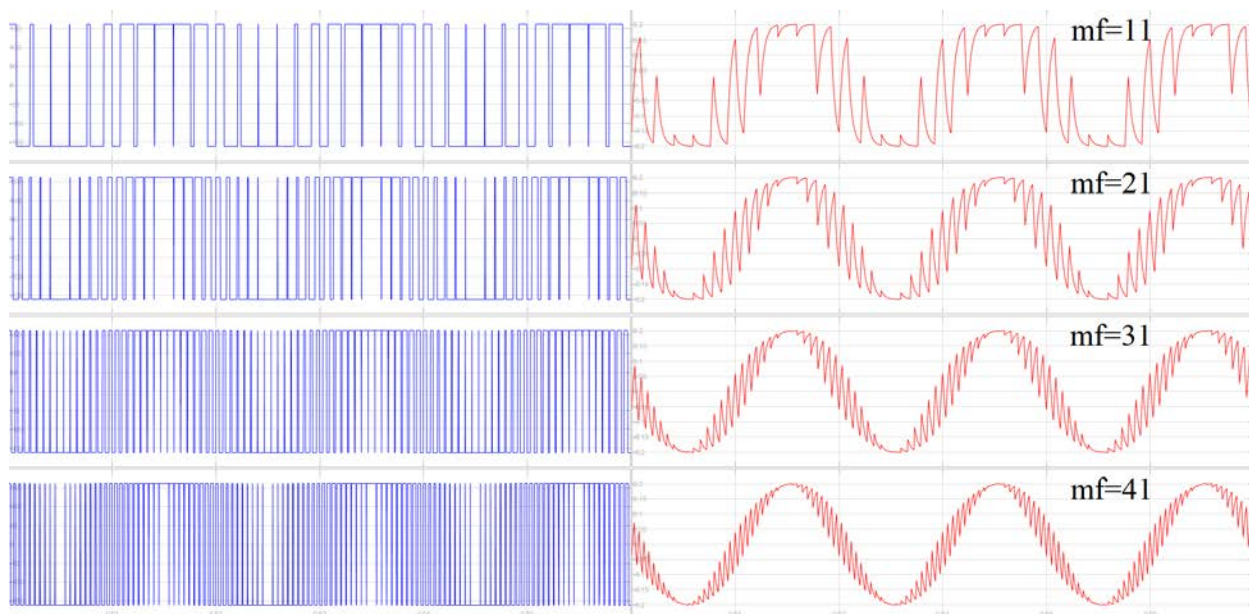
Slika 5.14. Shema pretvarača sa stvarnim (izmjenim) upravljačkim signalima unutar Simulinka

Rađene su simulacije sa teoretskim i stvarnim (snimljenim osciloskopom s Arduino) upravljačkim signalima kako bi se prikazala razlika kako „nesavršenost“ upravljačkog signala utječe na signale napona i struje trošila te njihove harmonijske analize.

## 5.2. Rezultati simulacije pomoću teorijskih upravljačkih signala

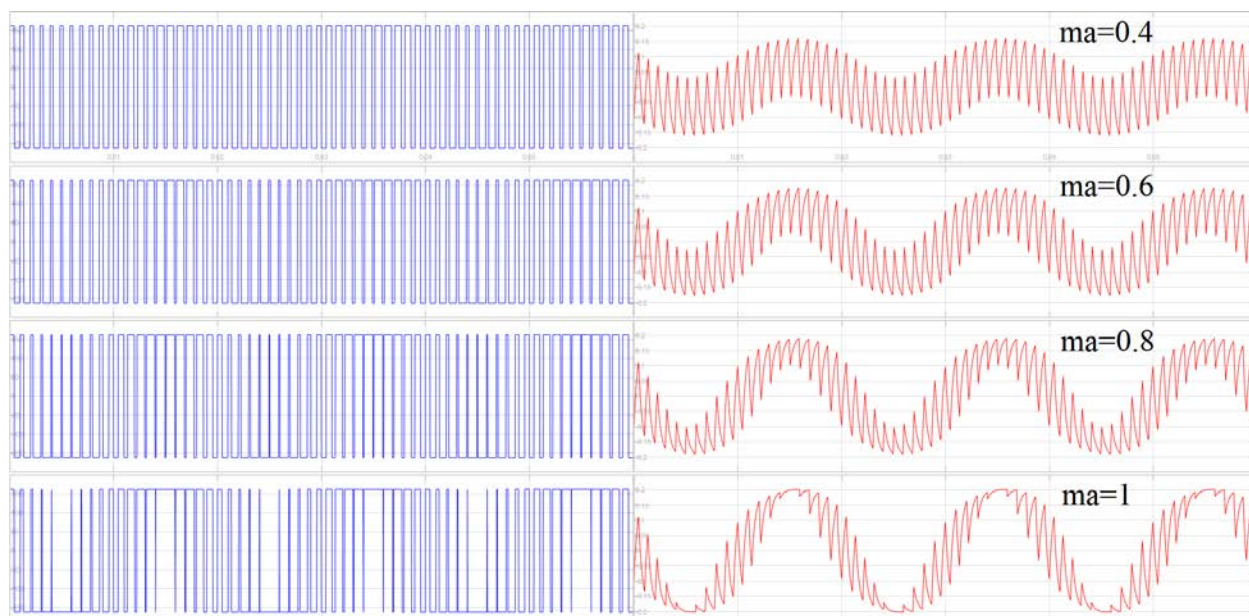
Na slici 5.15. prikazane su simulacije valnih oblika struja i napona trošila sa teorijskim upravljačkim signalima za promjenu modulacijskog faktora  $m_f$  uz konstantnu dubinu modulacije  $m_a=1$ .





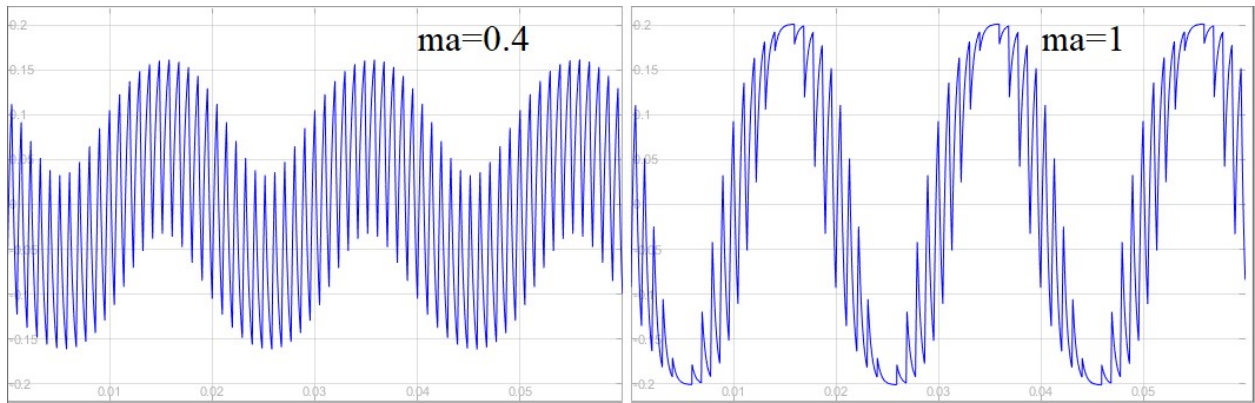
Slika 5.15. Valni oblici simulacije struja (crveno) i napona (plavo) trošila sa teorijskim upravljačkim signalima uz konstantni  $m_a = 1$ , pri promjeni  $m_f$ : a)  $m_f = 11$ , b)  $m_f = 21$ , c)  $m_f = 31$ , d)  $m_f = 41$

Na slici 5.16. prikazane su simulacije valnih oblika struja i napona trošila sa teorijskim upravljačkim signalima za promjenu dubine modulacije  $m_a$  uz konstantnu modulacijsku frekvenciju  $m_f = 21$ .



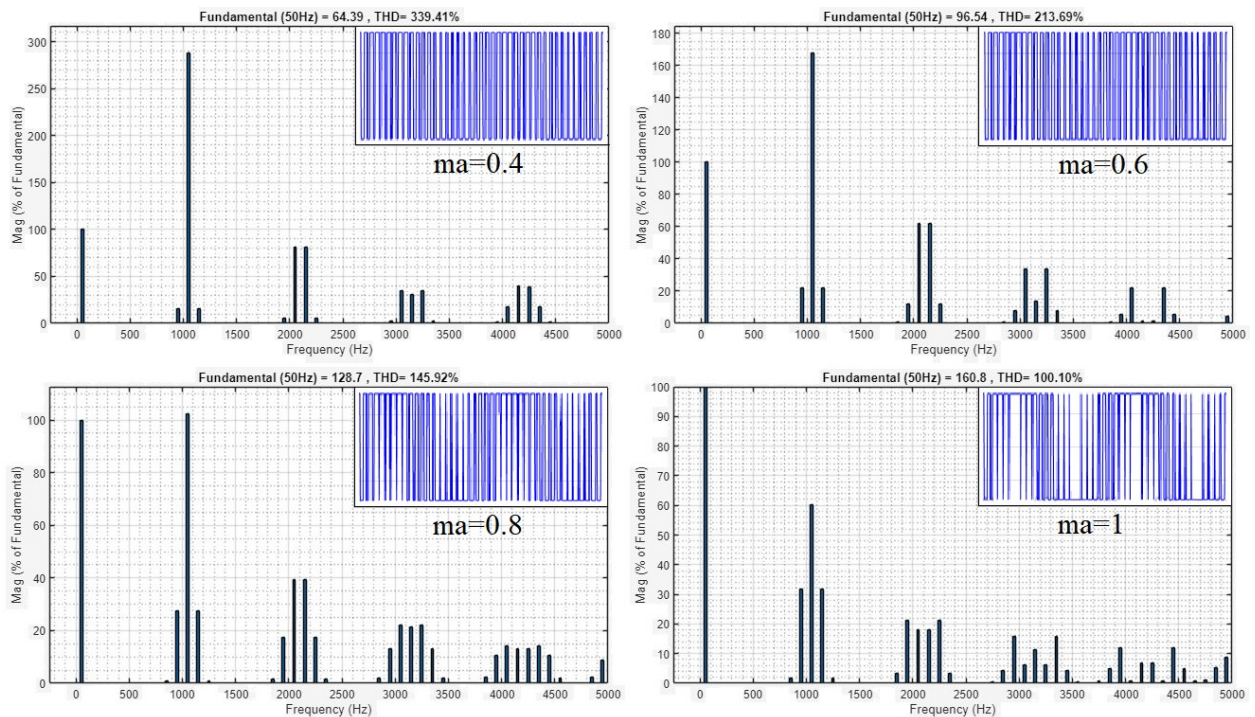
Slika 5.16. Valni oblici simulacije struja (crveno) i napona (plavo) trošila sa teorijskim upravljačkim signalima uz konstantni  $m_f = 21$ , pri promjeni  $m_a$ : a)  $m_a = 0,4$ , b)  $m_a = 0,6$ , c)  $m_a = 0,8$ , d)  $m_a = 1$

Na slici 5.17. prikazani su valni oblici struja trošila za uspoređivanje iznosa efektivne vrijednosti promjenom  $m_a$ , uz konstantni  $m_f = 21$



Slika 5.17. Valni oblici struja trošila za uspoređivanje iznosa efektivne vrijednosti promjenom  $m_a$ , uz konstantni  $m_f=21$

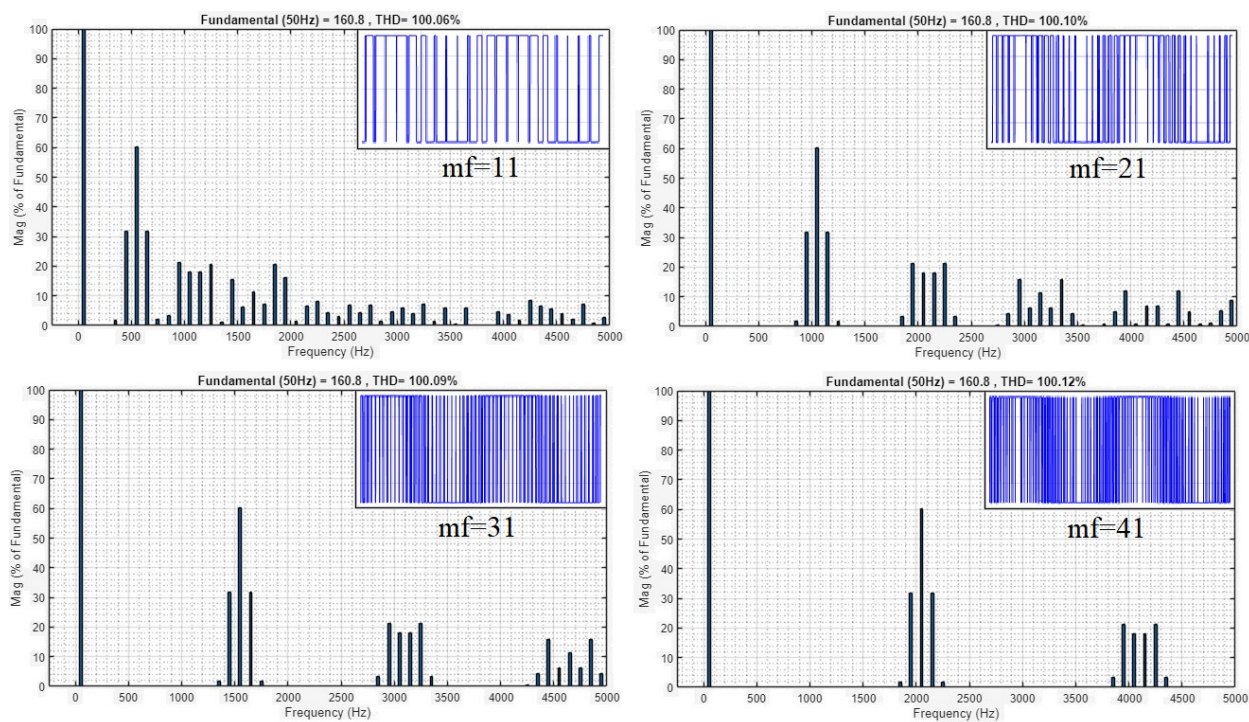
Na slici 5.18. prikazane su harmonijske analize simuliranih valnih oblika napona trošila sa teorijskim upravljačkim signalima za promjenu dubine modulacije  $m_a$ , dok su na slici 5.19. prikazane harmonijske analize simuliranih valnih oblika napona trošila sa teorijskim upravljačkim signalima za promjenu modulatorske frekvencije  $m_f$ .



Slika 5.18. Harmonijske analize simuliranih valnih oblika napona trošila sa teorijskim upravljačkim signalima uz konstantni  $m_f=21$ , pri promjeni  $m_a$ : a)  $m_a=0,4$ , b)  $m_a=0,6$ , c)  $m_a=0,8$ , d)  $m_a=1$

Tablica 5.1. Tablični prikaz parametara harmonijske analize valnih oblika napona trošila sa teorijskim upravljačkim signalima pri promjeni  $m_a$

| $m_f = 21$ |          | Prva tri dominantna harmonika napona |               |          |                |             |                |             |
|------------|----------|--------------------------------------|---------------|----------|----------------|-------------|----------------|-------------|
|            |          | prvi harmonik                        |               |          | drugi harmonik |             | treći harmonik |             |
| $m_a$      | THDU [%] | $U(I)$ [V]                           | A [% $U(I)$ ] | $f$ [Hz] | A [% $U(I)$ ]  | $f$ [Hz]    | A [% $U(I)$ ]  | $f$ [Hz]    |
| 0,4        | 339,41   | 64,39                                | 287,9         | 1050     | 81,57          | 2050 & 2150 | 39,3           | 4150 & 4250 |
| 0,6        | 213,69   | 96,54                                | 167,84        | 1050     | 61,79          | 2050 & 2150 | 33,94          | 3050 & 3250 |
| 0,8        | 145,92   | 128,7                                | 102,37        | 1050     | 39,35          | 2050 & 2150 | 22,06          | 3050 & 3250 |
| 1          | 100,1    | 160,8                                | 60,16         | 1050     | 21,26          | 1950 & 2250 | 15,73          | 2950 & 3350 |

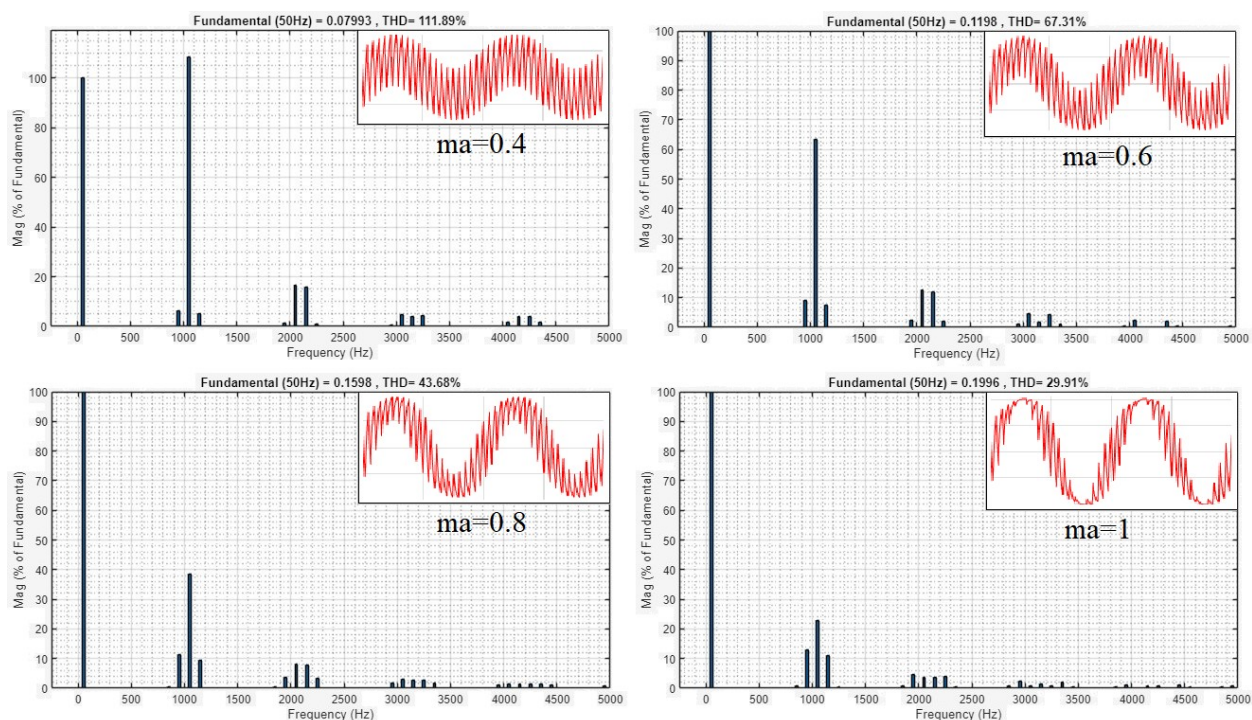


Slika 5.19. Harmonijske analize simuliranih valnih oblika napona trošila sa teorijskim upravljačkim signalima uz konstantni  $m_a = 1$ , pri promjeni  $m_f$ : a)  $m_f = 11$ , b)  $m_f = 21$ , c)  $m_f = 31$ , d)  $m_f = 41$

Tablica 5.2. Tablični prikaz parametara harmonijske analize valnih oblika napona trošila sa teorijskim upravljačkim signalima pri promjeni  $m_f$

| $m_a = 1$ |          |            | Prva tri dominantna harmonika napona |          |                |             |                |             |
|-----------|----------|------------|--------------------------------------|----------|----------------|-------------|----------------|-------------|
|           |          |            | prvi harmonik                        |          | drugi harmonik |             | treći harmonik |             |
| $m_f$     | THDU [%] | $U(I)$ [V] | A [% $U(I)$ ]                        | $f$ [Hz] | A [% $U(I)$ ]  | $f$ [Hz]    | A [% $U(I)$ ]  | $f$ [Hz]    |
| 11        | 100,06   | 160,8      | 60,12                                | 550      | 21,24          | 950 & 1250  | 20,75          | 1850        |
| 21        | 100,1    | 160,8      | 60,16                                | 1050     | 21,26          | 1950 & 2250 | 15,73          | 2950 & 3350 |
| 31        | 100,09   | 160,8      | 60,14                                | 1550     | 21,26          | 2950 & 3250 | 15,71          | 4450 & 4850 |
| 41        | 100,12   | 160,8      | 60,18                                | 2050     | 21,25          | 3950 & 4250 | 15,74          | 5950 & 6350 |

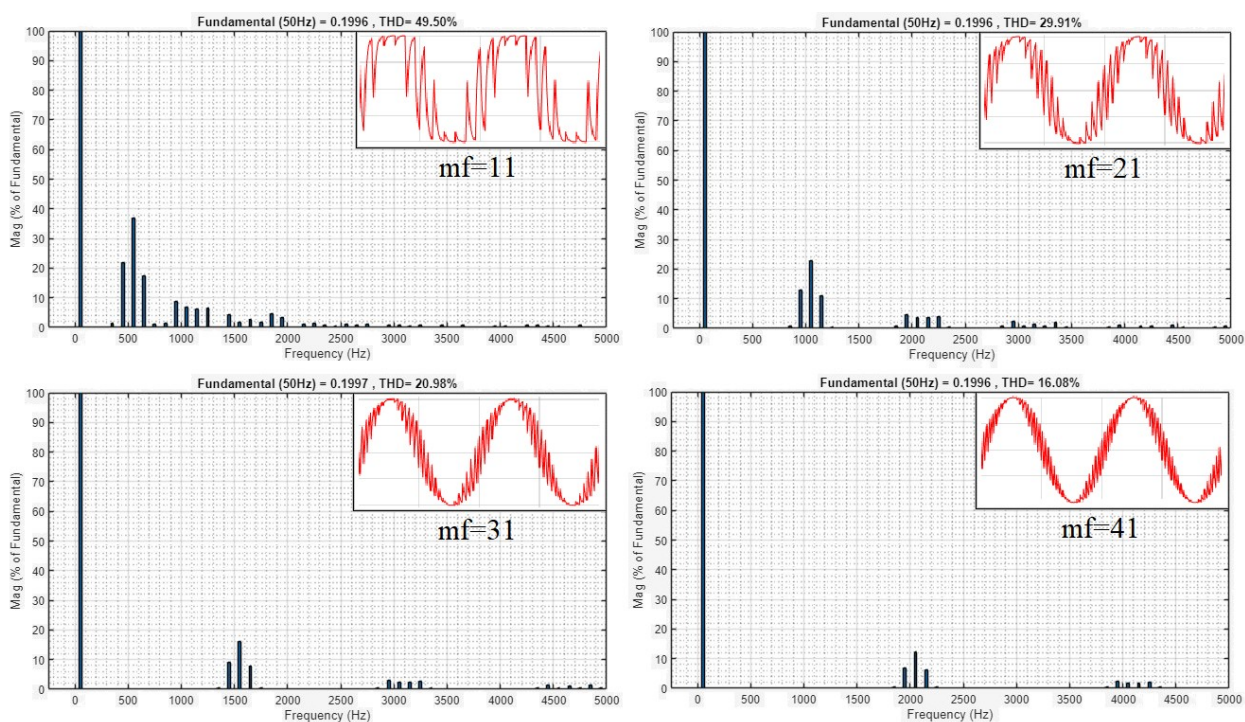
Na slici 5.20. prikazane su harmonijske analize simuliranih valnih oblika struja trošila za promjenu dubine modulacije  $m_a$ , dok su na slici 5.21. prikazane harmonijske analize simuliranih valnih oblika struja trošila za promjenu modulacijske frekvencije  $m_f$ .



