



METODE IMPULSNO ŠIRINSKE MODULACIJE KROZ IMPLEMENTACIJU NA DSP TMS320F2812

Marko Rosić¹, Miroslav Bjekić², Miloš Božić³

Rezime: U ovom radu izložen je poseban didaktički pristup u savlađivanju metoda impulsno širinske modulacije kroz implementaciju na digitalni procesor TMS320F2812. Prikazane su mogućnosti grafičkog podešavanja parametara asimetrične, simetrične i impulsno širinske modulacije prostornog vektora, merenje i vizuelizacija karakterističnih veličina. Posebno je naglašen edukativni karakter i mogućnosti izvođenja različitih laboratorijskih vežbi.

Ključne reči: Impulsno širinska modulacija, edukacija, DSP

PULSE WIDTH MODULATION METHODS THROUGH IMPLEMENTATION ON DSP TMS320F2812

Summary: This paper presents special didactic approach to understanding pulse width modulation methods through the implementation on digital processor TMS320F2812. Here are presented possibilities of graphical parameter settings of asymmetric, symmetric and space vector pulse width modulation, measurement and visualization of characteristic values. Educational aspect is particularly emphasized and various possibilities of laboratory exercises.

Key words: Pulse width modulation, education, DSP

1. UVOD

U elektromotornim pogonima gotovo svi savremeni vidovi kontrole mašina naizmjenične struje sa dobrim dinamičkim performansama zahtevaju upotrebu invertora kao sklopa koji treba da obezbedi brz i precizan odziv na zadate reference potrebnog napona odnosno struje. Impulsno širinska Modulacija - IŠM (PWM - Pulse Width Modulation) je najčešći metod koji se koristi u elektromotornim pogonima za predstavljanje referentnih analognih signala digitalnom aproksimacijom. Na ovaj način definiše se sekvenca impulsa promenljive širine i konstantne amplitude (napon jednosmernog kola - U_{DC}) koji sadrže približno istu količinu energije kao i originalni referentni analogni signal. Ovako generisan

¹ Marko Rosić, Tehnički fakultet, Svetog Save 65, Čačak, E-mail: rosic@tfc.kg.ac.rs

² Dr Miroslav Bjekić, Tehnički fakultet, Svetog Save 65, Čačak, E-mail: mbjekic@tfc.kg.ac.rs

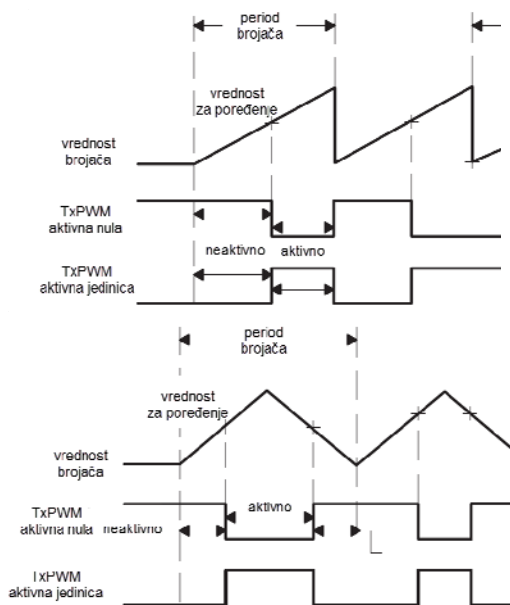
³ Miloš Božić, Tehnički fakultet, Svetog Save 65, Čačak, E-mail: mbozic@tfc.kg.ac.rs

signal dovodi se motoru a efekti na brzinu su gotovo isti kao i kod primene sinusoidalnih napona zbog mehaničke inercije rotora motora koja se ponaša kao niskopropusni filter.

Različiti vidovi IŠM: asimetrična, simetrična i impulsno širinska modulacija prostornim vektorom, omogućavaju različite karakteristike generisanog signala, a njihovo razumevanje predstavlja osnovu daljeg rada sa algoritmima kontrole naizmeničnih mašina. Veliki broj simulacija i apleta [1, 2] omogućava sagledavanje i razumevanje metoda impulsno širinske modulacije. Ipak, najefektniji didaktički pristup je moguć direktnom implementacijom ovog metoda na DSP platformi. Taj način omogućava merenje veličina i kompletno sagledavanje načina implementacije na praktičnim *real-time* sistemima baziranim na DSP. U ovom radu biće prikazan jedan takav edukativni pristup generisanja asimetrične, simetrične IŠM i IŠM prostornim vektorom sa vizuelizacijom karakterističnih izlaznih veličina na DSP platformi MSK2812 sa procesorom TMS320F2812. Ovaj način treba da omogući lakše razumevanje metoda impulsno širinske modulacije.

2. ASIMETRIČNA, SIMETRIČNA I IŠM PROST. VEKTORA – TEORIJSKE OSNOVE

Napon jednosmernog međukola invertora U_{DC} moguće je transformisati u povorku pravougaonih impulsa čija je amplituda jednaka naponu U_{DC} a širina takva tako da ukupna energija dobijenog signala odgovara energiji referentnog željenog napona, koji se obično naziva i modulišući. Kada se ovaj postupak primeni na tri grane invertora sa faznim pomerajem od $2\pi/3$ dobija se odgovarajući trofazni sistem naizmeničnih napona.