Slika 5.20. Harmonijske analize simuliranih valnih oblika struja trošila sa teorijskim upravljačkim signalima uz konstantni  $m_f = 21$ , pri promjeni  $m_a$ : a)  $m_a = 0,4$ , b)  $m_a = 0,6$ , c)  $m_a = 0,8$ , d)  $m_a = 1$

Tablica 5.3. Tablični prikaz parametara harmonijske analize valnih oblika struja trošila sa teorijskim upravljačkim signalima pri promjeni  $m_a$

| $m_f=21$ |          |             | Prva tri dominantna harmonika struje |          |                |          |                |          |
|----------|----------|-------------|--------------------------------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|
|          |          |             | prvi harmonik                        |          | drugi harmonik |          | treći harmonik |          |
| $m_a$    | THDI [%] | $I(I)$ [mA] | A [% $I(I)$ ]                        | $f$ [Hz] | A [% $I(I)$ ]  | $f$ [Hz] | A [% $I(I)$ ]  | $f$ [Hz] |
| 0,4      | 111,89   | 79,93       | 108,58                               | 1050     | 16,65          | 2050     | 4,8            | 3050     |
| 0,6      | 67,31    | 119,8       | 63,29                                | 1050     | 12,6           | 2050     | 4,71           | 3050     |
| 0,8      | 43,68    | 159,8       | 38,6                                 | 1050     | 11,3           | 950      | 8,02           | 2050     |
| 1        | 29,91    | 199,6       | 22,69                                | 1050     | 13,06          | 950      | 4,55           | 1950     |



Slika 5.21. Harmonijske analize simuliranih valnih oblika struja trošila sa teorijskim upravljačkim signalima uz konstantni  $m_a = 1$ , pri promjeni  $m_f$ : a)  $m_f = 11$ , b)  $m_f = 21$ , c)  $m_f = 31$ , d)  $m_f = 41$

Tablica 5.4. Tablični prikaz parametara harmonijske analize valnih oblika struja trošila sa teorijskim upravljačkim signalima pri promjeni  $m_f$

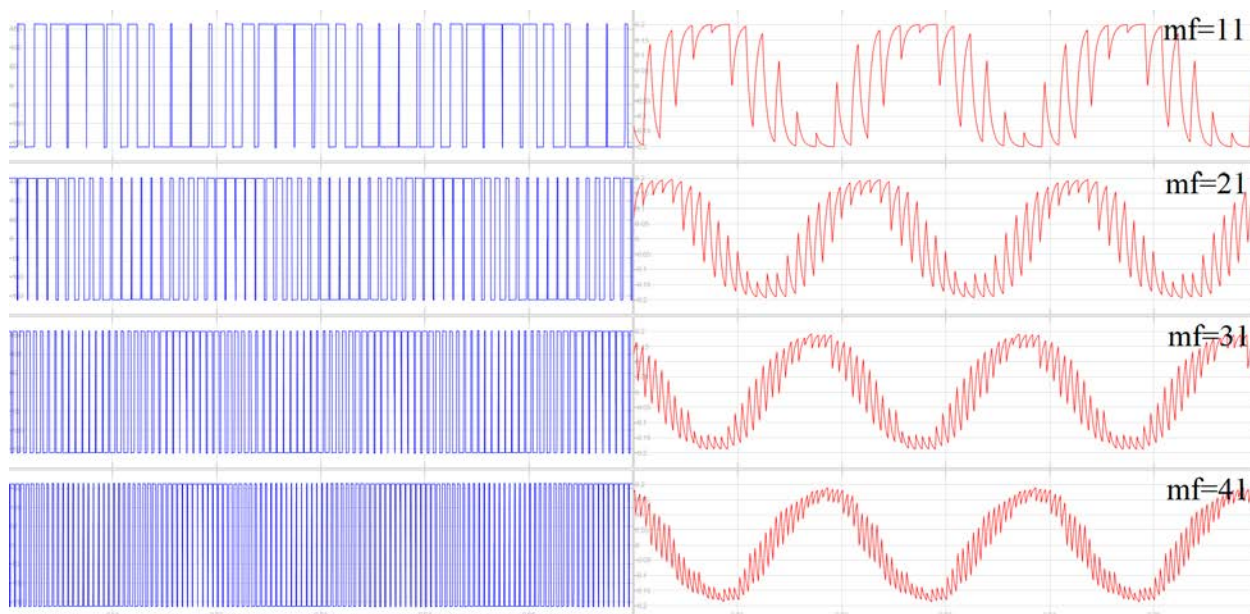
| $m_a=1$ |          |             | Prva tri dominantna harmonika struje |          |                |          |                |          |
|---------|----------|-------------|--------------------------------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|
|         |          |             | prvi harmonik                        |          | drugi harmonik |          | treći harmonik |          |
| $m_f$   | THDI [%] | $I(I)$ [mA] | A [% $I(I)$ ]                        | $f$ [Hz] | A [% $I(I)$ ]  | $f$ [Hz] | A [% $I(I)$ ]  | $f$ [Hz] |
| 11      | 49,5     | 199,6       | 36,97                                | 550      | 21,96          | 450      | 8,72           | 950      |
| 21      | 29,91    | 199,6       | 22,69                                | 1050     | 13,06          | 950      | 4,55           | 1950     |
| 31      | 20,98    | 199,7       | 15,98                                | 1550     | 8,99           | 1450     | 3,05           | 2950     |
| 41      | 16,08    | 199,6       | 12,28                                | 2050     | 6,81           | 1950     | 2,29           | 3950     |

Iz slika 5.15. – 5.21. i tablica 5.1. – 5.4. se zaključuje da s porastom modulacijske frekvencije broj sklapanja povećava, osnovni harmonik i efektivna vrijednost struje i napona ostaju jednake, oblik struje se izgledom približava sinusnom obliku, dominantni harmonici se nalaze na višekratnicima sklopne frekvencije ili bliskim bočnim frekvencijama, THDU ostaje jednak. Dominantni harmonici napona se guraju u područje više frekvencije uz iste amplitude što znači da će THDI biti još manji pošto se amplitude harmonika struja smanjuju s povećanjem frekvencije. Razlog toga je što se radno-induktivno trošilo koje se koristi u radu ponaša kao nisko propusni filter.

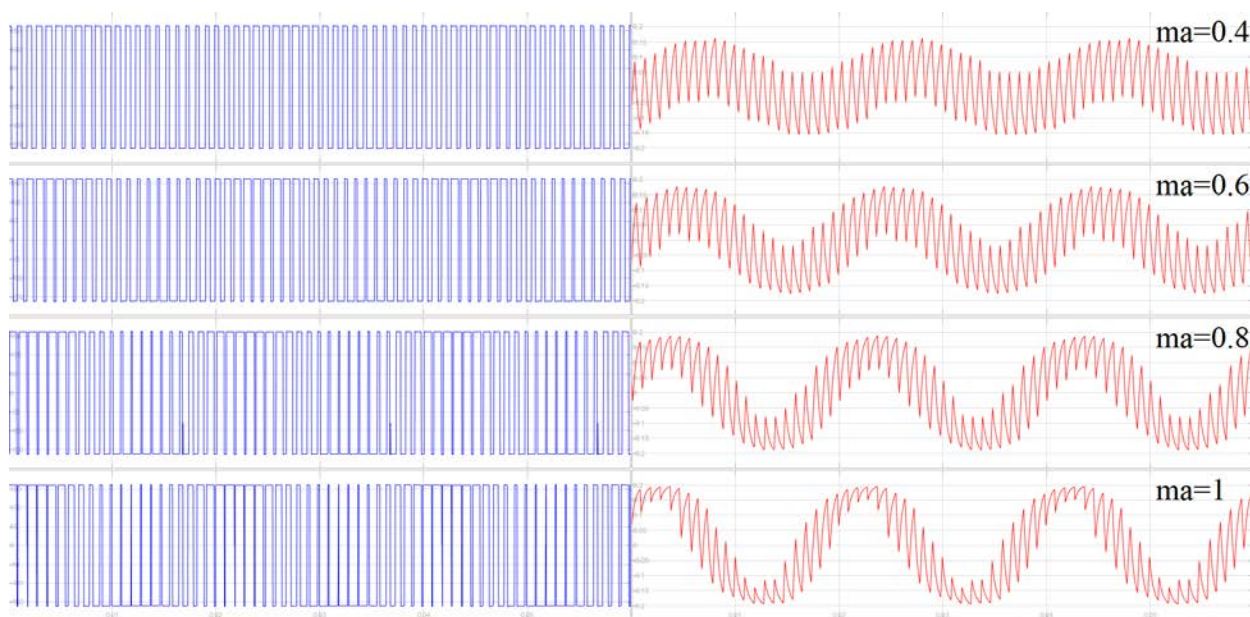
S porastom dubine modulacije osnovni harmonik i efektivna vrijednost napona i struja rastu te se titranje struje smanjuje. Svi harmonici smanjuju svoju amplitudu u usporedbi s osnovnim harmonikom te ostaju na istim frekvencijama s povećanjem dubine modulacije, zbog konstantne modulacijske frekvencije, što znači da se smanjuje, odnosno popravlja THDU i THDI. Dominantni harmonici se nalaze na višekratnicima sklopne frekvencije ili bliskim bočnim frekvencijama. Uočava se značajno prigušenje harmonika struje veće frekvencije što je i očekivano prema teoriji. Dodatno se uočava da je u slučaju  $m_a = 0,4$  prvi dominantni harmonik veće amplitude od osnovnog harmonika.

### **5.3. Rezultati simulacije pomoću stvarnih snimljenih upravljačkih signala**

Na slici 5.22. prikazane su simulacije valnih oblika struja i napona trošila sa stvarnim upravljačkim signalima za promjenu modulacijskog faktora  $m_f$  uz konstantnu dubinu modulacije  $m_a = 1$ , dok su na slici 5.23. prikazane simulacije valnih oblika struja i napona trošila sa stvarnim upravljačkim signalima za promjenu dubine modulacije  $m_a$  uz konstantnu modulacijsku frekvenciju  $m_f = 21$ .

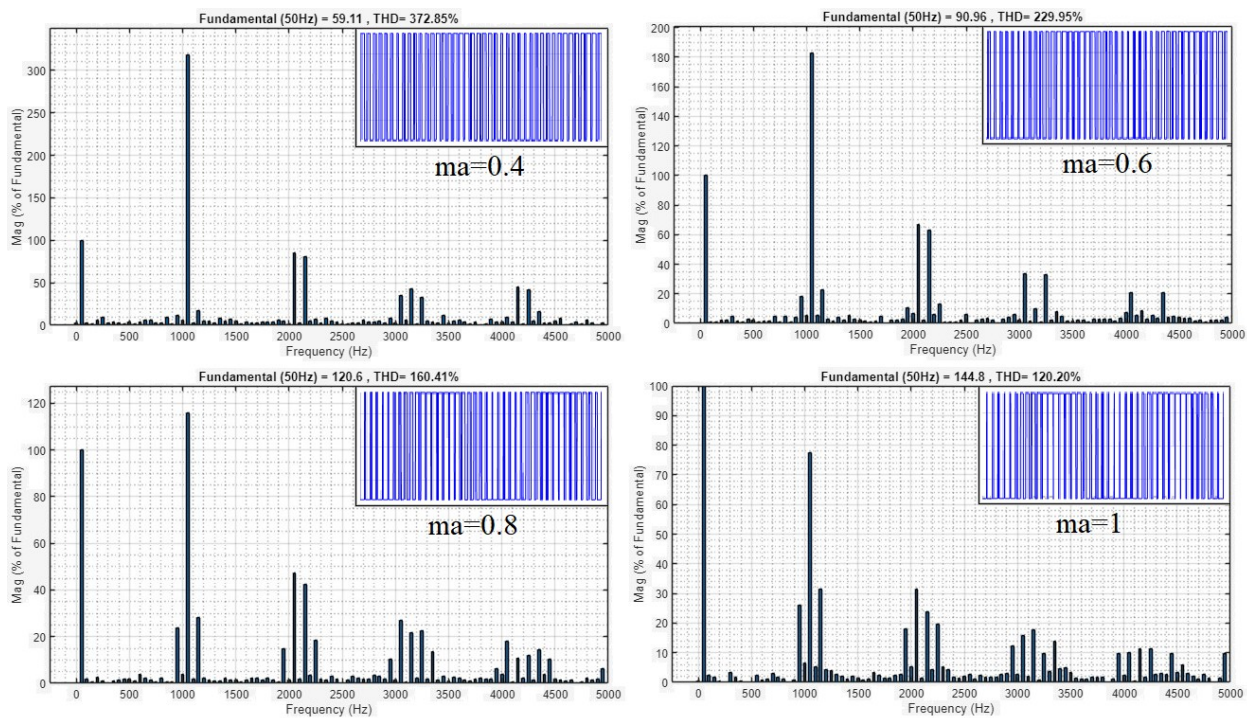


Slika 5.22. Valni oblici simuliranih struja (crveno) i napona (plavo) trošila sa stvarnim upravljačkim signalima uz konstantni  $m_a = 1$ , pri promjeni  $m_f$ : a)  $m_f = 11$ , b)  $m_f = 21$ , c)  $m_f = 31$ , d)  $m_f = 41$



Slika 5.23. Valni oblici simulacija struja (crveno) i napona (plavo) trošila sa stvarnim upravljačkim signalima uz konstantni  $m_f = 21$ , pri promjeni  $m_a$ : a)  $m_a = 0,4$ , b)  $m_a = 0,6$ , c)  $m_a = 0,8$ , d)  $m_a = 1$

Na slici 5.24. prikazane su harmonijske analize simuliranih valnih oblika napona trošila sa stvarnim upravljačkim signalima za promjenu dubine modulacije  $m_a$ , dok su na slici 5.25. prikazane harmonijske analize simuliranih valnih oblika napona trošila sa stvarnim upravljačkim signalima za promjenu modulacijske frekvencije  $m_f$ .

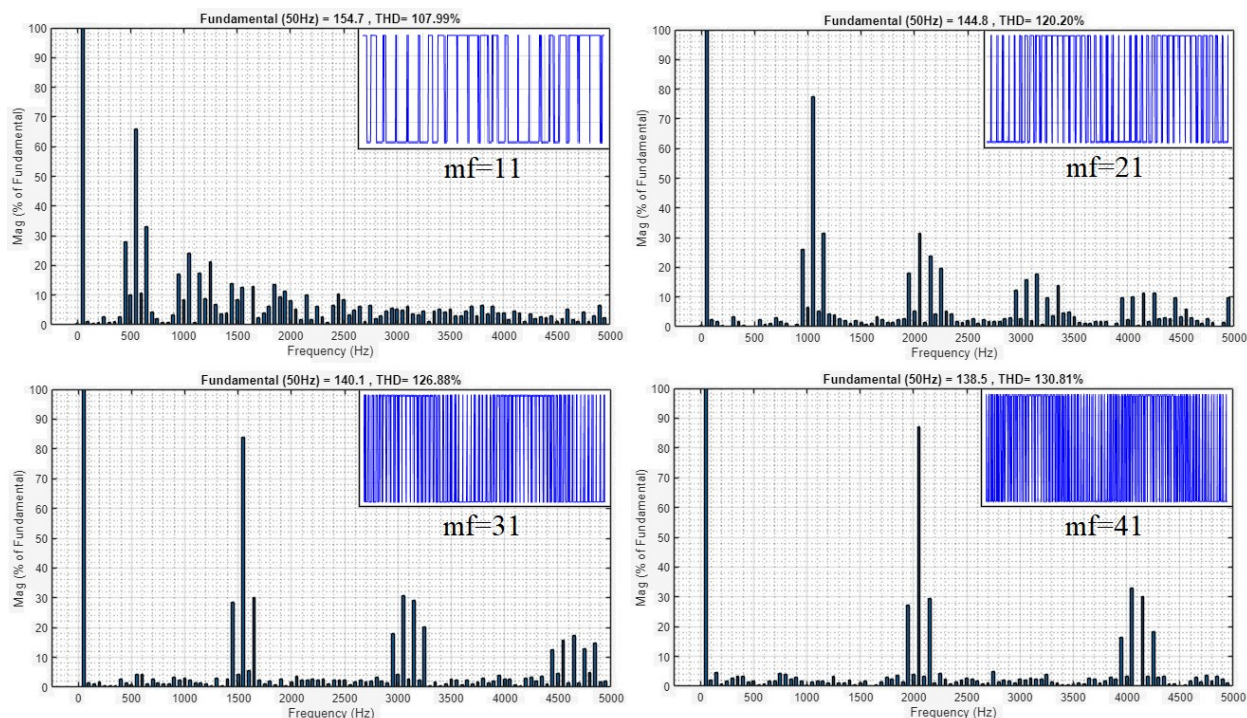


Slika 5.24. Harmonijske analize simuliranih valnih oblika napona trošila sa stvarnim upravljačkim signalima uz konstantni  $m_f = 21$ , pri promjeni  $m_a$ : a)  $m_a = 0.4$ , b)  $m_a = 0.6$ , c)  $m_a = 0.8$ , d)  $m_a = 1$

Tablica 5.5. Tablični prikaz parametara harmonijske analize valnih oblika napona trošila sa stvarnim upravljačkim signalima pri promjeni  $m_a$

| $m_f=21$ |          |            | Prva tri dominantna harmonika napona |          |                |          |                |          |
|----------|----------|------------|--------------------------------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|
|          |          |            | prvi harmonik                        |          | drugi harmonik |          | treći harmonik |          |
| $m_a$    | THDU [%] | $U(1)$ [V] | A [% $U(1)$ ]                        | $f$ [Hz] | A [% $U(1)$ ]  | $f$ [Hz] | A [% $U(1)$ ]  | $f$ [Hz] |
| 0,4      | 372,85   | 59,11      | 318,13                               | 1050     | 84,86          | 2050     | 42,92          | 3150     |
| 0,6      | 229,95   | 90,96      | 182,8                                | 1050     | 66,67          | 2050     | 33,59          | 3050     |
| 0,8      | 160,41   | 120,6      | 115,9                                | 1050     | 47,21          | 2050     | 26,92          | 3050     |
| 1        | 120,2    | 144,8      | 77,43                                | 1050     | 31,61          | 1150     | 31,47          | 2050     |



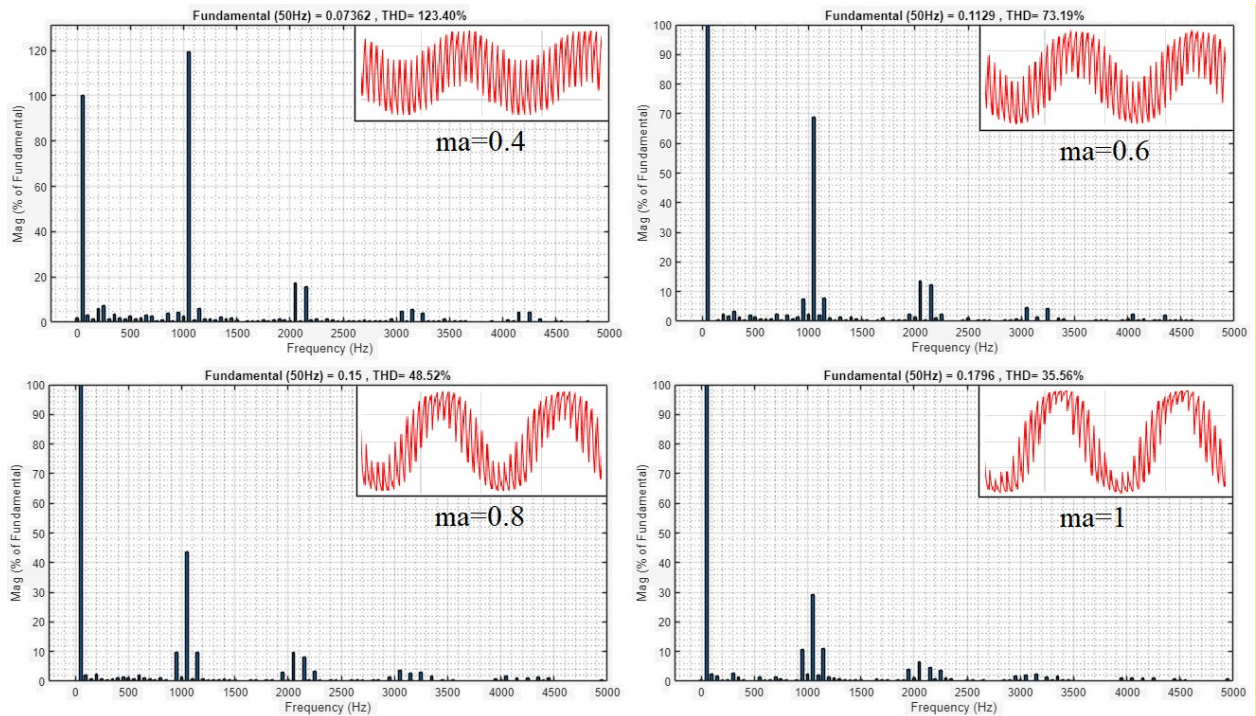


Slika 5.25. Harmonijske analize simuliranih valnih oblika napona trošila sa stvarnim upravljačkim signalima uz konstanti  $m_a = 1$ , pri promjeni  $m_f$ : a)  $m_f = 11$ , b)  $m_f = 21$ , c)  $m_f = 31$ , d)  $m_f = 41$

Tablica 5.6. Tablični prikaz parametara harmonijske analize valnih oblika napona trošila sa stvarnim upravljačkim signalima pri promjeni  $m_f$

| $m_a=1$ |          |            | Prva tri dominantna harmonika napona |          |                |          |                |          |
|---------|----------|------------|--------------------------------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|
|         |          |            | prvi harmonik                        |          | drugi harmonik |          | treći harmonik |          |
| $m_f$   | THDU [%] | $U(I)$ [V] | A [% $U(I)$ ]                        | $f$ [Hz] | A [% $U(I)$ ]  | $f$ [Hz] | A [% $U(I)$ ]  | $f$ [Hz] |
| 11      | 107,99   | 154,7      | 65,96                                | 550      | 32,96          | 650      | 24,21          | 1050     |
| 21      | 120,2    | 144,8      | 77,43                                | 1050     | 31,61          | 1150     | 31,47          | 2050     |
| 31      | 126,88   | 140,1      | 83,81                                | 1550     | 30,84          | 3050     | 30,17          | 1650     |
| 41      | 130,81   | 138,5      | 86,99                                | 2050     | 33,02          | 4050     | 29,51          | 2150     |

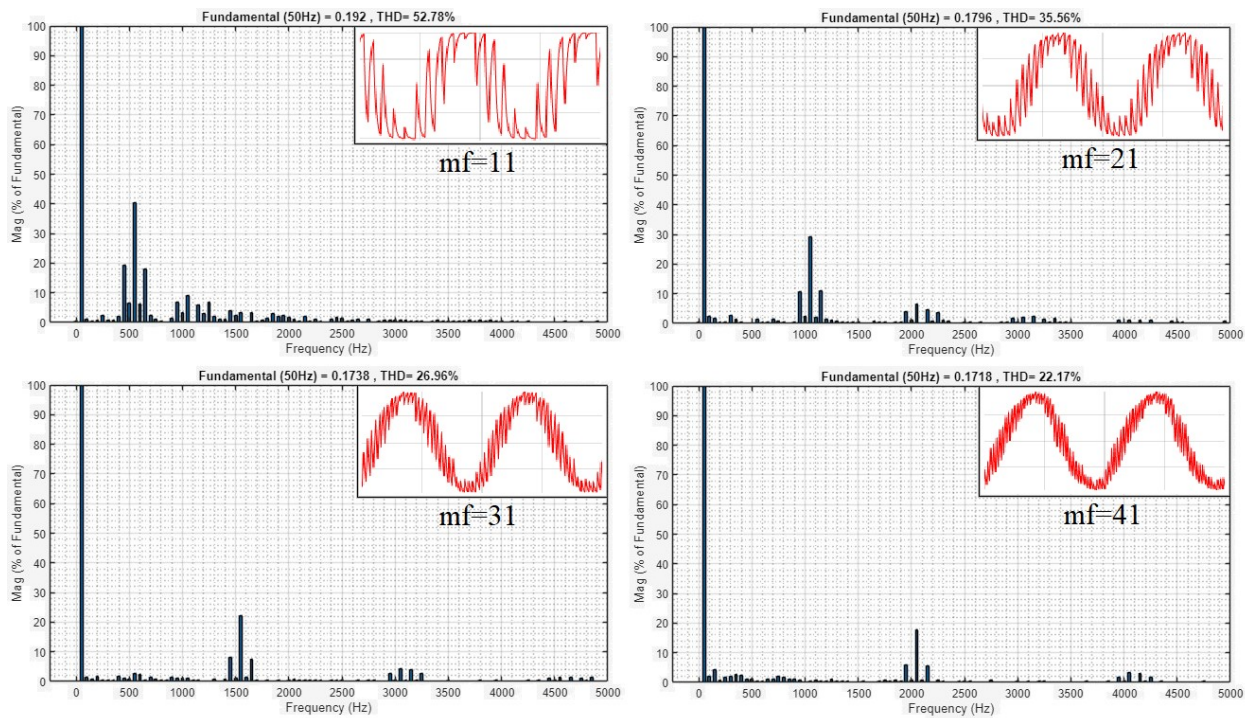
Na slici 5.26. prikazane su harmonijske analize simuliranih valnih oblika struje trošila sa stvarnim upravljačkim signalima za promjenu dubine modulacije  $m_a$ , dok su na slici 5.27. prikazane harmonijske analize simuliranih valnih oblika struje trošila sa stvarnim upravljačkim signalima za promjenu modulacijske frekvencije  $m_f$ .



Slika 5.26. Harmonijske analize simuliranih valnih oblika struje trošila sa stvarnim upravljačkim signalima uz konstanti  $m_f = 21$ , pri promjeni  $m_a$ : a)  $m_a = 0,4$ , b)  $m_a = 0,6$ , c)  $m_a = 0,8$ , d)  $m_a = 1$

Tablica 5.7. Tablični prikaz parametara harmonijske analize valnih oblika struje trošila sa stvarnim upravljačkim signalima pri promjeni  $m_a$

| $m_f=21$ |          |             | Prva tri dominantna harmonika struje |          |                |          |                |          |
|----------|----------|-------------|--------------------------------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|
|          |          |             | prvi harmonik                        |          | drugi harmonik |          | treći harmonik |          |
| $m_a$    | THDI [%] | $I(1)$ [mA] | A [%I(1)]                            | $f$ [Hz] | A [%I(1)]      | $f$ [Hz] | A [%I(1)]      | $f$ [Hz] |
| 0,4      | 123,4    | 73,62       | 119,39                               | 1050     | 17,37          | 2050     | 15,67          | 2150     |
| 0,6      | 73,19    | 112,9       | 68,91                                | 1050     | 13,65          | 2050     | 12,21          | 2150     |
| 0,8      | 48,52    | 150         | 43,52                                | 1050     | 9,81           | 1150     | 9,59           | 2050     |
| 1        | 35,56    | 179,6       | 29,28                                | 1050     | 10,99          | 1150     | 6,43           | 2050     |



Slika 5.27. Harmonijske analize simuliranih valnih oblika struja trošila sa stvarnim upravljačkim signalima uz konstantni  $m_a = 1$ , pri promjeni  $m_f$ : a)  $m_f = 11$ , b)  $m_f = 21$ , c)  $m_f = 31$ , d)  $m_f = 41$

Tablica 5.8. Tablični prikaz parametara harmonijske analize valnih oblika struja trošila sa stvarnim upravljačkim signalima pri promjeni  $m_f$

| $m_a=1$ |          |             | Prva tri dominantna harmonika struje |          |                |          |                |          |
|---------|----------|-------------|--------------------------------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|
|         |          |             | prvi harmonik                        |          | drugi harmonik |          | treći harmonik |          |
| $m_f$   | THDI [%] | $I(1)$ [mA] | A [% $I(1)$ ]                        | $f$ [Hz] | A [% $I(1)$ ]  | $f$ [Hz] | A [% $I(1)$ ]  | $f$ [Hz] |
| 11      | 52,78    | 192         | 40,54                                | 550      | 19,21          | 450      | 9,11           | 1050     |
| 21      | 35,56    | 179,6       | 29,28                                | 1050     | 10,99          | 1150     | 6,43           | 2050     |
| 31      | 26,96    | 173,8       | 22,26                                | 1550     | 8,01           | 1450     | 4,28           | 3050     |
| 41      | 22,17    | 171,8       | 17,75                                | 2050     | 5,85           | 1950     | 3,46           | 4050     |

Iz slika 5.22. – 5.27. i tablica 5.5. – 5.8. se uočava potpuno jednak trend kao u poglavlju 5.2. iz slika 5.15. – 5.21. i tablica 5.1. – 5.4. uz promjenu vrijednosti iz tablica do 10 % za THD i amplituda osnovnih harmonika te do 30 % za amplitude dominantnih harmonika uz nekoliko većih odstupanja do 300 %, kao što je amplituda trećeg dominantnog harmonika struje. Odstupanja se javljaju radi diskretizacije zbog tabličnog spremanja signala i izvršavanja simulacija s određenim vremenom uzorka te distorzije upravljačkog signala zbog nesavršenosti mjernih sondi osciloskopa i komponenti mikrokontrolera.

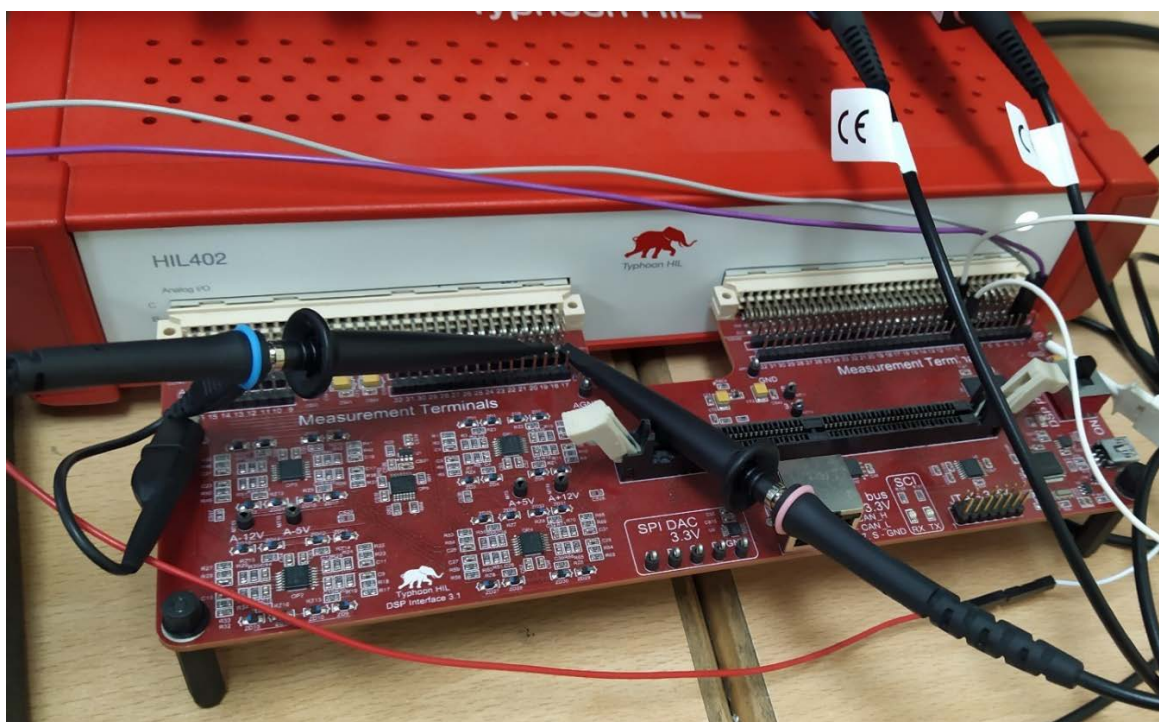
## 6. TESTIRANJE UPRAVLJAČKOG SUSTAVA IZMJENJIVAČA PREKO TYPHOON HIL-A

Typhoon HIL, za razliku od MATLAB-a, izvorno nudi mogućnost simulacija u stvarnom vremenu te vlastita hardverska rješenja za njihovu upotrebu te povezivanja stvarnih uređaja i sklopova sa simulacijskim modelom, drugim riječima emulacija.

### 6.1. Mjerni postav

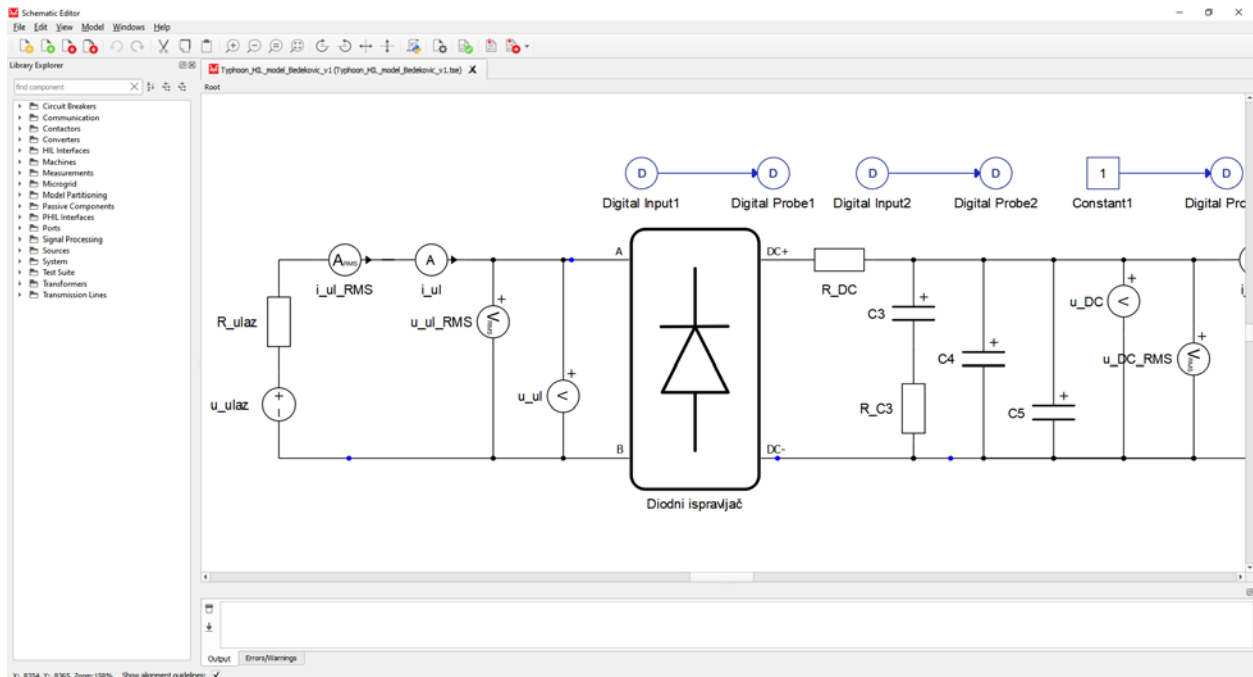
Typhoon HIL tehnološka je platforma koja se koristi za razvoj, testiranje i validaciju električnih elektroničkih i električnih sustava. Omogućava simuliranje stvarnih uvjeta i okruženja kako bi se testirale različite komponente sustava ili cjelokupni sustavi prije implementacije u stvarnom svijetu. Platforma Typhoon HIL koristi kombinaciju hardverske opreme i softverskog okruženja [13].

Hardverski dio kojeg čine kartice i operacijska jedinica, u ovom slučaju Typhoon HIL-402 operacijska jedinica i DSP interface 3.1 kartica, povezani s Arduino mikrokontrolerom koji kreira upravljačke impulse i Rigol MSO8064 osciloskopom za prikaz valnih oblika simulacije. Operacijska jedinica se povezuje na računalo USB kabelom te služi za obradu podataka u stvarnom vremenu. Kartice se koriste za slanje i prikupljanje signala, odnosno podataka. Hardverski dio je prikazan na slici 6.1.



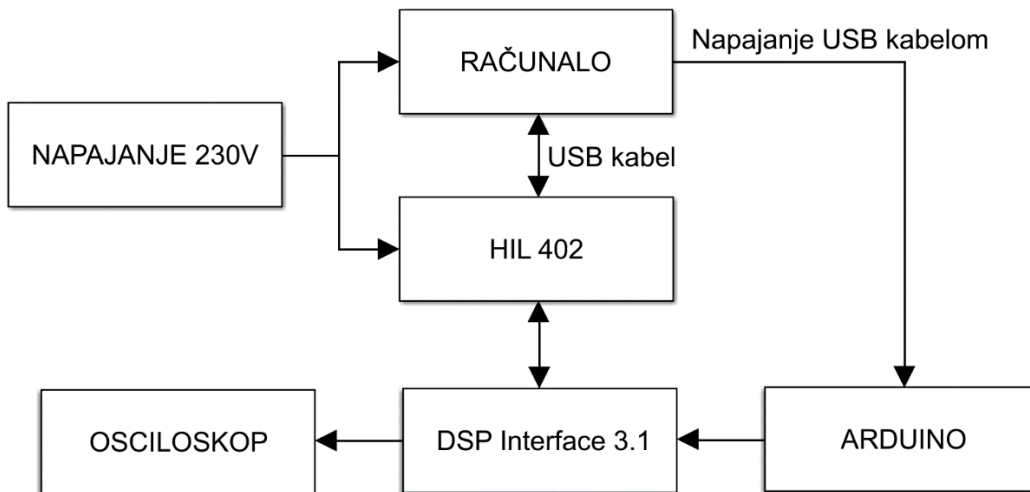
Slika 6.1. Hardverski dio Typhoon HIL-a

Softverski dio se dijeli na HIL SCADA sustav i na uređivač shema (eng. *Schematic Editor*). Unutar uređivač shema u Typhoon HIL-u obavlja se razvoj i simulacija modela i sustava električnih uređaja i mreža. Uređivač korisniku pruža mogućnost jednostavnog konstruiranja od jednostavnih do kompleksnih modela s velikim brojem elemenata i uređaja. Softverski dio prikazan je na slici 6.2.



Slika 6.2. Softverski dio Typhoon HIL-a

Nakon razvoja i izgradnje sheme, isti se model može simulirati preko Typhoon HIL simulacijskog okruženja. Simulacija nudi korisniku mogućnost testiranja modela na virtualnom hardveru kako bi se provjerila njegova funkcionalnost, izvedba i ponašanje. U ovom diplomskom radu simulira se ponašanje polumosnog spoja izmjenjivača s upravljačkim impulsima koji su generirani preko Arduino mikrokontrolera, dok je upravljački sklop povezan kao na slici 4.4., odnosno kao u tablici 4.2. Umjesto SCADA-e i virtualnih osciloskopa koriste se analogni izlazi 1 i 2 za prikaz naponskih i strujnih valnih oblika na stvarnom osciloskopu povezani naponskim sondama. Na slici 6.3. prikazana je blok shema mjernog postava, dok je u tablici 6.1. detaljnije prikazano povezivanje komponenti i uređaja s Typhoon HIL karticom DSP interface 3.1.



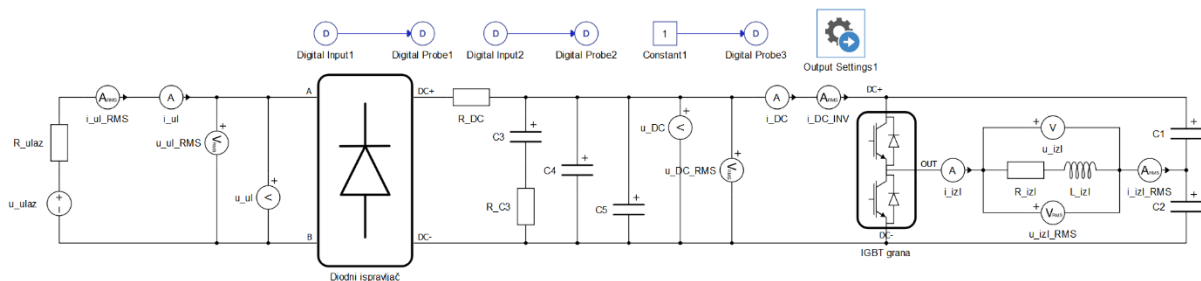
Slika 6.3. Blok shema mjernog postava

Tablica 6.1. Povezivanje komponenti i uređaja s modulom/karticom Typhoon HIL DSP interface 3.1.

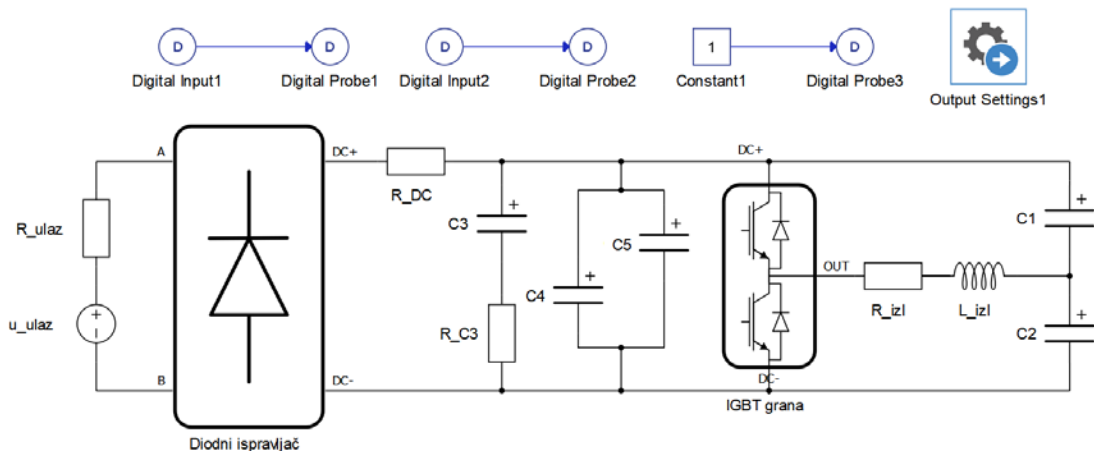
| Typhoon HIL DSP interface 3.1 pinovi | Komponente i uređaji                           |
|--------------------------------------|--|
| Analog Output 1                      | osciloskop - kanal 1                           |
| Analog Output 2                      | osciloskop - kanal 2                           |
| Digital Output 10                    | Digital Input 10 Typhoon HIL DSP interface 3.1 |
| Digital Input 1                      | D52 Arduino                                    |
| Digital Input 2                      | D53 Arduino                                    |
| GND                                  | GND Arduino                                    |

## 6.2. Typhoon HIL model

Na slici 6.4. prikazan je model pretvaračkog sklopa unutar Typhoon HIL programa, dok je na slici 6.5. prikazan model pretvaračkog sklopa bez mjernih uređaja radi boljeg prikaza. Model je rađen prema uzoru na stvarni pretvarač sa slike 5.3.



Slika 6.4. model pretvaračkog sklopa unutar Typhoon HIL-a



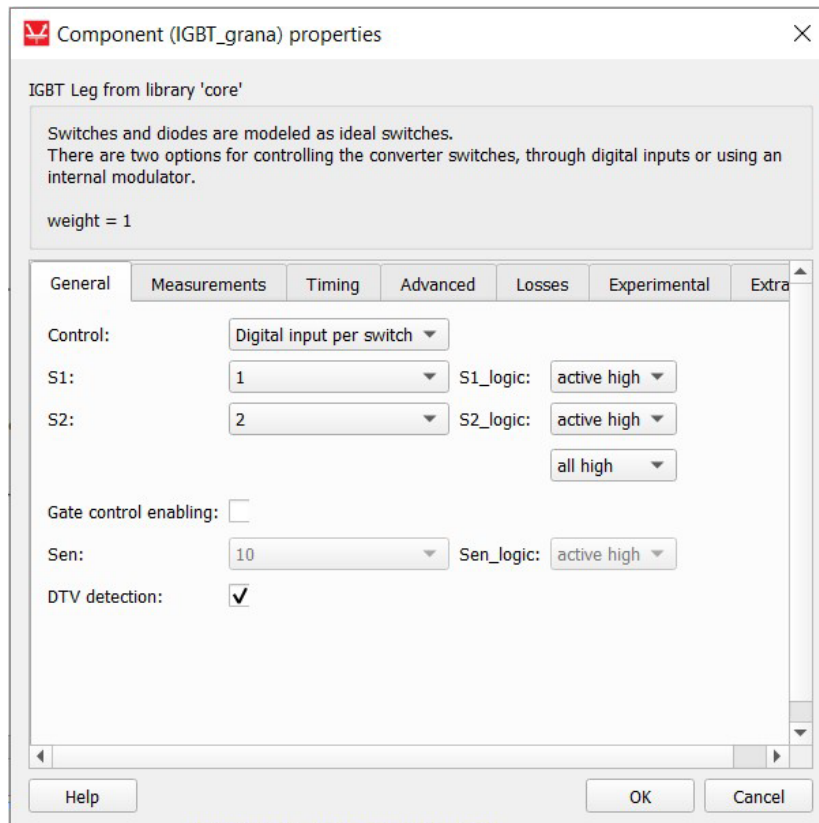
Slika 6.5. model pretvaračkog sklopa bez mjernih uređaja unutar Typhoon HIL-a

Unutar tablice 6.2. nalaze se vrijednosti komponenti korištenih u modelu pretvaračkog sklopa sa slika 6.4. i 6.5.

Tablica 6.2. vrijednosti komponenti u Typhoon HIL shemi

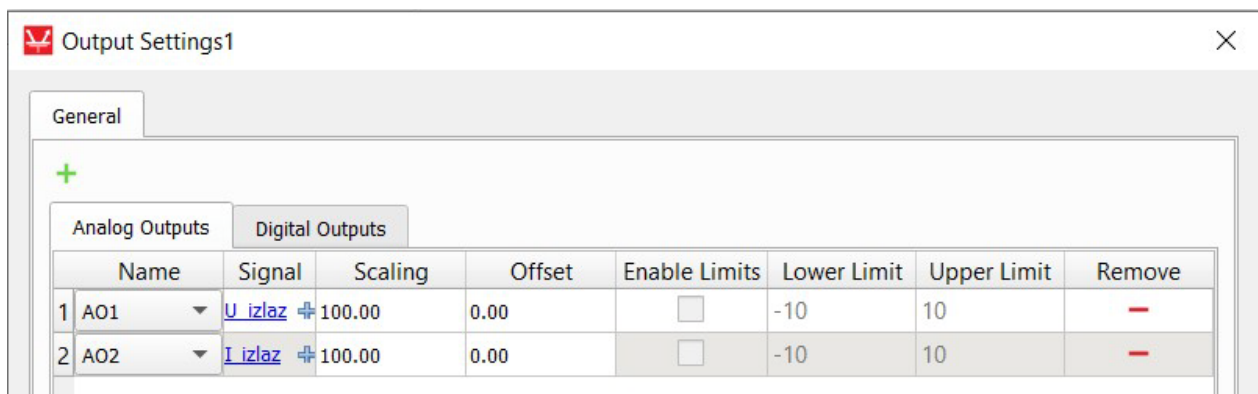
| Komponenta sheme | Vrijednost          |
|------------------|---------------------|
| U_ulaz           | 230 V, 50 Hz, sinus |
| R_ulaz           | 0,1 $\Omega$        |
| R_DC             | 1 $\Omega$          |
| R_C3             | 0,01 $\Omega$       |
| R_izlaz          | 800 $\Omega$        |
| L_izlaz          | 0,3 H               |
| C1               | 3300 $\mu$ F        |
| C2               | 3300 $\mu$ F        |
| C3               | 3300 $\mu$ F        |
| C4               | 0,1 $\mu$ F         |
| C5               | 0,1 $\mu$ F         |

Na slici 6.6. nalaze se postavke komponente IGBT grane. Iako je na pravom pretvaraču prema kojem je rađena maketa, pretvaračka komponenta MOSFET zbog nepostojanja modela MOSFET-a korištena je IGBT grana koja ima vrlo slične karakteristike kao MOSFET.



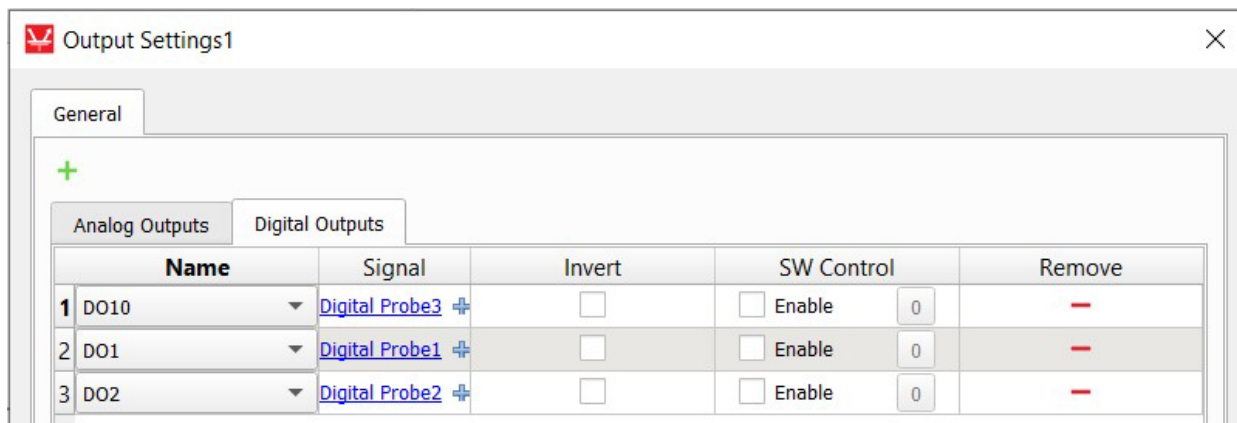
Slika 6.6. Postavke IGBT grane

Na slikama 6.7. i 6.8. prikazane su izlazne postavke (eng. *Output Settings*) koje služe za postavljanje signala na analogne i digitalne izlaze. Analogni izlazi služe za prikaz struja i napona trošila preko vanjskog osciloskopa, dok digitalni izlazi služe za primanje vanjskih digitalnih signala iz Arduina i blokova iz modela.



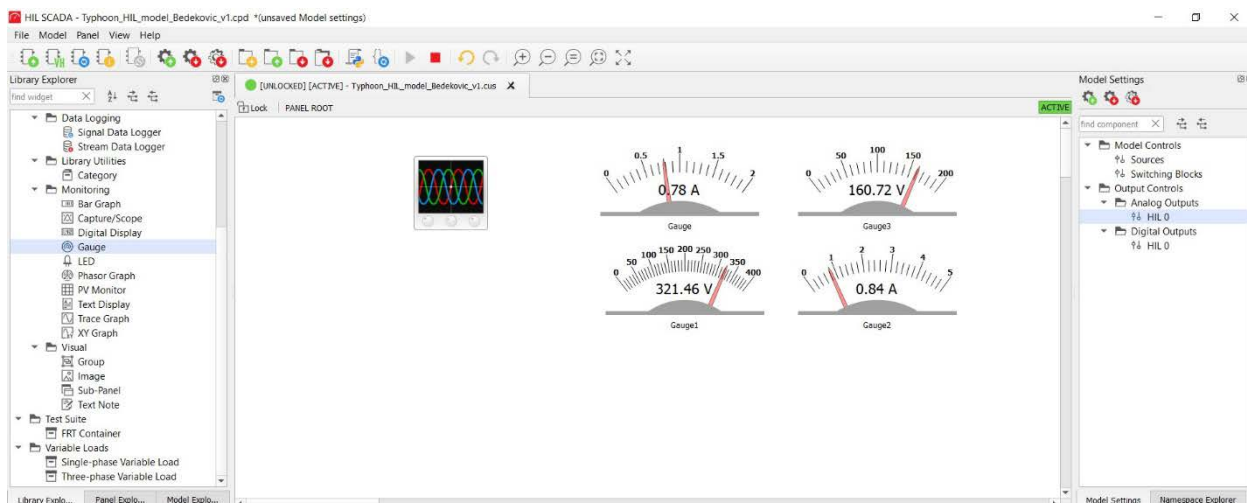
Slika 6.7. Postavke bloka izlazne postavke za analogne izlaze



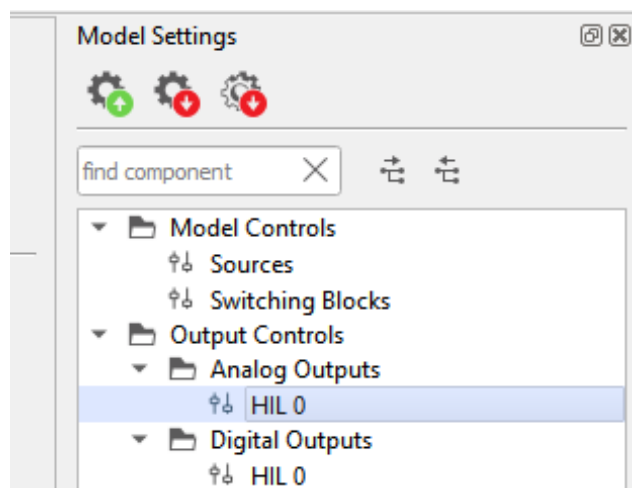


Slika 6.8. Postavke bloka izlazne postavke za digitalne izlaze

Nakon izrade sheme, postavljanja svih parametara i blokova kao u slikama 6.6. do 6.8. i tablici 6.2. gumbom “Compile and (re)load model in HIL SCADA” vrši se kompajliranje, stvaranje kôda i učitavanje modela u HIL SCADA-i. HIL SCADA prikazana je na slici 6.9. Unutar SCADA-e se mogu dodati razni blokovi za prikaz, mjerenje i spremanje odabranih signala. U ovom radu nije bilo potrebno dodavanje dodatnih blokova s obzirom da je korišten stvarni osciloskop za prikaz valnih oblika signala. U SCADA-i unutar postavki modela otvara se “HIL0” unutar mape ‘analogni izlazi’ unutar mape ‘kontrola izlaza’, lokacija prikazana na slici 6.10. unutar koje se odabiru signali koji se žele prikazati na osciloskopu te se podešava skaliranje, pomak te gornja i donja granica za odabrane signale. Prikaz postavki analognih izlaza HIL0 nalazi se na slici 6.11.



Slika 6.9. HIL SCADA



Slika 6.10. Lokacija postavki analognih izlaza HIL0

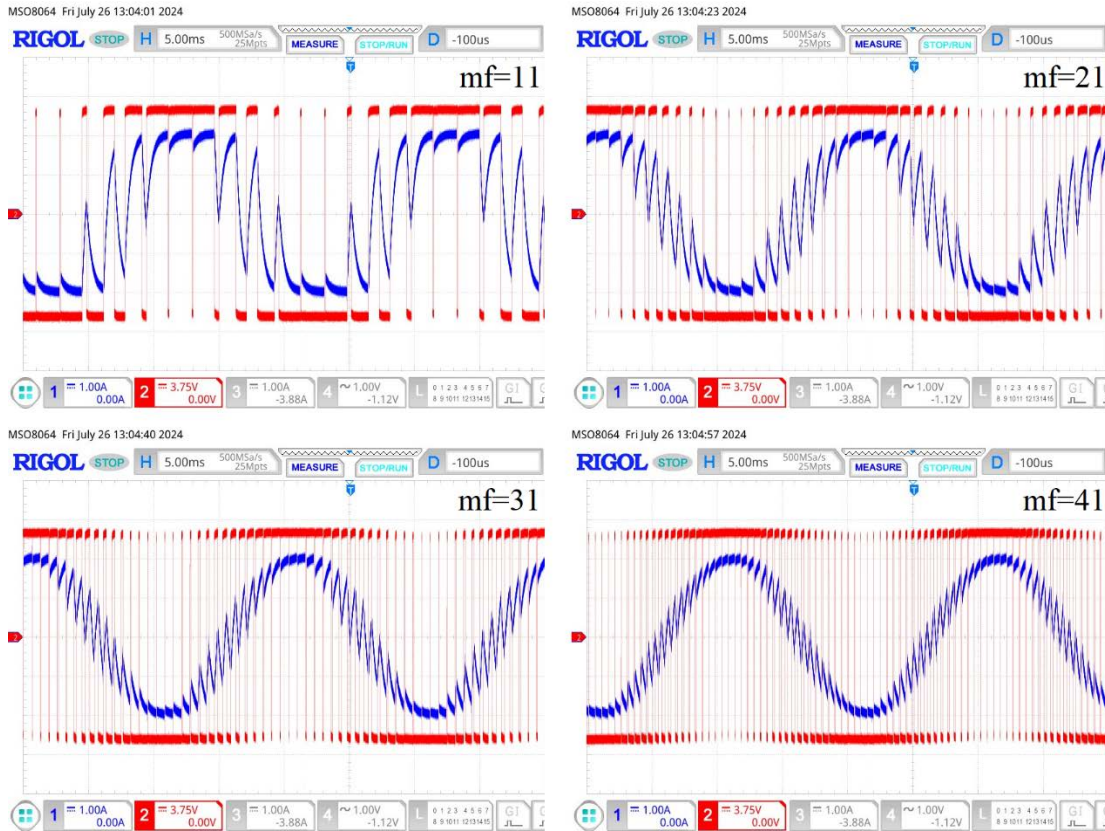
The screenshot shows the 'Analog Outputs Settings for HIL 0' window. It features a 'Show' dropdown set to 'All' and a 'channels' gear icon. Below is a table with the following data:

| Output | Signal   | Scaling            | Offset (Vdac) | Lower/Upper Limit (Vdac) | Lock                     |
|--------|----------|--------------------|---------------|--------------------------|--------------------------|
| AO1    | U_izlaz  | 20.0 V per 1 Vdac  | 0.0           | 0.0 0.0                  | <input type="checkbox"/> |
| AO2    | I_izlaz  | 1.0 A per 1 Vdac   | 0.0           | 0.0 0.0                  | <input type="checkbox"/> |
| AO3    | const_0V | 100.0 V per 1 Vdac | 0.0           | 0.0 0.0                  | <input type="checkbox"/> |
| AO4    | const_0V | 100.0 V per 1 Vdac | 0.0           | 0.0 0.0                  | <input type="checkbox"/> |
| AO5    | const_0V | 100.0 V per 1 Vdac | 0.0           | 0.0 0.0                  | <input type="checkbox"/> |

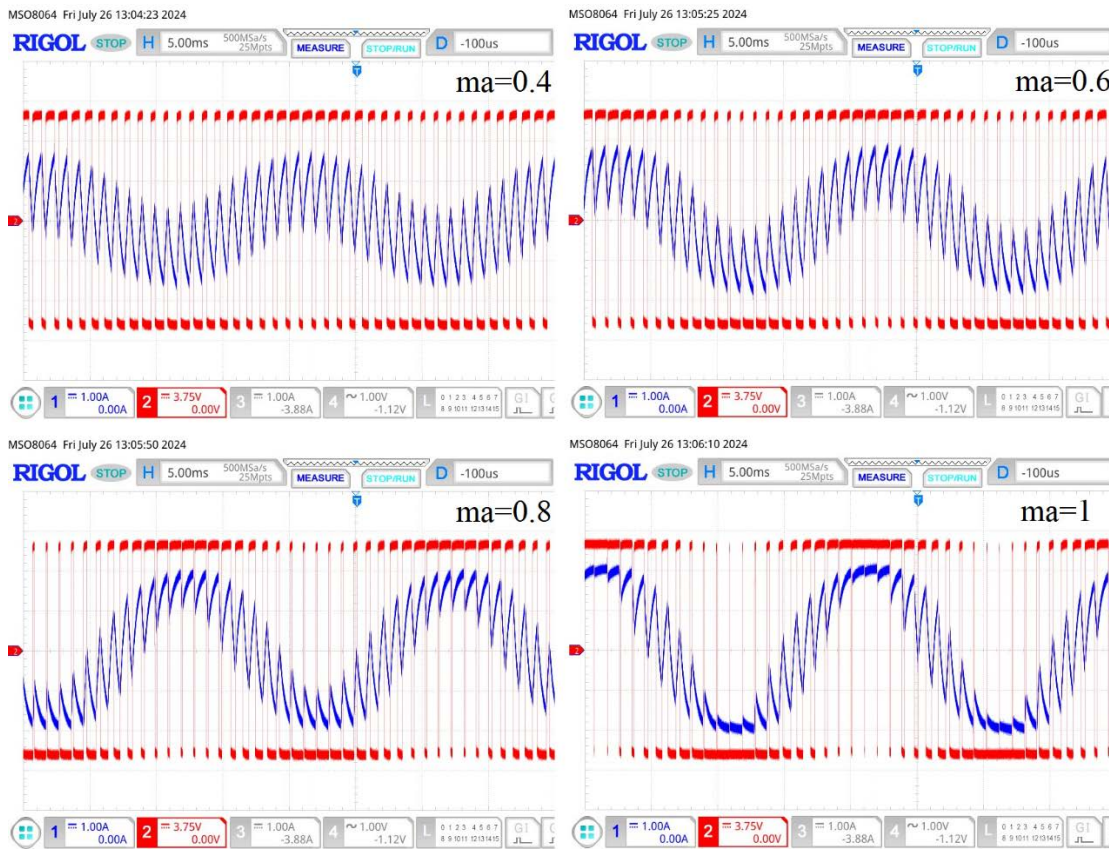
Slika 6.11. Podešenje postavki analognih izlaza HIL0

### 6.3. Rezultati HIL simulacija – valni oblici

Na slici 6.12. prikazani su valni oblici napona i struja trošila za različite modulacijske faktore i konstantnu dubinu modulacije  $m_a = 1$ , dok su na slici 6.13. prikazani valni oblici napona i struja trošila za različite dubine modulacije i konstantnu modulacijsku frekvenciju  $m_f = 21$ .



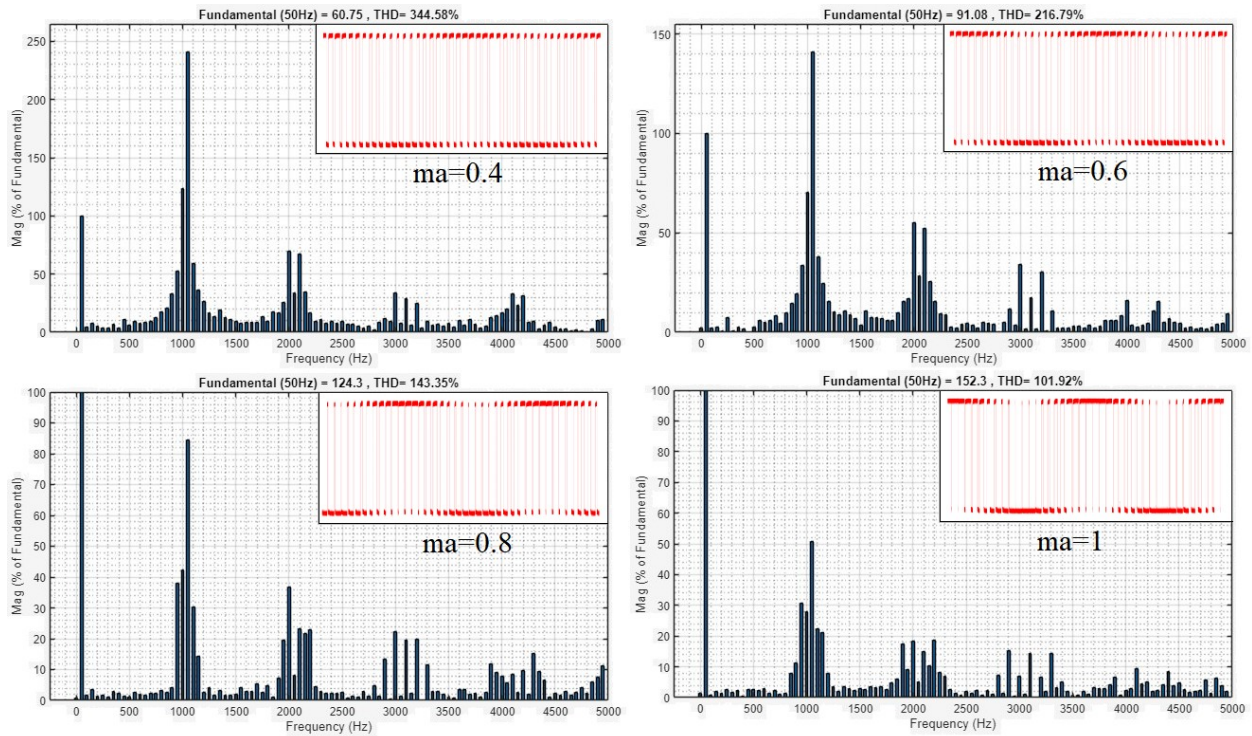
Slika 6.12. Snimljeni valni oblici izlaznih napona (crveno) i struja (plavo) za konstantni  $m_a = 1$ , pri mijenjanju  $m_f$ : a)  $m_f = 11$ , b)  $m_f = 21$ , a)  $m_f = 31$ , a)  $m_f = 41$



Slika 6.13. Snimljeni valni oblici izlaznih napona (crveno) i struja (plavo) za konstantni  $m_f = 21$ , pri mijenjanju  $m_a$ : a)  $m_a = 0,4$ , b)  $m_a = 0,6$ , a)  $m_a = 0,8$ , a)  $m_a = 1$

## 6.4. Rezultati HIL simulacija – harmonijska analiza napona

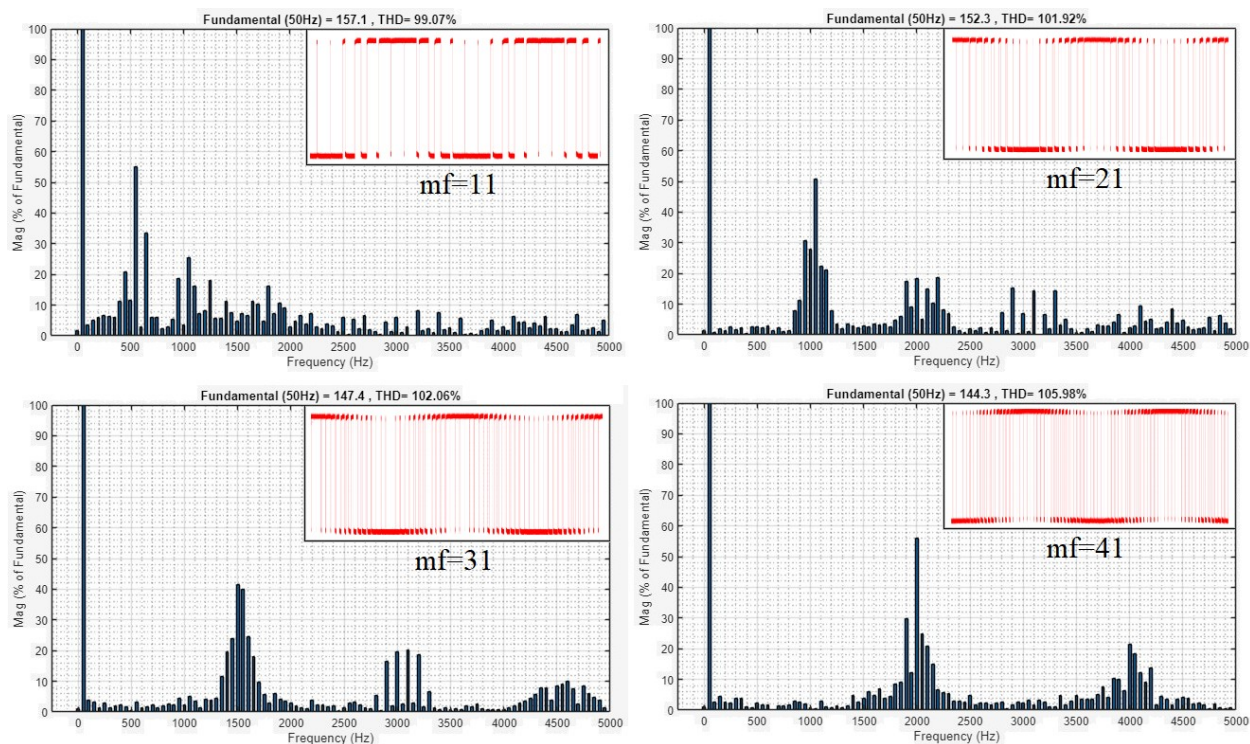
Na slici 6.14. prikazane su harmonijske analize valnih oblika napona trošila za promjenu dubine modulacije  $m_a$ , dok su na slici 6.15. prikazane harmonijske analize valnih oblika napona trošila za promjenu modulacijske frekvencije  $m_f$ .



Slika 6.14. Harmonijske analize valnih oblika napona trošila uz konstantni  $m_f = 21$ , pri promjeni  $m_a$ : a)  $m_a = 0,4$ , b)  $m_a = 0,6$ , c)  $m_a = 0,8$ , d)  $m_a = 1$

Tablica 6.1. Tablični prikaz parametara harmonijske analize valnih oblika napona trošila pri promjeni  $m_a$

| $m_f=21$ |          |            | Prva tri dominantna harmonika napona |          |                |          |                |          |
|----------|----------|------------|--------------------------------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|
|          |          |            | prvi harmonik                        |          | drugi harmonik |          | treći harmonik |          |
| $m_a$    | THDU [%] | $U(I)$ [V] | A [% $U(I)$ ]                        | $f$ [Hz] | A [% $U(I)$ ]  | $f$ [Hz] | A [% $U(I)$ ]  | $f$ [Hz] |
| 0,4      | 344,58   | 60,76      | 240,94                               | 1050     | 123,57         | 1000     | 69,95          | 2000     |
| 0,6      | 216,79   | 91,08      | 140,94                               | 1050     | 70,37          | 1000     | 55,17          | 2000     |
| 0,8      | 143,35   | 124,3      | 84,6                                 | 1050     | 42,21          | 1000     | 37,88          | 950      |
| 1        | 101,92   | 152,3      | 50,79                                | 1050     | 30,68          | 950      | 27,94          | 1000     |



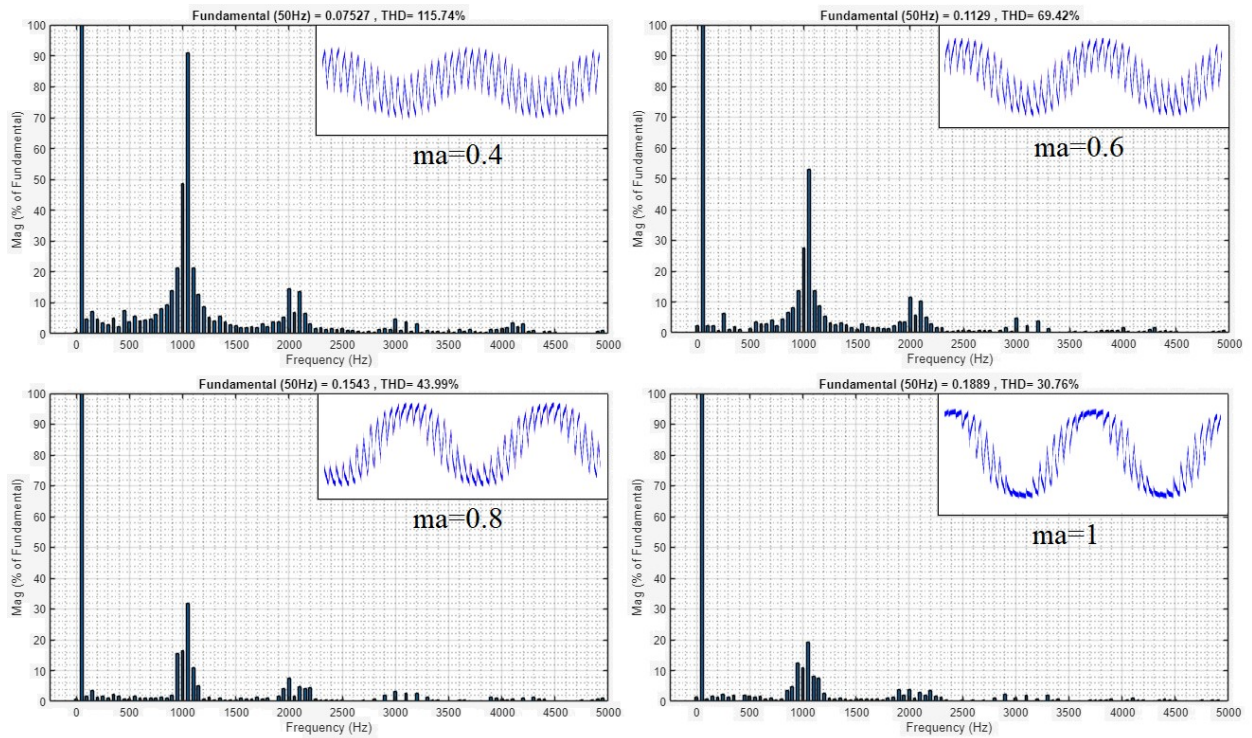
Slika 6.15. Harmonijske analize napona trošila uz konstantni  $m_a=1$ , pri promjeni  $m_f$ : a)  $m_f = 11$ , b)  $m_f = 21$ , c)  $m_f = 31$ , d)  $m_f = 41$

Tablica 6.2. Tablični prikaz parametara harmonijske analize valnih oblika napona trošila pri promjeni  $m_f$

| $m_a=1$ |          |            | Prva tri dominantna harmonika napona |          |                |          |                |          |
|---------|----------|------------|--------------------------------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|
|         |          |            | prvi harmonik                        |          | drugi harmonik |          | treći harmonik |          |
| $m_f$   | THDU [%] | $U(1)$ [V] | A [% $U(1)$ ]                        | $f$ [Hz] | A [% $U(1)$ ]  | $f$ [Hz] | A [% $U(1)$ ]  | $f$ [Hz] |
| 11      | 99,07    | 157,1      | 55,16                                | 550      | 33,59          | 650      | 25,41          | 1050     |
| 21      | 101,92   | 152,3      | 50,79                                | 1050     | 30,68          | 950      | 27,94          | 1000     |
| 31      | 102,06   | 147,4      | 41,46                                | 1500     | 40,09          | 1550     | 23,89          | 1450     |
| 41      | 105,98   | 144,3      | 56,13                                | 2000     | 29,87          | 1900     | 21,37          | 4000     |

## 6.5. Rezultati HIL simulacija – harmonijska analiza struja

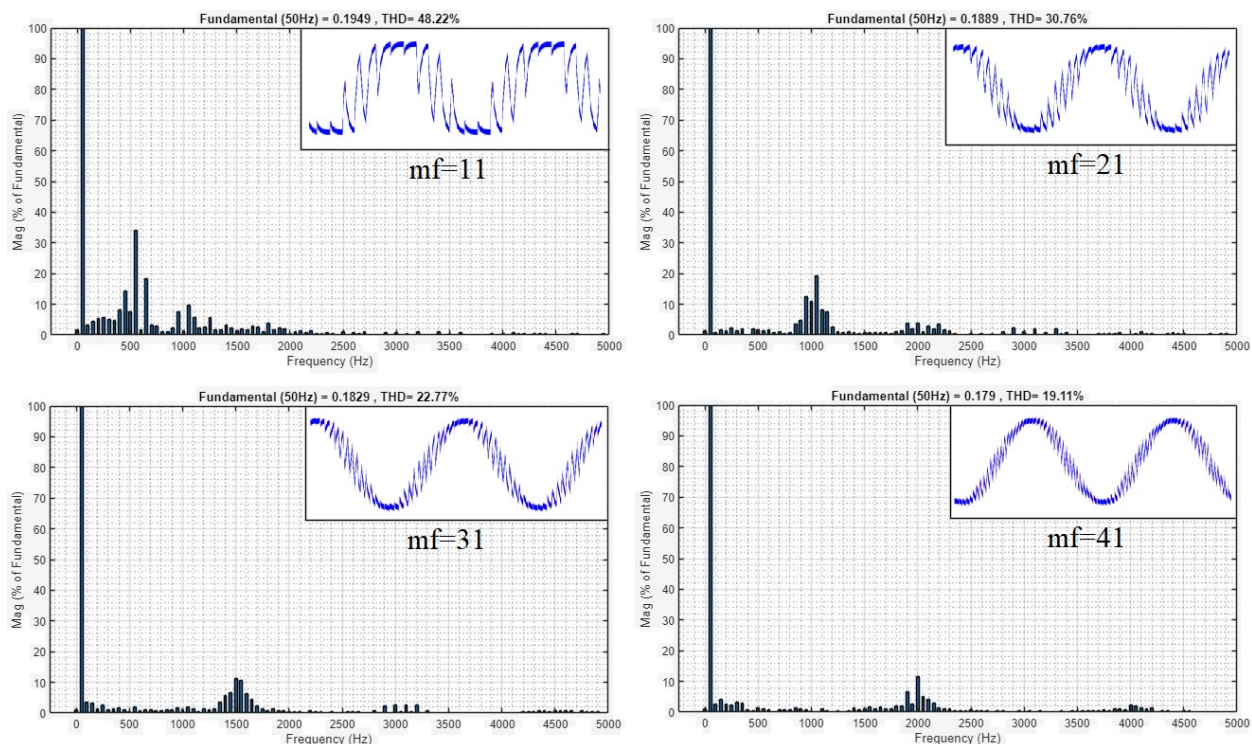
Na slici 6.16. prikazane su harmonijske analize valnih oblika struje trošila za promjenu dubine modulacije  $m_a$ , dok su na slici 6.17. prikazane harmonijske analize valnih oblika struje trošila za promjenu modulacijske frekvencije  $m_f$ .



Slika 6.16. Harmonijske analize struja trošila uz konstantni  $m_f = 21$ , pri promjeni  $m_a$ : a)  $m_a = 0,4$ , b)  $m_a = 0,6$ , c)  $m_a = 0,8$ , d)  $m_a = 1$

Tablica 6.3. Tablični prikaz parametara harmonijske analize valnih oblika struje trošila pri promjeni  $m_a$

| $m_f=21$ |          |             | Prva tri dominantna harmonika struje |          |                |          |                |          |
|----------|----------|-------------|--------------------------------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|
|          |          |             | prvi harmonik                        |          | drugi harmonik |          | treći harmonik |          |
| $m_a$    | THDI [%] | $I(I)$ [mA] | A [%I(I)]                            | $f$ [Hz] | A [%I(I)]      | $f$ [Hz] | A [%I(I)]      | $f$ [Hz] |
| 0,4      | 115,74   | 75,27       | 91                                   | 1050     | 48,61          | 1000     | 21,39          | 950      |
| 0,6      | 69,42    | 112,9       | 53,22                                | 1050     | 27,66          | 1000     | 13,83          | 950      |
| 0,8      | 43,99    | 154,3       | 31,93                                | 1050     | 16,58          | 1000     | 15,53          | 950      |
| 1        | 30,76    | 188,9       | 19,18                                | 1050     | 12,56          | 950      | 10,94          | 1000     |



Slika 6.17. Harmonijske analize valnih oblika struja trošila uz konstantni  $m_a = 1$ , pri promjeni  $m_f$ : a)  $m_f = 11$ , b)  $m_f = 21$ , c)  $m_f = 31$ , d)  $m_f = 41$

Tablica 6.4. Tablični prikaz parametara harmonijske analize valnih oblika napona trošila pri promjeni  $m_f$

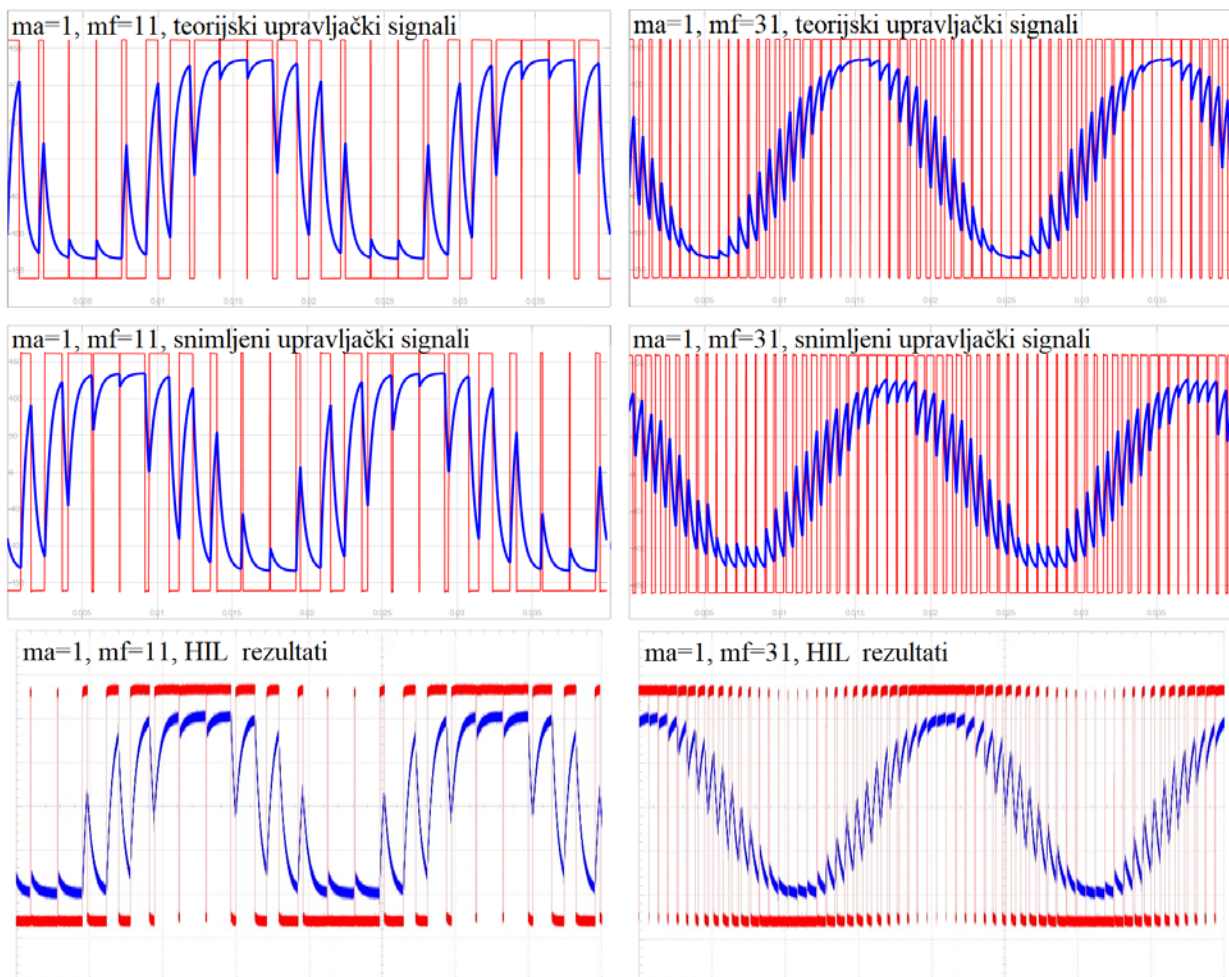
| $m_a=1$ |       | Prva tri dominantna harmonika struje |                  |               |                  |                |                  |                |
|---------|-------|--------------------------------------|------------------|---------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
|         |       | THDI                                 |                  | prvi harmonik |                  | drugi harmonik |                  | treći harmonik |
| $m_f$   | [%]   | $I(I)$<br>[mA]                       | A<br>[% $I(I)$ ] | $f$<br>[Hz]   | A<br>[% $I(I)$ ] | $f$<br>[Hz]    | A<br>[% $I(I)$ ] | $f$<br>[Hz]    |
| 11      | 48,22 | 194,9                                | 33,95            | 550           | 18,47            | 650            | 14,41            | 450            |
| 21      | 30,76 | 188,9                                | 19,18            | 1050          | 12,56            | 950            | 10,94            | 1000           |
| 31      | 22,77 | 182,9                                | 11,35            | 1500          | 10,66            | 1550           | 6,76             | 1450           |
| 41      | 19,11 | 179                                  | 11,68            | 2000          | 6,54             | 1900           | 5,11             | 2050           |

Iz slika 6.12. – 6.17. i tablica 6.1. – 6.4. se uočava jednak trend kao u poglavlju 5.2. iz slika 5.15. – 5.21. i tablica 5.1. – 5.4. uz promjenu vrijedosti iz tablica do 8 % za THD i amplituda osnovnih harmonika te do 40 % za amplitude dominantnih harmonika uz nekoliko nasumičnih odstupanja do 450%. Uočava se razlika u ponašanju amplitude osnovnog harmonika struje pri promjeni modulacijske frekvencije. U Typhoon HIL-u s povećanjem modulacijske frekvencije amplituda osnovnog harmonika struje pada s 194.9 mA pri  $m_f=11$  na 179 mA pri  $m_f=41$ , dok u MATLAB-u ostaje jednaka. Odstupanja se javljaju zbog izvršavanja simulacija s određenim vremenom uzorka koji diskretizira signale, odrađivanje harmonijske analize do frekvencije 5000 Hz te distorzije signala napona i struja unutar osciloskopa i naponskih sondi.

Posljednje, prema svim rezultatima i analizama izrađeni upravljački sustav je validiran i potpuno spreman za implementaciju na stvarni pretvarač.

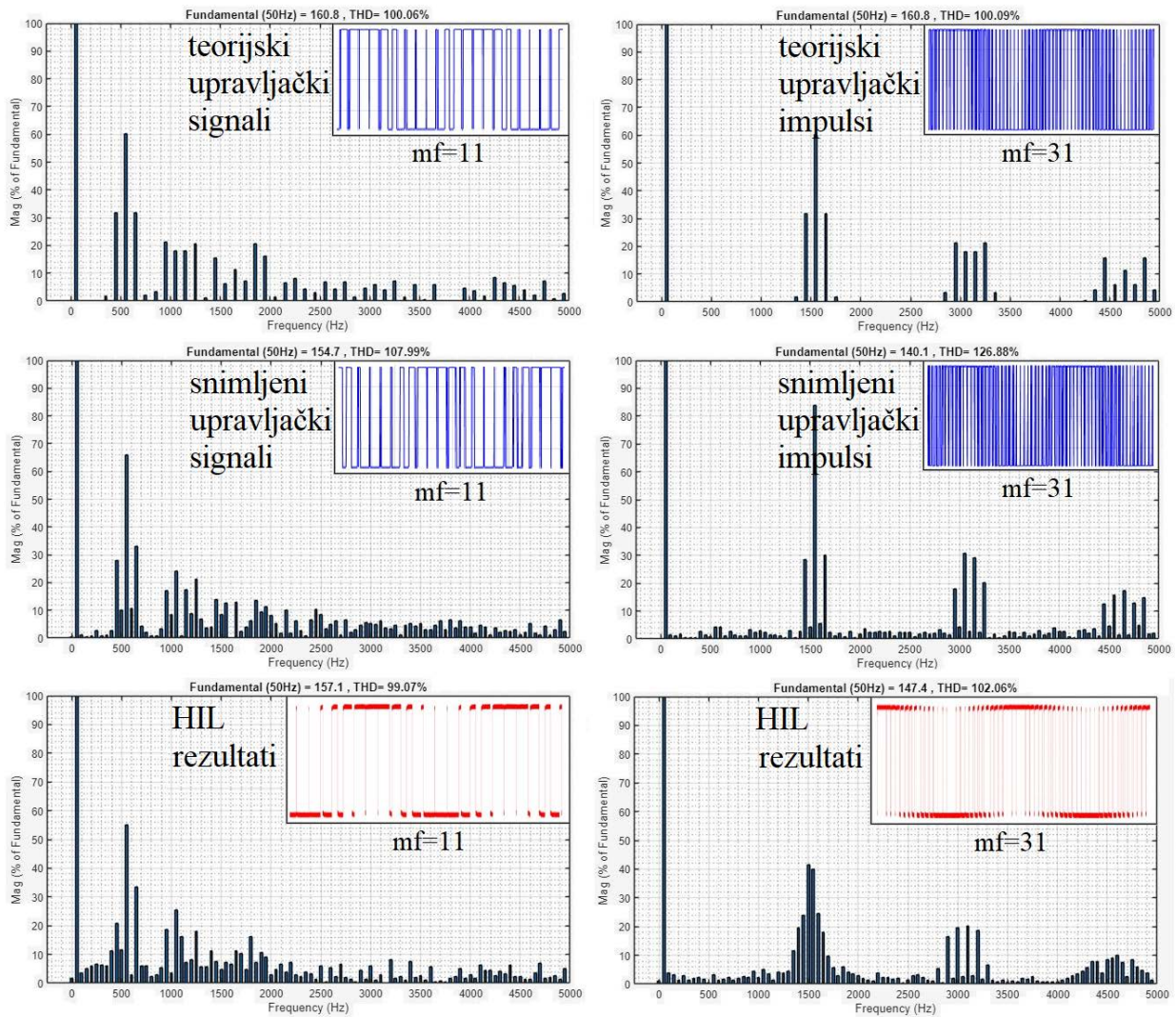
## 6.6. Uspoređivanje dobivenih valnih oblika

Na slici 6.18. vidi se usporedba valnih oblika struja i napona, na slici 6.19. vidi usporedba harmonijskih analiza napona dok se na slici 6.20. vidi usporedba harmonijskih analiza struja. U svim usporedbama koriste se parametri sinusno pulсно-širinske modulacije:  $m_a = 1$  i  $m_f = 11$  (lijeve slike) te  $m_a = 1$  i  $m_f = 31$  (desne slike) za slučajeve simulacije u MATLAB-u sa teorijskim upravljačkim signalima, snimljenim upravljačkim signalima te simulacija u Typhoon HIL-u.

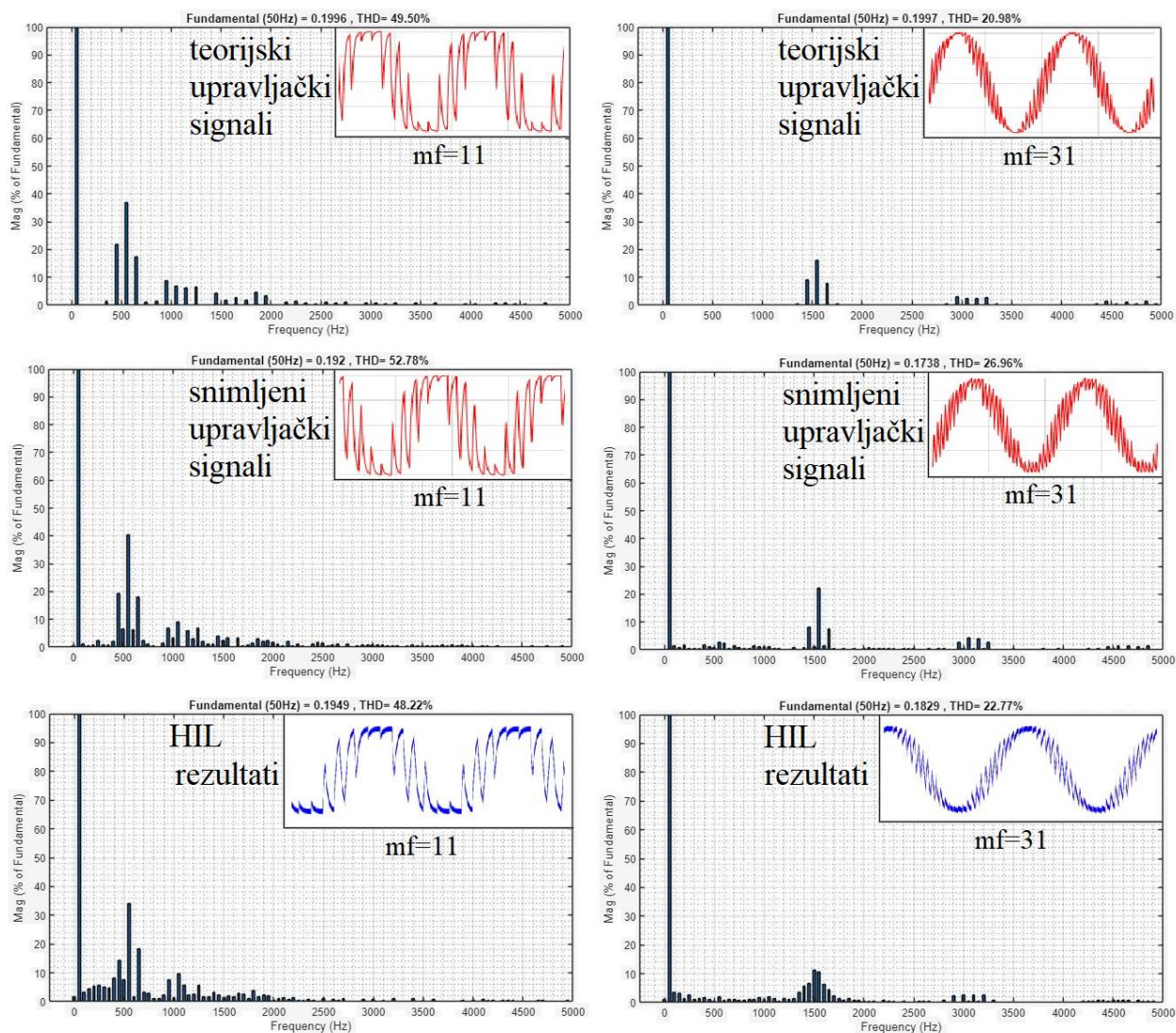


Slika 6.18. Usporedba valni oblika struja i napona trošila za slučaj slučaj  $m_a=1$  i  $m_f=11$  te  $m_a=1$  i  $m_f=31$





Slika 6.19. Usporedba harmonijskih analiza napona trošila za slučaj slučaj  $m_a=1$  i  $m_f=11$  te  $m_a=1$  i  $m_f=31$



Slika 6.20. Usporedba harmonijskih analiza struja trošila za slučaj slučaj  $m_a=1$  i  $m_f=11$  te  $m_a=1$  i  $m_f=31$

U tablici 6.5. nalazi se usporedbe parametara harmonijske analize valnog oblika napona trošila za  $m_a=1$  i  $m_f=11$ , dok se u tablici 6.6. nalazi usporedbe parametara harmonijske analize valnog oblika napona trošila za  $m_a=1$  i  $m_f=31$ .

Tablica 6.5. Usporedba parametara harmonijske analize valnog oblika napona trošila za  $m_a=1$  i  $m_f=11$

|                               | $m_a = 1, m_f = 11$ |            | Prva tri dominantna harmonika napona |          |                |            |                |          |
|-------------------------------|---------------------|------------|--------------------------------------|----------|----------------|------------|----------------|----------|
|                               |                     |            | prvi harmonik                        |          | drugi harmonik |            | treći harmonik |          |
|                               | THDU [%]            | $U(1)$ [V] | A [% $U(1)$ ]                        | $f$ [Hz] | A [% $U(1)$ ]  | $f$ [Hz]   | A [% $U(1)$ ]  | $f$ [Hz] |
| teorijski upravljački impulsi | 100,06              | 160,8      | 60,12                                | 550      | 21,24          | 950 & 1250 | 20,75          | 1850     |
| snimljeni upravljački impulsi | 107,99              | 154,7      | 65,96                                | 550      | 32,96          | 650        | 24,21          | 1050     |
| HIL rezultati                 | 99,07               | 157,1      | 55,16                                | 550      | 33,59          | 650        | 25,41          | 1050     |

Tablica 6.6. Usporedba parametara harmonijske analize valnog oblika napona trošila za  $m_a=1$  i  $m_f=31$

|                               | $m_a = 1, m_f = 31$ |            | Prva tri dominantna harmonika napona |          |                |             |                |             |
|-------------------------------|---------------------|------------|--------------------------------------|----------|----------------|-------------|----------------|-------------|
|                               |                     |            | prvi harmonik                        |          | drugi harmonik |             | treći harmonik |             |
|                               | THDU [%]            | $U(1)$ [V] | A [% $U(1)$ ]                        | $f$ [Hz] | A [% $U(1)$ ]  | $f$ [Hz]    | A [% $U(1)$ ]  | $f$ [Hz]    |
| teorijski upravljački impulsi | 100,09              | 160,8      | 60,14                                | 1550     | 21,26          | 2950 & 3250 | 15,71          | 4450 & 4850 |
| snimljeni upravljački impulsi | 126,88              | 140,1      | 83,81                                | 1550     | 30,84          | 3050        | 30,17          | 1650        |
| HIL rezultati                 | 102,06              | 147,4      | 41,46                                | 1500     | 40,09          | 1550        | 23,89          | 1450        |

U tablici 6.7. nalazi se usporedbe parametara harmonijske analize valnog oblika struje trošila za  $m_a=1$  i  $m_f=11$ , dok se u tablici 6.8. nalazi usporedbe parametara harmonijske analize valnog oblika struje trošila za  $m_a=1$  i  $m_f=31$ .

Tablica 6.7. Usporedba parametara harmonijske analize valnog oblika struje trošila za  $m_a=1$  i  $m_f=11$

|                               | $m_a = 1, m_f = 11$ |             | Prva tri dominantna harmonika struje |          |                |          |                |          |
|-------------------------------|---------------------|-------------|--------------------------------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|
|                               |                     |             | prvi harmonik                        |          | drugi harmonik |          | treći harmonik |          |
|                               | THDI [%]            | $I(1)$ [mA] | A [% $I(1)$ ]                        | $f$ [Hz] | A [% $I(1)$ ]  | $f$ [Hz] | A [% $I(1)$ ]  | $f$ [Hz] |
| teorijski upravljački impulsi | 49,5                | 199,6       | 36,97                                | 550      | 21,96          | 450      | 8,72           | 950      |
| snimljeni upravljački impulsi | 52,78               | 192         | 40,54                                | 550      | 19,21          | 450      | 9,11           | 1050     |
| HIL rezultati                 | 48,22               | 194,9       | 33,95                                | 550      | 18,47          | 650      | 14,41          | 450      |

Tablica 6.8. Usporedba parametara harmonijske analize valnog oblika struje trošila za  $m_a=1$  i  $m_f=31$

|                               | $m_a = 1, m_f = 31$ |             | Prva tri dominantna harmonika struje |          |                |          |                |          |
|-------------------------------|---------------------|-------------|--------------------------------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|
|                               |                     |             | prvi harmonik                        |          | drugi harmonik |          | treći harmonik |          |
|                               | THDI [%]            | $I(1)$ [mA] | A [% $I(1)$ ]                        | $f$ [Hz] | A [% $I(1)$ ]  | $f$ [Hz] | A [% $I(1)$ ]  | $f$ [Hz] |
| teorijski upravljački impulsi | 20,98               | 199,7       | 15,98                                | 1550     | 8,99           | 1450     | 3,05           | 2950     |
| snimljeni upravljački impulsi | 26,96               | 173,8       | 22,26                                | 1550     | 8,01           | 1450     | 4,28           | 3050     |
| HIL rezultati                 | 22,77               | 182,9       | 11,35                                | 1500     | 10,66          | 1550     | 6,76           | 1450     |

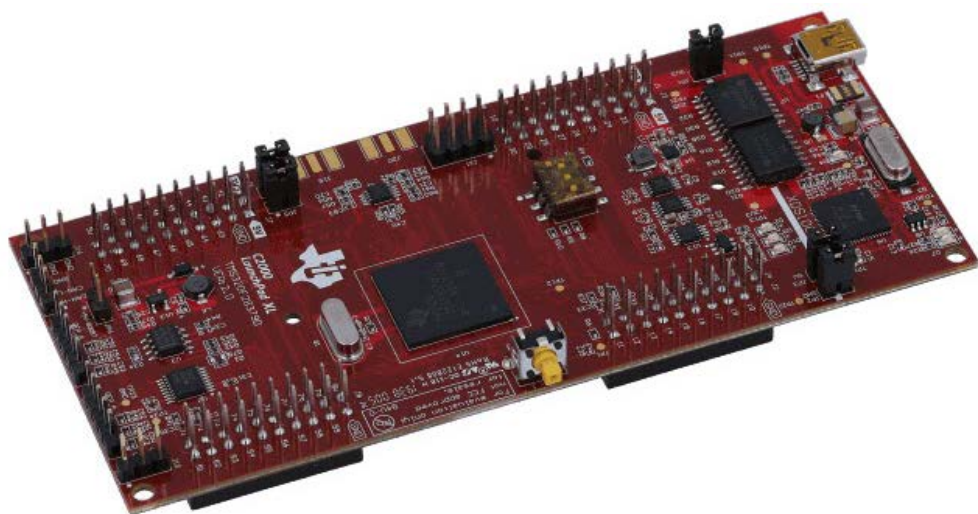
Sa slika 6.18. - 6.20. i tablica 6.5. - 6.8. uočava se jednak trend za simulacije u MATLAB-u sa teorijskim upravljačkim signalima, snimljenim upravljačkim signalima i simulacija u Typhoon HIL-u u usporedbi s očekivanim rezultatima prema teoriji. Javlja se odstupanja do 25% za THD

i amplitudu osnovnih harmonika između slučajeva te odstupanja do 100% za određene amplitude dominantnih harmonika. Sve amplitude harmonika i njihov red odnosno frekvencija zadovoljavaju tablicu 3.3. uz pojedina odstupanja amplitude i pomaka frekvencije na susjedni višekratnik sklopne frekvencije ili na blisku bočnu frekvenciju.

Najveća odstupanja javljaju se za slučaj snimljenih upravljačkih impulsa u MATLAB-u. Razlog toga je diskretizacija snimljenog signala s osciloskopom koji ima relativno mali broj uzorka, ponovna diskretizacija zbog izvođenja simulacija unutar MATLAB-a te distorzije upravljačkog signala unutar komponenti mikrokontrolera i osciloskopu te nesavršenosti sonde osciloskopa.

## 7. PRIJEDLOG ZA DORADU MAKETE

Iako maketa radi tehnički prihvatljivo, postoje određena ograničenja kao što je korištenje 16 kombinacija parametara zbog ograničenja memorije. U radu [5] s malom izmjenom kôda postojala je mogućnost odabira bilo koje dubine modulacije i modulacijske frekvencije, no zbog relativno male količine memorije Arduino se pokazao kao neprihvatljivo rješenje s takvom logikom izvođenja koja u memoriji sprema signal sinusa i trokuta te ih uspoređuje. Takav način rada bio bi moguć s korištenjem Texas Instruments F28379D DSP-a. F2837xD je mikroupravljač dizajniran za napredne upravljačke aplikacije zatvorene petlje kao što su industrijski motorni pogoni, solarni pretvarači i digitalna energija, električna vozila i prijevoz te senzorika i obrada signala [14]. Dvostruki podsustavi kontrole u stvarnom vremenu temelje se na Texas Instruments-ovom 32-bitnim procesoru (eng. *central processing unit*) ili kraće CPU C28x koji ima dvije jezgre te pruža 200 MHz obrade signala u svakoj jezgri. C28x CPU-ovi dodatno su poboljšani s TMU akceleratorom, koji omogućuje brzo izvršavanje algoritama s trigonometrijskim operacijama uobičajenim u transformacijama i izračunima petlje momenta koji su iznimno bitni za kreiranje SPWM impulsa te VCU akcelerator koji smanjuje vrijeme za složene matematičke operacije. TMS320F2837xD podržava do 1 MB ugrađene flash memorije i do 204 KB SRAM-a. Četiri neovisna 16-bitna ADC-a pružaju vrlo precizno i učinkovito upravljanje višestrukim analognim signalima, što u konačnici povećava propusnost sustava. Analogne i upravljačke periferije uključuju DAC, PWM, eCAP, eQEP i ostale. Periferije kao što su EMIF, CAN moduli i uPP sučelje proširuju povezivost F2837xD [15]. Na kraju, USB 2.0 (eng. *universal serial bus*) odnosno univerzalne serijske sabirnice omogućuju jednostavan i standardiziran priključak korisnicima. Na slici 7.1. prikazan je TMS320F28379D.



Slika 7.1. TMS320F28379D

Glavni blok koji bi se koristio u radu je napredni periferni pulsno-širinski modulator, odnosno ePWM blok koji kreira PWM modulaciju. ePWM je ključni element u kontroli mnogih energetske elektroničkih sustava koji se nalaze u komercijalnoj i industrijskoj opremi. Ovi sustavi uključuju digitalnu kontrolu motora, neprekidne izvore napajanja (UPS-ove), kontrolu napajanja, i druge oblike pretvorbe energije. ePWM periferija također može obavljati digitalno-analognu (DAC) funkciju, gdje je radni ciklus ekvivalentan analognoj vrijednosti DAC-a [14].

Umjesto Arduina za kreiranje impulsa moguće je koristiti navedeni mikrokontroler, dok bi uloga Arduina bila korisničko sučelje u kojem bi korisnik preko ekrana i tipkovnice odabirao parametre sinusno pulsno-širinske modulacije kao i u ovom radu. Arduino i TI F28397D mogu se povezati s 2 žice preko serijske komunikacije te bi nakon odabira parametara Arduino slao serijskom komunikacijom te vrijednosti u TI F28397D. Najjednostavniji način programiranja TI F28397D mikrokontrolera je preko MATLAB Simulinka; u prilogu 2 se nalaze upute za implementaciju upravljačkog algoritma sinusno pulsno-širinske modulacije na TI F28397D. Veliki dio Arduino kôda bi se mogao uzeti iz ovog diplomskog rada uz manje preinake. Nakon učitavanja kôda na Arduino i TI F28397D mikrokontroler sklop bi mogao raditi odvojeno od računala uz odabir bilo koje dubine modulacije, modulacijske frekvencije i mrtvog vremena. Prema gore navedenom Texas Instruments F28397D je dobro rješenje za real-time aplikacije računanja uz zadržavanje preciznosti te bi sa svojim preformansama potpuno zadovoljio prijedlog nadogradnje makete.

## 8. ZAKLJUČAK

Povećanjem sklopne frekvencije odnosno modulacijskog faktora THDI se značajno popravlja, odnosno smanjuje. Smanjenjem dubine modulacije THDU je veći, samim time i THDI. Za uzete vrijednosti i parametre najbolji THDU i THDI se dobije u slučaju  $m_a = 1$  i  $m_f = 41$  te THDU iznosi oko 100 %, dok THDI iznosi 29,91 %. Najgori THDU i THDI se dobije u slučaju  $m_a = 0.4$  i  $m_f = 11$  te THDU iznosi 372,85 %, dok THDI iznosi 123,40 %.

Korišteni sklop i mikrokontroler mogu davati znatno veće sklopne frekvencije te se na taj način može značajno smanjiti harmonijski sadržaj struje kao što se radi u praksi uz dodavanje filtra prije trošila. Na harmonijski sadržaj struje dodatno utječe i karakter trošila, a poželjno je imati što veći omjer  $L/R$  pošto se induktivna trošila ponašaju kao niskopropusni filter te prigušuje visoke harmonike. U radu je korišten  $L/R$  iznosa  $0.3 \text{ H} / 800 \text{ } \Omega$  odnosno  $3,75 \cdot 10^{-4}$  zbog strujnog ograničenja izmjenjivača uzrokovano visinom napona.

Simulacije, rezultati i proračuni se poklapaju uz odstupanja do 15% uz nekoliko većih odstupanja preko 100 %. Primjer odstupanja je dvostruko veća amplituda trećeg dominantnog harmonika sa snimljenim upravljačkim impulsima od teorijskih upravljačkih impulsa uz pomak frekvencije za 100 Hz te THDU 126.88 % sa snimljenim upravljačkim impulsima i 100.09 % sa teorijskim upravljačkim impulsima u MATLAB-u.

Arduino se pokazao kao dobar kontroler zbog svoje brzine, točnosti, svestranosti, jednostavnosti korištenja i cijene. Typhoon HIL se pokazao dobar za emulaciju pretvaračkog sklopa uz korištenje stvarnih upravljačkih signala iz upravljačkog sklopa te mjerenja i prikaza valnih oblika. MATLAB i MATLAB Simulink pokazali su se dobrima za izvođenje simulacija, pisanje i korištenje skripti, prikaz valnih oblika te računanje i prikaz harmonijskog sadržaja.

Napravljeni upravljački sklop je prema rezultatima simulacija i svim analizama validiran i potpuno spreman za implementaciju na stvarni pretvarač.

Dan je prijedlog za nadogradnju makete korištenjem TI F28379D mikrokontrolera serijskom komunikacijom povezanim na Arduino. Umjesto Arduina za kreiranje upravljačkih signala koristio bi se navedeni mikrokontroler, dok bi uloga Arduina bila korisničko sučelje u kojem bi korisnik preko ekrana i tipkovnice odabirao parametre sinusno pulsno-širinske modulacije kao i u ovom radu. S time se dobiva odabir bilo koje dubine modulacije, modulacijske frekvencije i mrtvog vremena.

## LITERATURA

- [1] I.Flegar, Elektonički energetski pretvarači, Kigen d.o.o., Zagreb, 2010.
- [2] Power electronics applications in various fields, dostupno na: <http://www.Completepowerelectronics.com/power-electronics-applications-in-various-fields/> [25.5.2024]
- [3] The Past, Present, and Future Of Power Electronic, IEEE industrial electronic magazine, 2009, dostupno na: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5075788> [25.5.2024]
- [4] M. Pavin, Pulsno-širinska modulacija autonomnog, trofaznog, naponskog izmjenjivača, Osijek, 2018.
- [5] P. Galić, Upravljanje jednom granom trofaznog izmjenjivača sinusno pulsnom-širinskom moduluacijom pomoću razvojnog sustava Arduino ili Raspberry Pi, Osijek, 2020.
- [6] R. Bedeković, Implementacija SPWM upravljanja autonomnog naponskog izmjenjivača pomoću Arduino mikroupravljača, Osijek, 2022.
- [7] S. A. Zulkifli, MATLAB-Arduino as a Low Cost Microcontroller for 3 phase inverter, Batu Pahat, 2014.
- [8] Arduino web stranica mega 2560 hardvera, dostupno na: <https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560/> [28.7.2024]
- [9] Web stranica o PETG materijalu, dostupno na: <https://www.acmeplastics.com/what-is-petg> [6.8.2024]
- [10] Fusion web stranica, dostupno na: <https://www.autodesk.com/education/edu-software/fusion> [6.8.2024]
- [11] MATLAB web stranica, dostupno na: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> [28.7.2024]
- [12] MATLAB Simulink web stranica, dostupno na: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html> [28.7.2024]
- [13] Typhoon HIL, Dokumentacija, dostupno na: <https://www.typhoon-hil.com/documentation/> [25. 5. 2024.]
- [14] TI F28379D web stranica, dokumentacija, dostupno na: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28379d.pdf?ts=1718825312367> [6.8.2024]



[15] TI F28379D web stranica, dokumentacija, dostupno na: <https://www.ti.com/lit/ug/spruhm8k/spruhm8k.pdf> [6.8.2024]

## SAŽETAK

Opisana je izrada upravljačkog sustava bipolarne pulsno-širinske modulacije jedne grane trofaznog naponskog izmjenjivača u polumosnom spoju. Napravljena je teorijska podloga te analiza rada. Upravljački algoritam implementiran je na Arduino mikrokontroleru preko Arduino razvojnog sustava koristeći C++ programski jezik. Upravljačkom algoritmu dodana je vanjska tipkovnica i ekran kako bi korisnik mogao unositi i vidjeti odabrane parametre modulacije. Objasnjen je način generiranja matrice vremena trajanja impulsa te Arduino kôd. Napravljeno je kućište u kojem se nalazi sklop. Nakon razvoja i implementacije algoritma, napravljen je model sklopa pretvarača unutar MATLAB Simulinka i Typhoon HIL-a te je verificiran rad sklopa kao što je teoretski predviđeno za različite parametre. Simulirani su valni oblici napona i struja na trošilu te njihove harmonijske analize. Validiran je rad sklopa i potvrđena mu je spremnost implementacije na postojeći izmjenjivač. Posljednje, dan je prijedlog za nadogradnju makete.

Ključne riječi: Arduino, izmjenjivač, MATLAB, sinusno-pulsno širinska modulacija, Typhoon HIL

## **ABSTRACT**

### **Development of a control circuit for one leg of a three-phase inverter using the CHIL methodology on the Arduino and TI platforms**

The design of the bipolar pulse-width modulation control circuit of a one leg of three-phase voltage inverter in a half-bridge topology is described. The theoretical basis for the analysis of the work was created. The control algorithm was implemented on the Arduino microcontroller via the Arduino development system using the C++ programming language. An external keyboard and display were added to the control algorithm so that the user could enter and see the selected modulation parameters. The method of generating the pulse duration matrix and the Arduino code are explained. The housing in which the circuit is placed is made. After the development and implementation of the algorithm, a model of the device was created within MATLAB Simulink and Typhoon HIL, and the operation of the device was verified as theoretically predicted for different modulation parameters. Waveforms of voltages and currents on the load and their harmonic analysis were simulated. The operation of the device was validated and its readiness for implementation on the existing inverter was confirmed. Finally, a proposal was given for upgrading the model.

Keywords: Arduino, inverter, MATLAB, sine pulse-width modulation, Typhoon HIL

## ŽIVOTOPIS

Robert Bedeković rođen je 24.5.2000. u Virovitici. 2007. godine upisuje Osnovnu školu Petra Preradovića u Pitomači. 2015. godine upisuje Tehničku školu Virovitica, smjer elektrotehničar. Tijekom srednjoškolskog obrazovanja sudjeluje na natjecanjima iz matematike te 2019. godine predstavlja svoj rad – samobalansirajući Arduino robot i školu na međunarodnom sajmu gospodarstva, obrtništva i poljoprivrede Viroexpo. 2019. godine upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, smjer elektrotehnika. Na drugoj godini Preddiplomskog studija elektrotehnike odabire smjer Elektroenergetika. 2022. završava preddiplomski studij te stječe titulu Prvostupnika elektrotehnike i informacijske tehnologije. Nakon toga upisuje diplomski studij na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, smjer elektroenergetika, modul DEB – održiva elektrenergetika.







```

2, 296, 2, 182, 2, 308, 2, 170, 2, 318, 2, 162, 2, 326, 2, 154, 2,
333, 2, 148, 2, 343, 2, 139, 2, 340, 2, 144, 2, 340, 2, 144, 2, 338,
2, 148, 2, 333, 2, 154, 2, 326, 2, 162, 2, 318, 2, 170, 2, 308, 2,
182, 2, 296, 2, 194, 2, 283, 2, 208, 2, 275, 2, 216, 2, 254, 2, 238,
2, 238, 2, 254, 2, 216, 2, 275, 2, 208, 2, 283, 2, 194, 2, 296, 2,
182, 2, 308, 2, 170, 2, 318, 2, 162, 2, 326, 2, 154, 2, 333, 2, 148,
2, 338, 2, 144, 2, 340, 2, 144, 2, 340, 2, 139, 2, 343, 2, 148, 2,
333, 2, 154, 2, 326, 2, 162, 2, 318, 2, 170, 2, 308, 2, 182, 2, 296,
2, 194, 2, 283, 2, 208, 2, 269, 2, 222, 2, 254, 2, 238, 2};
27: void unos_ma();
28: void unos_mf();
29: void odabir_parametara_za_izbor_vrijednosti_iz_SPWM_matrice();
30: void(* resetFunc) (void) = 0;
31: void setup() {
32:     pinMode(ledRed, OUTPUT);
33:     Serial.begin(115200);
34:     while(!Serial){;}
35:     delay(100);
36:     DDRB = B00000011;
37:     PORTB = B00000000;
38:     u8g2.begin();
39:     u8g2.clearBuffer();
40:     u8g2.setFont(u8g2_font_chikita_tf );
41:     u8g2.drawFrame(0, 0, 128, 64);
42:     u8g2.drawStr( 11, 10, "Implementacija bipolarne");
43:     u8g2.drawStr( 12, 20, "SPWM modulacije pomocu");
44:     u8g2.drawStr( 11, 30, "Arduino mikrokontrolera");
45:     u8g2.drawStr( 9, 40, "Za nastavak pritisnite (#)");
46:     u8g2.drawStr( 35, 50, "FERIT, 2024");
47:     u8g2.drawStr( 18, 60, "* Robert Bedekovic *");
48:     u8g2.sendBuffer();
49:     while(1){
50:         key = myKeypad.getKey();
51:         if (key=='#') {
52:             break;
53:         }
54:     }
55:     unos_ma();
56:     unos_mf();
57:     odabir_parametara_za_izbor_vrijednosti_iz_SPWM_matrice();
58:     for(int j=0; j<164; j++){
59:         SPWM_time[j]=pgm_read_word_near(SPWM+val*164+j);
60:     }
61:     digitalWrite(ledRed, HIGH);
62:     u8g2.clearBuffer();
63:     u8g2.setFont(u8g2_font_chikita_tf );
64:     u8g2.drawFrame(0, 0, 128, 64);
65:     u8g2.drawStr( 24, 10, "KOD SE IZVRSAVA");

```



```

66:     u8g2.drawStr( 15, 20, "Odabrani parametri su:");
67:     u8g2.drawStr( 21, 30, "ma = ");
68:     u8g2.drawStr( 43, 30, ma_x);
69:     u8g2.drawStr( 76, 30, "mf = ");
70:     u8g2.drawStr( 98, 30, mf_x);
71:     u8g2.drawFrame( 18, 23, 91, 9);
72:     u8g2.drawStr( 4, 40, "Za ponovni unos parametara");
73:     u8g2.drawStr( 19, 50, "pritisnite reset gumb");
74:     u8g2.drawStr( 35, 60, "FERIT, 2024");
75:     u8g2.sendBuffer();
76: }
77: void loop() {
78:     for(int i=0 ; i<len ; i++){
79:         PORTB = SPWM_pin[i];
80:         delayMicroseconds(SPWM_time[i]);
81:     }
82: }
83: void unos_ma(){
84:     u8g2.clearBuffer();
85:     u8g2.setFont(u8g2_font_chikita_tf );
86:     u8g2.drawFrame(0, 0, 128, 64);
87:     u8g2.drawStr( 10, 10, "Unesite dubinu modulacije");
88:     u8g2.drawStr( 16, 20, "ma pomocu tipkovnice");
89:     u8g2.drawStr( 17, 45, "tipka:      1      2      3      4      ");
90:     u8g2.drawStr( 17, 55, "ma:          1.0   0.8   0.6   0.4  ");
91:     u8g2.drawFrame(44, 37, 68, 21);
92:     u8g2.drawLine(44, 47, 111, 47);
93:     u8g2.drawLine(94, 38, 94, 56);
94:     u8g2.drawLine(77, 38, 77, 56);
95:     u8g2.drawLine(60, 38, 60, 56);
96:     u8g2.drawFrame(13, 34, 102, 27);
97:     u8g2.sendBuffer();
98:     while(1){
99:         key = myKeypad.getKey();
100:        switch (key) {
101:            case '1': ma = 1; break;
102:            case '2': ma = 0.8; break;
103:            case '3': ma = 0.6; break;
104:            case '4': ma = 0.4; break;
105:        }
106:        if(key >= '1' && key <= '4'){
107:            break;
108:        }
109:    }
110:    dtostrf(ma, 3, 1, ma_x);
111:    u8g2.clearBuffer();

```

```

112:     u8g2.setFont(u8g2_font_chikita_tf );
113:     u8g2.drawFrame(0, 0, 128, 64);
114:     u8g2.drawStr( 23, 10, "Odabrali ste dubinu");
115:     u8g2.drawStr( 24, 20, "modulacije ma:");
116:     u8g2.drawStr( 90, 20, ma_x);
117:     u8g2.drawStr( 9, 50, "Za nastavak pritisnite (#)");
118:     u8g2.drawStr( 17, 60, "Za reset pritisnite (*)");
119:     u8g2.drawFrame(87, 13, 18, 9);
120:     u8g2.sendBuffer();
121:     while(1){
122:         key = myKeypad.getKey();
123:         if (key=='#') {
124:             break;
125:         }
126:         if (key=='*') {
127:             resetFunc();
128:         }
129:     }
130: }
131: void unos_mf(){
132:     u8g2.clearBuffer();
133:     u8g2.setFont(u8g2_font_chikita_tf );
134:     u8g2.drawFrame(0, 0, 128, 64);
135:     u8g2.drawStr( 20, 10, "Unesite modulacijsku");
136:     u8g2.drawStr( 31, 20, "frekvenciju mf");
137:     u8g2.drawStr( 24, 30, "pomocu tipkovnice");
138:     u8g2.drawStr( 17, 45, "tipka:      1      2      3      4      ");
139:     u8g2.drawStr( 17, 55, "mf:          11      21      31      41  ");
140:     u8g2.drawFrame(44, 37, 68, 21);
141:     u8g2.drawLine(44, 47, 111, 47);
142:     u8g2.drawLine(94, 38, 94, 56);
143:     u8g2.drawLine(77, 38, 77, 56);
144:     u8g2.drawLine(60, 38, 60, 56);
145:     u8g2.drawFrame(13, 34, 102, 27);
146:     u8g2.sendBuffer();
147:     while(1){
148:         key = myKeypad.getKey();
149:         switch (key) {
150:             case '1': mf = 11; break;
151:             case '2': mf = 21; break;
152:             case '3': mf = 31; break;
153:             case '4': mf = 41; break;
154:         }
155:         if(key >= '1' && key <= '4'){
156:             break;
157:         }

```

```

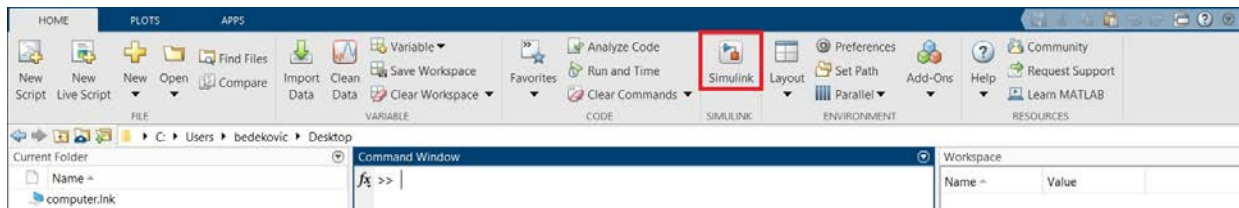
158:     }
159:     dtostrf(mf, 2, 0, mf_x);
160:     u8g2.clearBuffer();
161:     u8g2.setFont(u8g2_font_chikita_tf );
162:     u8g2.drawFrame(0, 0, 128, 64);
163:     u8g2.drawStr( 10, 10, "Odabrali ste modulacijsku");
164:     u8g2.drawStr( 21, 20, "frekvenciju mf:");
165:     u8g2.drawStr( 94, 20, mf_x);
166:     u8g2.drawStr( 6, 40, "Za pokretanje upravljackih");
167:     u8g2.drawStr( 21, 50, "impulsa pritisnite (#)");
168:     u8g2.drawStr( 18, 60, "Za reset pritisnite (*)");
169:     u8g2.drawFrame(91, 13, 14, 9);
170:     u8g2.sendBuffer();
171:     while(1){
172:         key = myKeypad.getKey();
173:         if (key=='#') {
174:             break;
175:         }
176:         if (key=='*') {
177:             resetFunc();
178:         }
179:     }
180: }
181: void odabir_parametara_za_izbor_vrijednosti_iz_SPWM_matrice(){
182:     if(ma==1 && mf==11){
183:         val=0;
184:         len=44;
185:     }
186:     if(ma==1 && mf==21){
187:         val=1;
188:         len=84;
189:     }
190:     if(ma==1 && mf==31){
191:         val=2;
192:         len=124;
193:     }
194:     if(ma==1 && mf==41){
195:         val=3;
196:         len=164;
197:     }
198:     if(ma==0.8 && mf==11){
199:         val=4;
200:         len=44;
201:     }
202:     if(ma==0.8 && mf==21){
203:         val=5;

```

```
204:     len=84;
205:     }
206:     if(ma==0.8 && mf==31){
207:         val=6;
208:         len=124;
209:     }
210:     if(ma==0.8 && mf==41){
211:         val=7;
212:         len=164;
213:     }
214:     if(ma==0.6 && mf==11){
215:         val=8;
216:         len=44;
217:     }
218:     if(ma==0.6 && mf==21){
219:         val=9;
220:         len=84;
221:     }
222:     if(ma==0.6 && mf==31){
223:         val=10;
224:         len=124;
225:     }
226:     if(ma==0.6 && mf==41){
227:         val=11;
228:         len=164;
229:     }
230:     if(ma==0.4 && mf==11){
231:         val=12;
232:         len=44;
233:     }
234:     if(ma==0.4 && mf==21){
235:         val=13;
236:         len=84;
237:     }
238:     if(ma==0.4 && mf==31){
239:         val=14;
240:         len=124;
241:     }
242:     if(ma==0.4 && mf==41){
243:         val=15;
244:         len=164;
245:     }
246: }
```

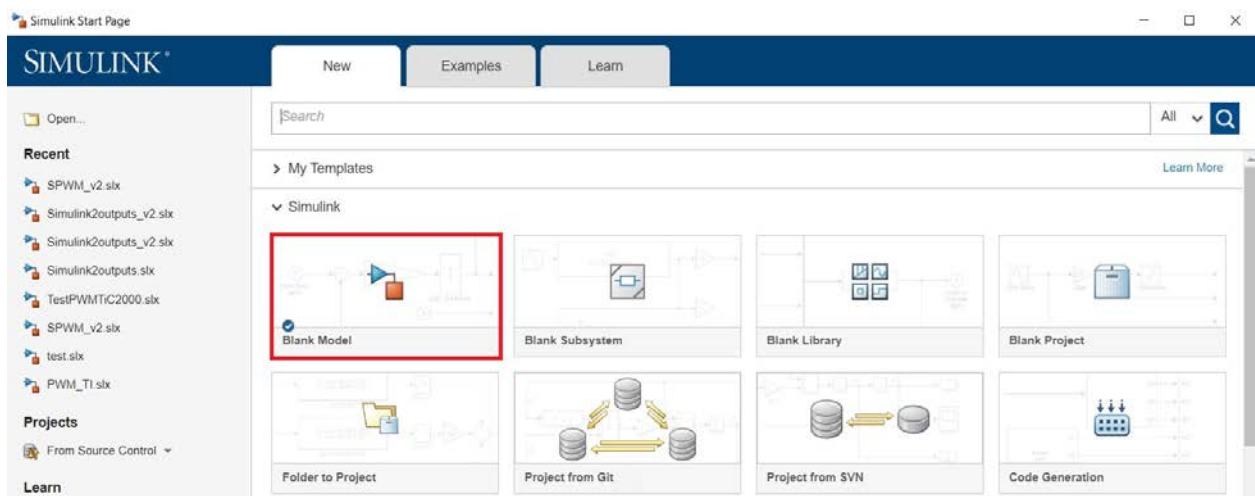
## Prilog 2: Postupak implementacije upravljačkog algoritma na TI F28379D

Upravljački algoritam se implementira na TMS320F28379D mikrokontroler pomoću MATLAB Simulinka. Nakon otvaranja MATLAB-a i instalacije potrebnih alata kao što su ugrađeni koder (eng. *Embedded Coder*) i C2000 paketi podrške (eng. *C2000 Support Package*), u početnoj kartici (eng. *Home*) dvostrukim klikom se otvara Simulink označen crvenim pravokutnikom na slici P2.1. ili upisom “Simulink” u komandni prozor.



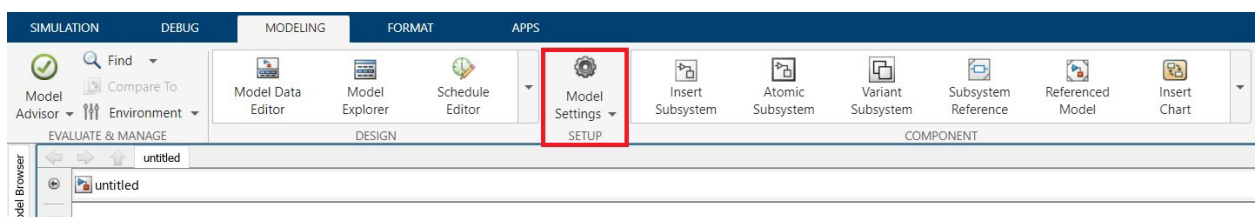
Slika P2.1. Otvaranje Simulink-a

Nakon toga dvostrukim klikom na ikonu prazan model (eng. *Blank Model*) u padajućem izborniku 'Simulink' označenom crvenim pravokutnikom otvara se novi prazan model.



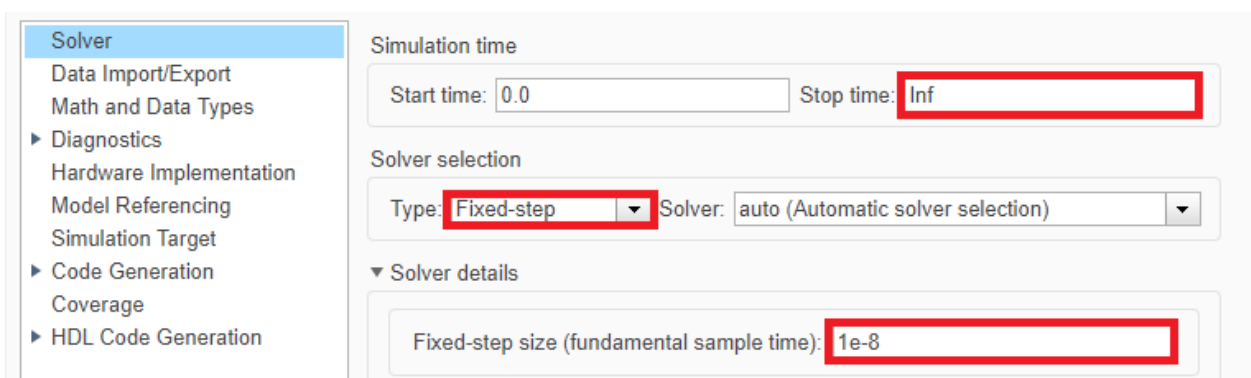
Slika P2.2. Otvaranje novog modela u simulinku

Dvostrukim klikom na postavke modela (eng. *Model Settings*) u kartici modeliranje (eng. *Modeling*) otvaraju se postavke modela.



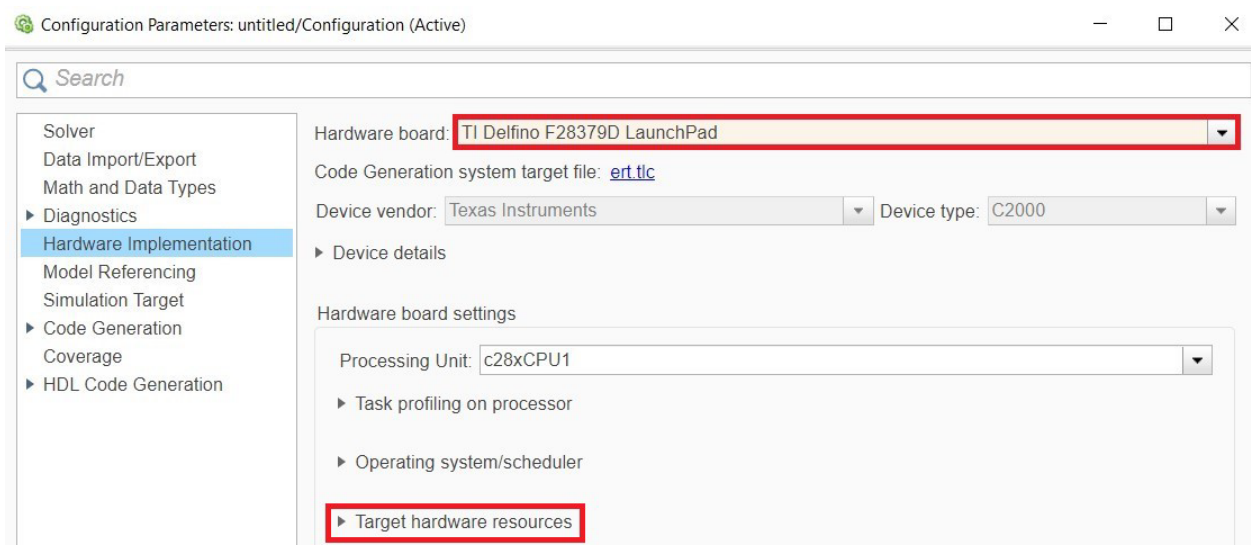
Slika P2.3. Otvaranje postavka modela

Nakon otvaranja novog prozora parametri konfiguracije (eng. *Configuration Parameters*) podešava se vrijeme zaustavljanja simulacije (eng. *Stop time*) sa '10.0' na 'inf' kako bi mikrokontroler davao SPWM impulse beskonačnog trajanja. Vrsta odabira rješavača (eng. *Solver selection type*) podešava se s 'promjenjivi korak' (eng. *Variable-step*) na 'fiksni korak' (eng. *Fixed-step*), dodatno klikom na padajući izbornik detalj rješavača (eng. *Solver details*) unutar kojega se podešava veličina fiksnog koraka odnosno osnovno vrijeme uzorkovanja (eng. *Fixed-step size (fundamental sample time)*) na '1e-8', odnosno jedan korak u simulaciji iznosi 0.00000001 s tj. ima 100000000 koraka u jednoj sekundi simulacije. Što je veći broj koraka to je simulacija preciznija, ali i zahtjevnija za obradu što se očituje većim vremenom potrebnim za završetak simulacije.



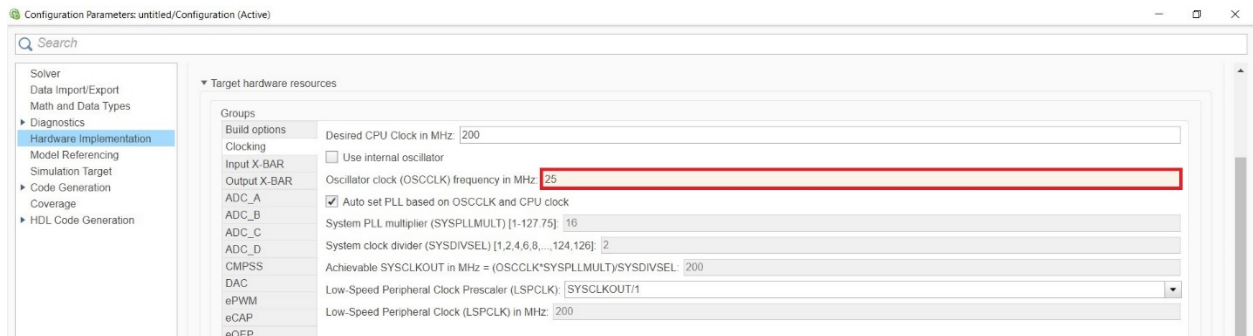
Slika P2.4. Namještanje postavki solvera

Sljedeći korak je otvaranje kartice hardverska implementacija (eng. *Hardware implementation*) u istom prozoru unutar koje se odabire koji se MCU odnosno mikrokontroler koristi, u ovom slučaju odabire se TI Delfino F28379D LaunchPad, nakon odabira MCU-a automatski se otvara padajući izbornik ciljni hardverski resursi (eng. *Target hardware resources*).



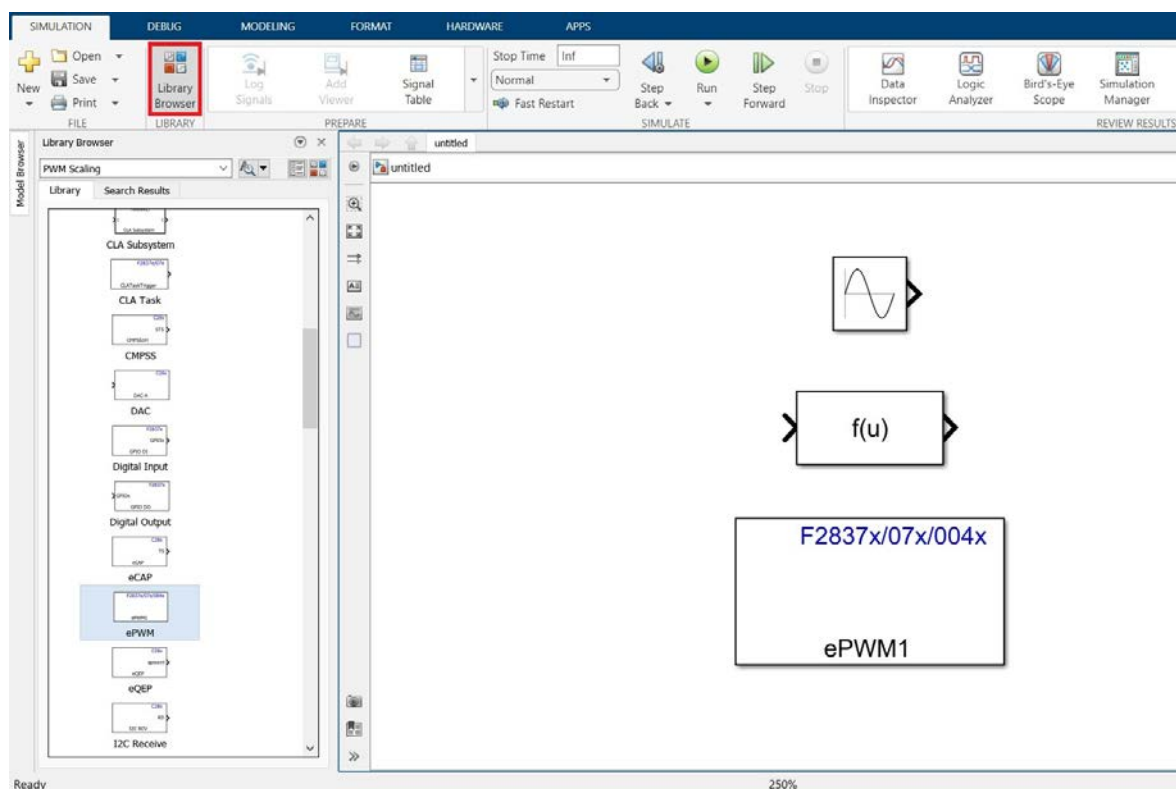
Slika P2.5. Namještanje postavki hardverske implementacije

Nakon toga, unutar padajućeg izbornika ciljni hardverski resursi (eng. *Target hardware resources*) pritiskom na grupu taktiranje (eng. *Clocking*) otvara se izbornik unutar kojeg se podešava takt oscilatora u MHz (eng. *Oscillator clock (OSCCLK)*) na '10' kako bi se dobila dobra izlazna frekvencija upravljačkih signala. Zatvara se prozor parametri konfiguracije.



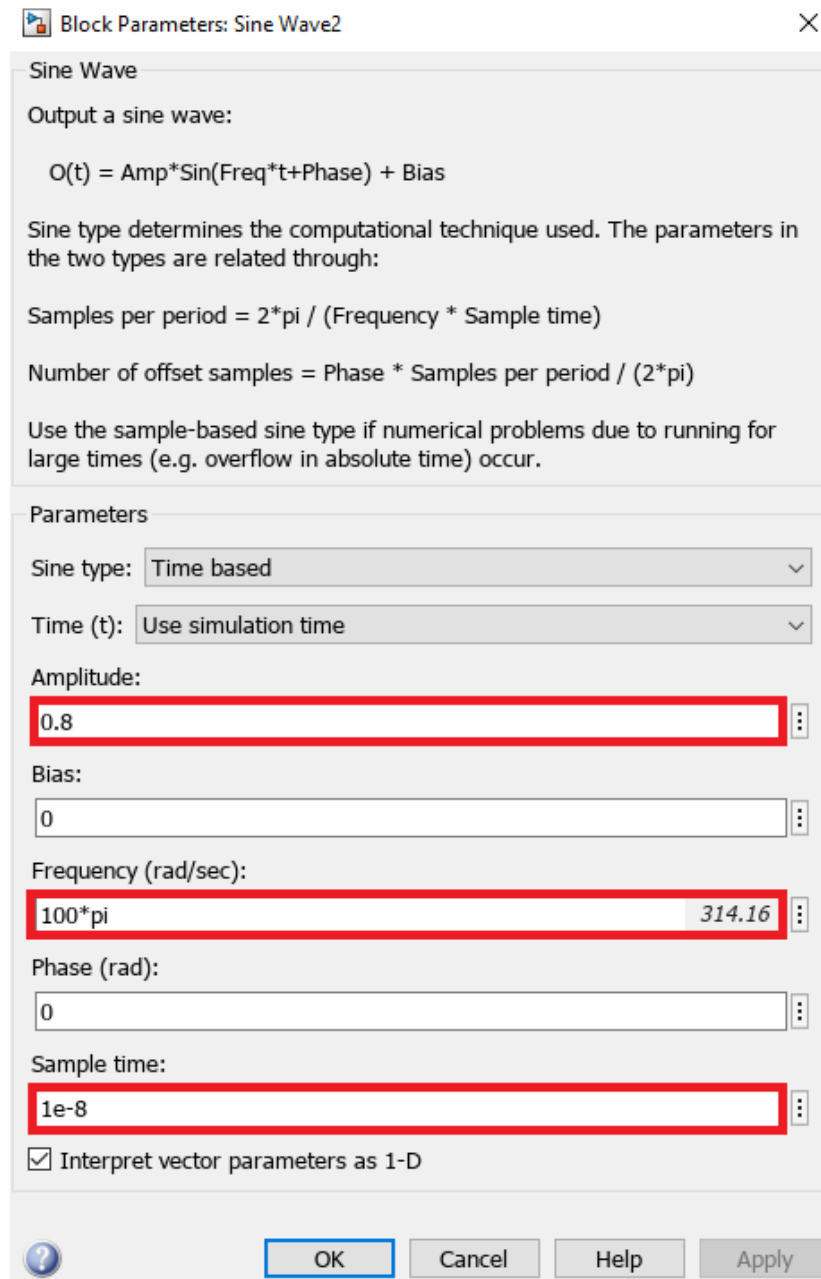
Slika P2.6. Namještanje postavki ciljanih hardverskih resursa

Klikom na preglednik biblioteke (eng. *Library Browser*) otvara se prozor unutar kojeg se nalaze svi blokovi u biblioteci. U model se unose blokovi, u ovom slučaju sinusni val (eng. *Sine Wave*), 'Fcn' i 'ePWM' koji se nalazi unutar skupine 'F2837xD' unutar skupine 'C2000 Blokset Mikrokontrolera'. Desnim klikom na dodaj blok modelu (eng. *add block to model*) se dodaje novi blok ili pritiskom lijevog klika na blok i povlačenjem na mjesto u modelu.



Slika P2.7. Unos blokova u model

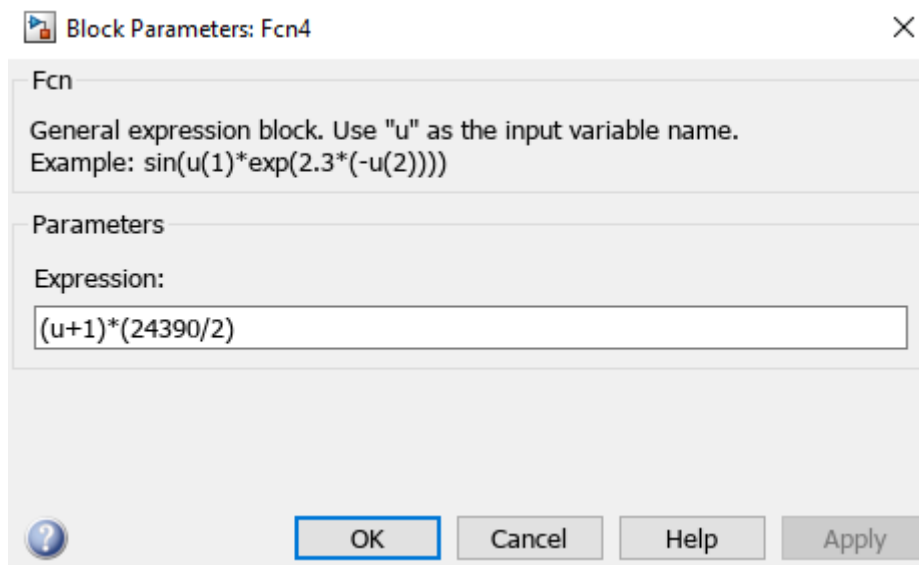
Dvostrukim klikom na blok sinusni val (eng. *Sine Wave*) otvara se prozor parametri bloka sinusnog vala (eng. *Block Parameters: Sine Wave*) u kojem se podešava amplituda na željeni iznos, u ovom slučaju '0.8', frekvencija na '100\*pi' odnosno 50 Hz i vrijeme uzorka (eng. *Sample time*) na '1e-8'. Promjena amplitude predstavlja dubinu modulacije  $m_a$ .



Slika P2.8. Namještanje postavki bloka “Sine Wave”

Dvostrukim klikom na blok ‘Fcn’ otvara se prozor parametri bloka Fcn (eng. *Block Parameters: Fcn*) u kojem se podešava izraz funkcije na  $(u+1)(24390/2)$ .  $u$  predstavlja ulaznu varijablu. Brojem ‘24390/2’ skalira se izlazna vrijednost sinusnog signala.





Slika P2.9. Podešenje postavki bloka "Fcn"

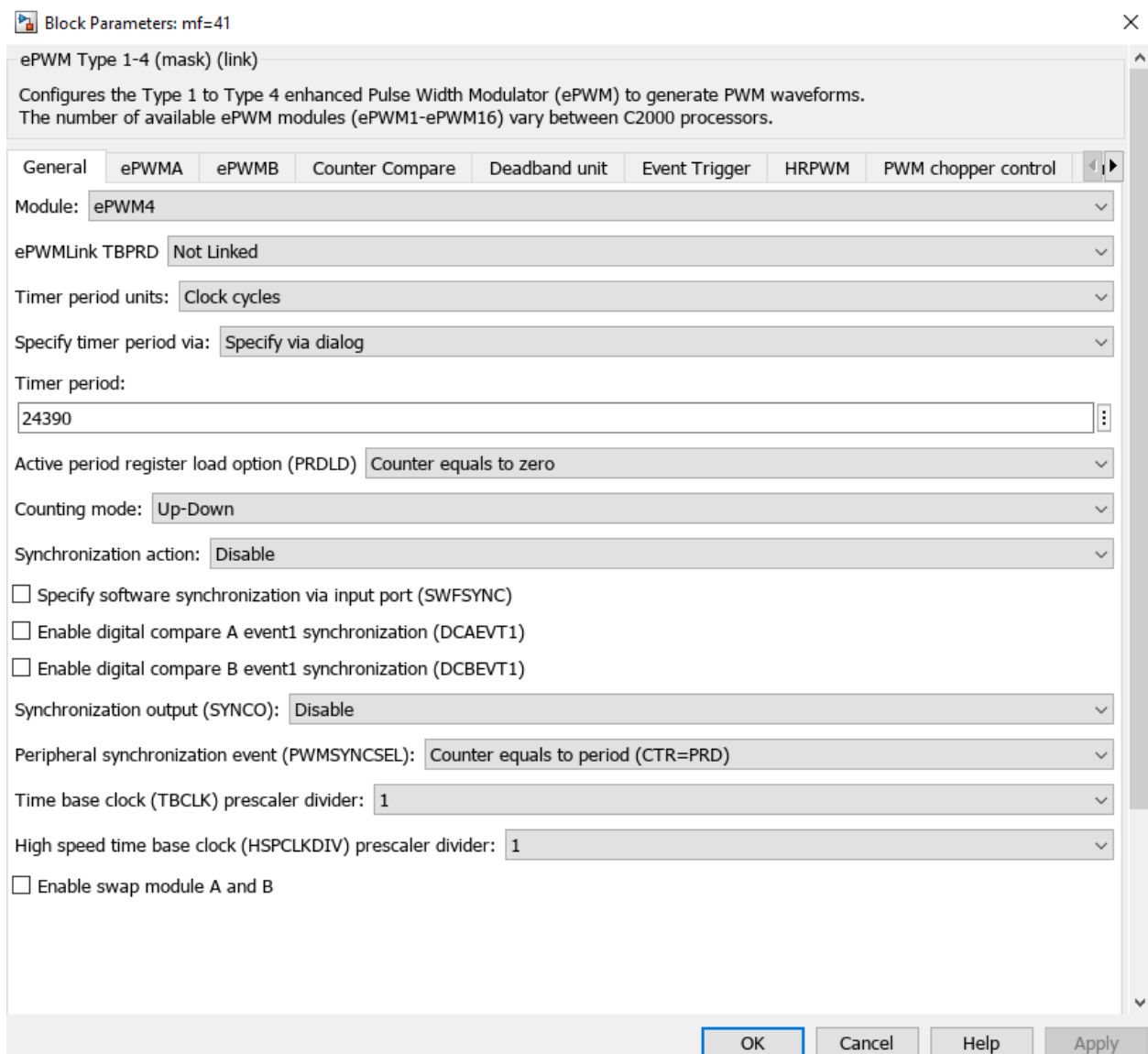
Idući korak je otvaranje bloka 'ePWM'. Otvara se prozor parametri bloka ePWM (eng. *Block Parameters: ePWM*) u kojem se u kartici generalno (eng. *General*) podešava period tajmera (eng. *Timer period*) s vrijednosti '64000' na '24390', dok ostale vrijednosti ostaju iste.

U kartici 'ePWMA' podešava se akcija kad brojač bude jednak nuli (eng. *action when counter=ZERO*) na učiniti ništa (eng. *Do nothing*), akcija kad brojač bude jednak periodu (eng. *action when counter=period (PRD)*) na učiniti ništa, akcija kad brojač bude jednak CMPA s brojanjem prema gore (eng. *action when counter=CMPA on up-count (CAU)*) na postavi (eng. *Clear*), akcija kad brojač bude jednak CMPA s brojanjem prema dolje (eng. *action when counter=CMPA on down-count (CAD)*) na očisti (eng. *Set*), akcija kad brojač bude jednak CMPB s brojanjem prema gore na učini ništa, akcija kad brojač bude jednak CMPB s brojanjem prema dolje na učini ništa, dok ostale postavke ostaju iste kao početne.

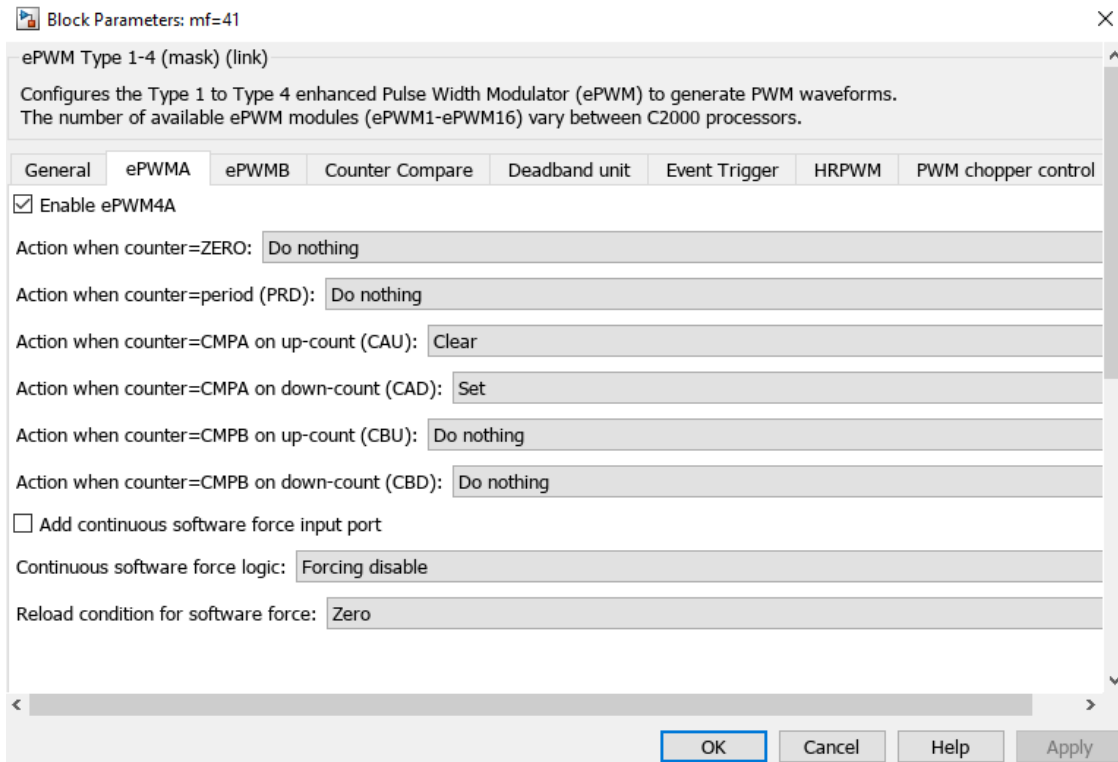
U kartici 'ePWMB' prvo se označi kvadratić s kvačicom omogući ePWM1B (eng. *Enable ePWM1B*), nakon toga se podešava akcija kad brojač bude jednak nuli na učiniti ništa, akcija kad brojač bude jednak periodu na učiniti ništa, akcija kad brojač bude jednak CMPA s brojanjem prema gore na očisti, akcija kad brojač bude jednak CMPA s brojanjem prema dolje na postavi, akcija kad brojač bude jednak CMPB s brojanjem prema gore na učiniti ništa, akcija kad brojač bude jednak CMPB s brojanjem prema dolje na učiniti ništa dok ostale postavke ostaju iste.

U kartici usporedba brojača (eng. *Counter Compare*) podešava se specificiraj CMPA i CMPB preko (eng. *Specify CMPA i CMPB via*) na Navedite putem ulaznog priključka (eng. *Specify via Input port*) te CMPA i CMPB vrijednosti na vrijednost '0'.

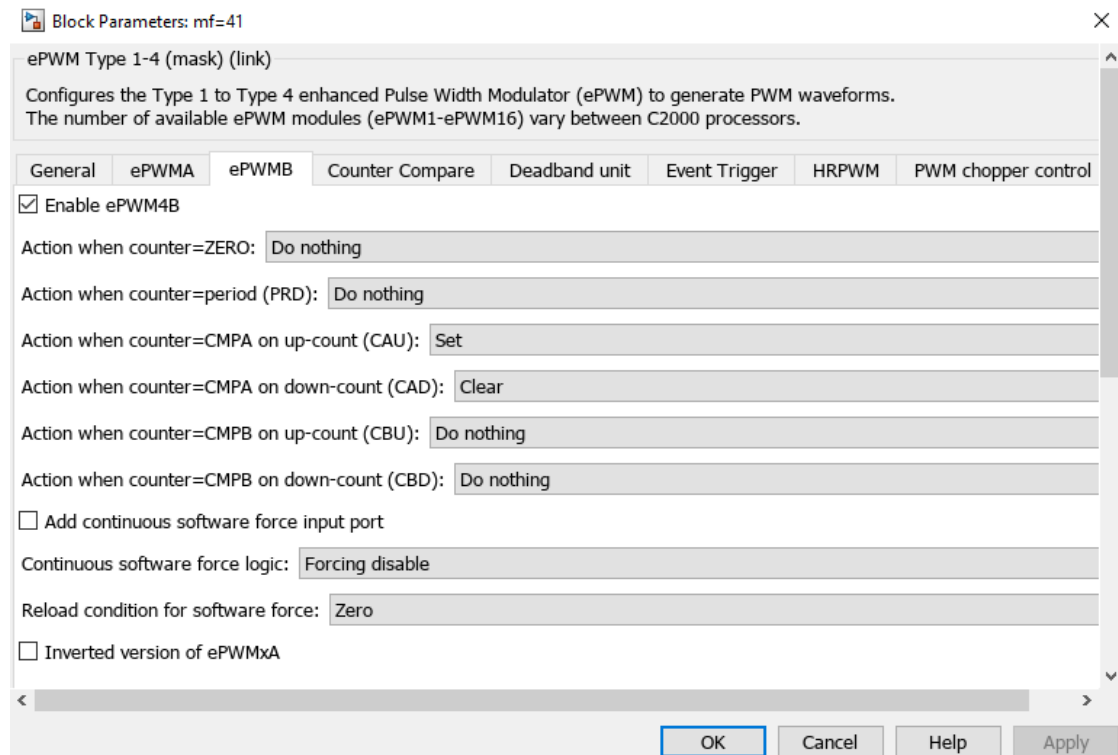
U kartici mrtvog vremena (eng. *Deadband unit*) prvo se označi kvadrat s kvačicom koristi mrtvo vrijeme za ePWM1A i ePWM1B (eng. *Use deadband for ePWM1A i ePWM1B*) kako bi imali mrtvo vrijeme između sklapanja čime se osigurava da ne vode oba ventila jedne grane u isto vrijeme odnosno kratki spoj izvora. Nakon toga se podešava period rastućeg ruba mrtvog vremena (eng. *Deadband rising edge (RED) period*) i period padajućeg ruba mrtvog vremena na '400'. Ukoliko želimo povećati mrtvo vrijeme, odnosno vrijeme kada su impulsi na ePWM1A i ePWM1B '0' u isto vrijeme povećamo vrijednost period rastućeg i padajućeg ruba mrtvog vremena i suprotno. Pritiskom na gumb 'OK' sprema se i zatvara prozor.



Slika P2.10. Namještanje generalnih postavki bloka "ePWM"



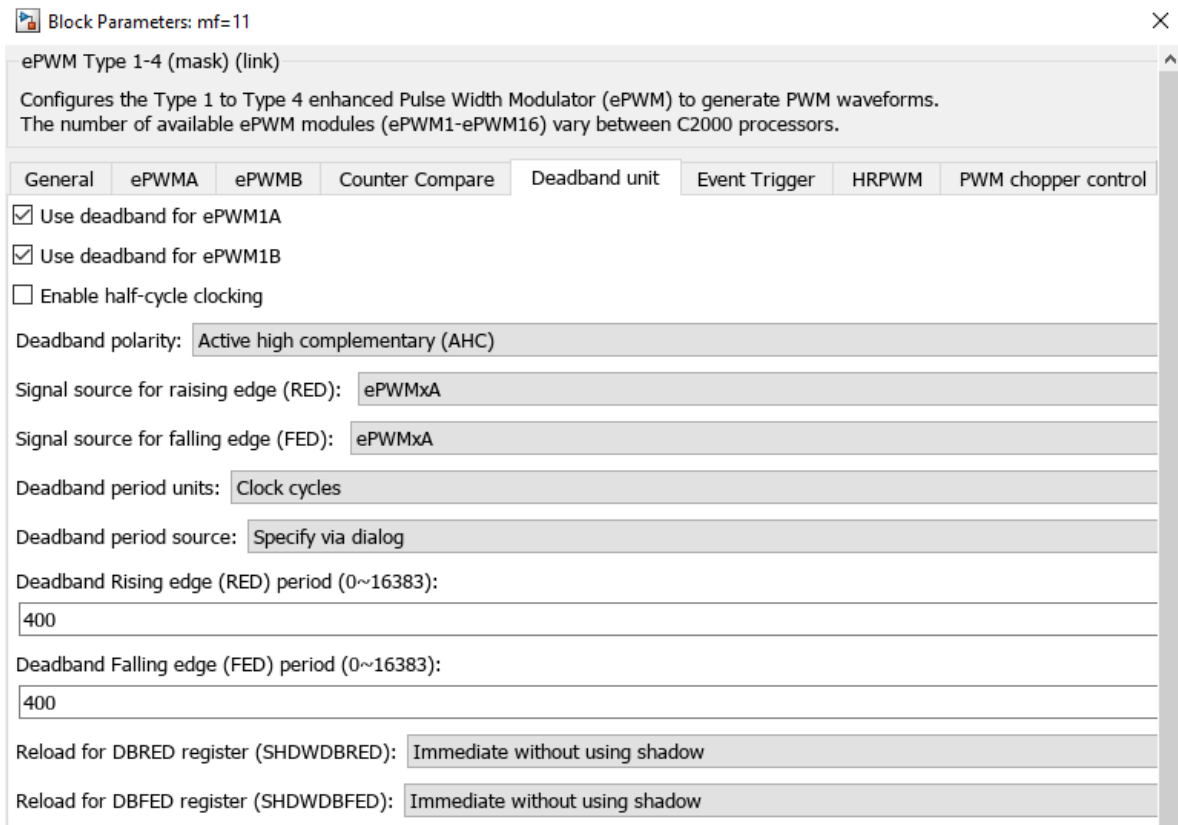
Slika P2.11. Namještanje “ePWMA” postavki bloka “ePWM”



Slika P2.12. Namještanje “ePWMB” postavki bloka “ePWM”

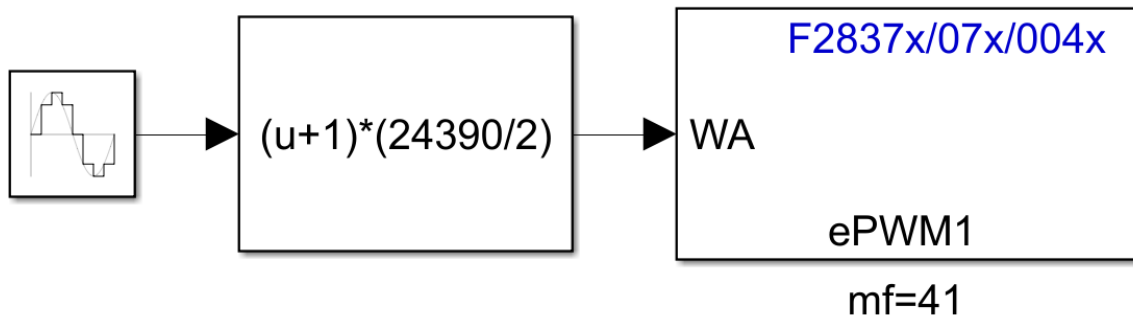


Slika P2.13. Namještanje “Counter Compare” postavki bloka “ePWM”



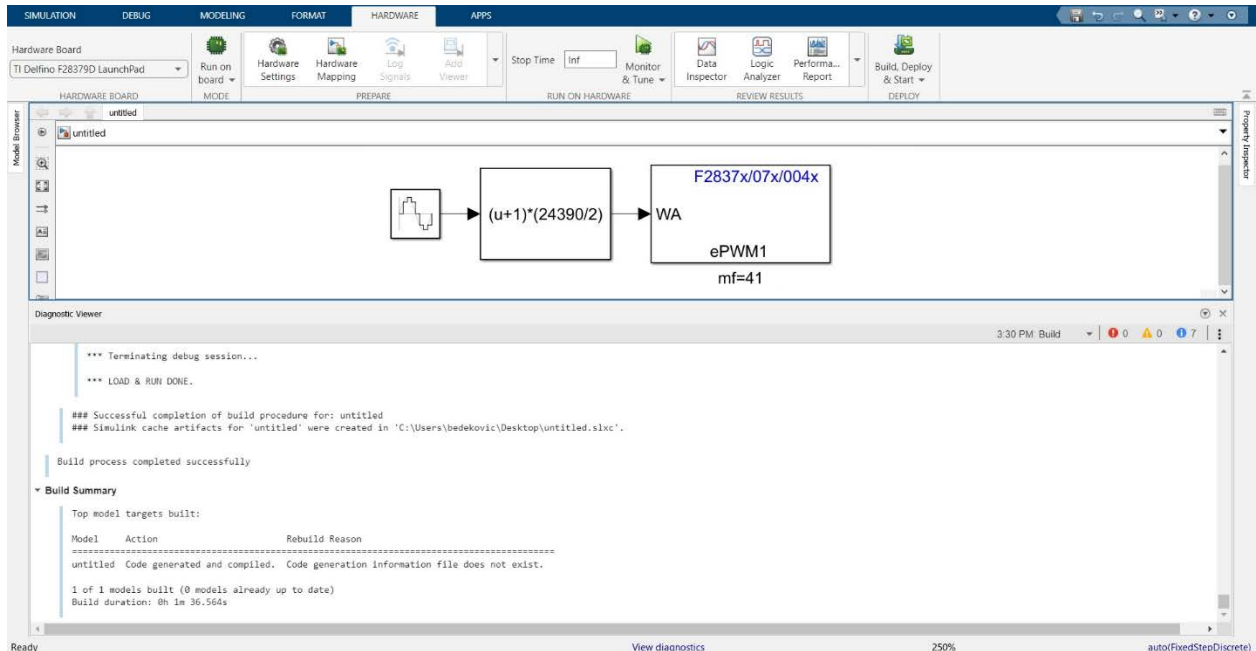
Slika P2.14. Namještanje “Deadband unit” postavki bloka “ePWM”

Sljedeći korak je povezivanje blokova kao na slici P2.15.



Slika P2.15. Povezani blokovi u modelu

Pritiskom na gumb izgradite, implementirajte i pokrenite (eng. *Build, Deploy & Start*) pokreće se izrada, pokretanje i implementacija kôda na TMS320F28379D. Vrijeme izrade, pokretanja i implementacije kôda je oko dvije minute u ovom slučaju, dok vrijeme ovisi o snazi korištenog računala.



Slika P2.16. Pokretanje, izrada i implementacija na MCU

Kreirani su SPWM impulsi modulacijske frekvencije  $m_f = 41$  i dubine modulacije  $m_a = 0,8$ . Ukoliko se želi promijeniti dubina modulacije, amplituda sinusnog signala koji predstavlja dubinu modulacije se podešava na željeni iznos kao na slici P2.8. Ukoliko se želi promijeniti modulacijska frekvencija, u bloku 'ePWM' u kartici generalno se podesi period tajmera s '24390' kojim se dobije  $m_f=41$  na željeni  $m_f$  kao na slici P2.10. Dodatno unutar blok 'Fcn' otvara se prozor parametri bloka Fcn u kojem izraz funkcije koji glasi  $(u+1)(24390/2)$  te se mijenja broj '24390' na vrijednost unutar perioda tajmera. U tablici P2.1. prikazane su vrijednosti “timer perioda” za dobivanje modulacijske frekvencije iznosa '11', '21', '31', '41', no može se dobiti bilo koja vrijednost modulacijske frekvencije koja se računa prema izrazu (P2-1).

$$TP = \frac{100 \cdot 10^6}{2 \cdot f_s} \quad (P2-1)$$

Gdje je:

$$f_s = m_f \cdot f_0 = m_f \cdot 50 \quad (P2-2)$$

Gdje je:

- $m_f$  – modulacijska frekvencija
- $f_s$  – sklopna frekvencija
- $TP$  – timer period
- $TP_z$  – timer period zaokružen na najbliži cijeli broj

Tablica P2.1. Ovisnost perioda timera o dubini modulacije

| $m_f$ | $f_s$ | TP       | TP <sub>z</sub> |
|-------|-------|----------|-----------------|
| 11    | 550   | 90909.09 | 90910           |
| 21    | 1050  | 47619.05 | 47619           |
| 31    | 1550  | 32258.06 | 32258           |
| 41    | 2050  | 24390.24 | 24390           |

Timer period ne može biti decimalan broj te mora biti broj između '0' i '65535'. S periodom tajmera namještenim na 65535 dobije se  $f_s = 762.95$  odnosno  $m_f = 15.259$ . Ukoliko se želi dobiti modulacijska frekvencija manja od 15.259 proračuna se  $TP$  prema formuli (P2-1) te se iznos podjeli s 2, taj broj predstavlja modulacijsku frekvenciju koja se koristi unutar blokova “f<sub>cn</sub>” i “ePWM”. Dodatno se mora promijeniti djelitelj vremenske base (eng. *time base clock (TBCLK) prescaler divider*) na vrijednost 2 kao na slici P2.10., u suprotnom ostaje vrijednost 1.