Slika 1: Princip asimetrične (levo) i simetrične (desno) IŠM

Frekvencija modulišućeg signala je mnogo manja od frekvencije nosećeg testerastog signala čije su frekvencije reda nekoliko kHz (obično od 5-25kHz). U trenucima preseka nosećeg sa modulišućim signalom generišu se impulsi čija širina odgovara vrednosti modulišućeg referentnog signala i koji se vode na prekidačke elemente invertora. Na taj

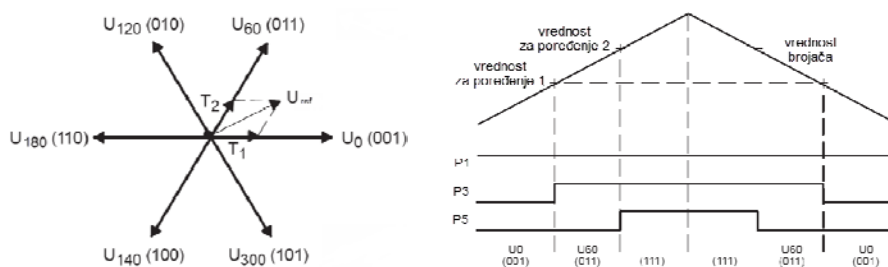
način dobijeni IŠM impulsi se pojačavaju na napon U_{DC} i dobija se potrebni izlazni napon kojim se napaja motor. U zavisnosti da li je noseći signal testerasti ili trouglasti razlikuju se asimetrična i simetrična IŠM koje će u ovom radu biti skraćeno obeležene sa AIŠM i SIŠM (Sl. 1.)

U digitalnim kontrolerima noseći signal se zadaje kao vrednost brojača čija se vrednost uvećava sa taktom procesora ili njegovim multiplom [3]. Ukoliko se brojači definišu kao jednosmerni (*up mode*) ili dvosmerni (*up/down mode*) razlikuju se asimetrična odnosno simetrična IŠM kao na Sl. 1. Odgovarajući registri brojača definišu njegove karakteristike i period a vrednosti modulišućeg signala upisuju se u registre za poređenje. U trenucima kada se izjednače vrednosti modulišućeg i nosećeg signala jedinica za IŠM generiše stanja aktivnih nula ili jedinica koja su određena podešavanjem registara za poređenje. Na taj način formira se kolona impulsa sa iste periode čija širina zavisi od vrednosti modulišućeg signala kao na Sl. 1 (desno).

Impulsno širinska modulacija prostornog vektora (IŠMPV) (Space Vector Pulse Width Modulation – SVPWM) bazira se na principu generisanja referentnog naponskog vektora kombinacijom dva susedna nenulta i jednog nultog vektora. Naime, poznati referentni naponski vektor U_{ref} , kao na Sl. 2., koji se nalazi u prvom sektoru ograničenog naponskim vektorima U_0 i U_{60} , može se generisati primenom vektora (001) u toku vremena T_1 , vektora (011) u toku vremena T_2 i nultog vektora (111 ili 000) u toku vremena T_0 tako da važi da je $T_{IŠM\ period} = T_1 + T_2 + T_0$.

Potrebna vremena T_1 , T_2 i T_0 zavise od amplitude referentnog naponskog vektora i njegovog položaja tj. ugla između susednih vektora i određena su jednačinama datim u literaturi [4].

IŠM prostornog vektora pokazala se do sada kao najefikasnija IŠM metoda upravljanja i regulacije pogona naizmenične struje. Korišćenjem ove metode povećan je maksimalni izlazni napon, smanjen broj komutacija po periodu (a time i prekidački gubici) kao i prisustvo subharmonika.

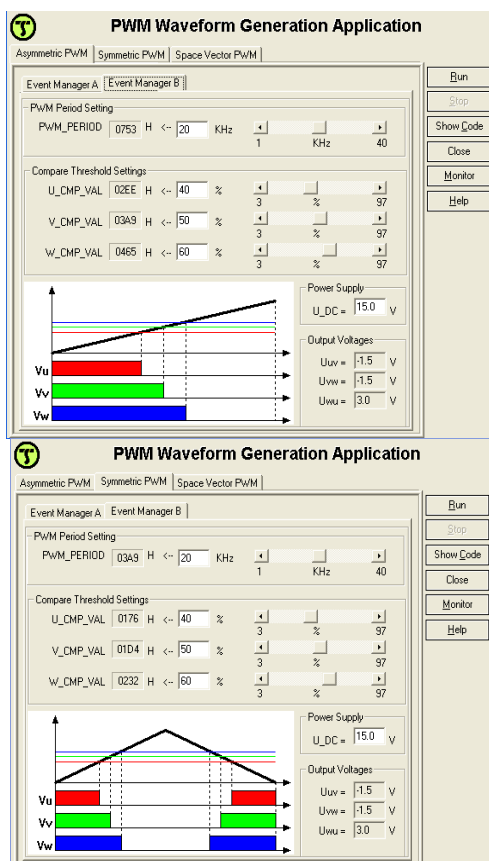


Slika 2: Princip IŠM prostornog vektora

3. PWM WAVEFORM GENERATION APPLICATION

Tehnosoftova aplikacija TMS320FL2812 Procesor Evaluation Control Panel predstavlja deo programskog paketa MCK2812 Professional namenjenog digitalnoj kontroli motora. Ova aplikacija ima za cilj da upozna korisnika sa arhitekturom procesora i omogući mu analizu i savladavanje principa rada karakterističnih procesa kroz vizuelizaciju i menjanje koda.

Deo PWM Waveform generation application omogućava analizu i postupak generisanja asimetrične, simetrične impulsno širinske modulacije kao i impulsno širinske modulacije prostornim vektorom. Izgledi panela za modifikovanje parametara IŠM za asimetričnu i simetričnu IŠM dati su na Sl. 3.



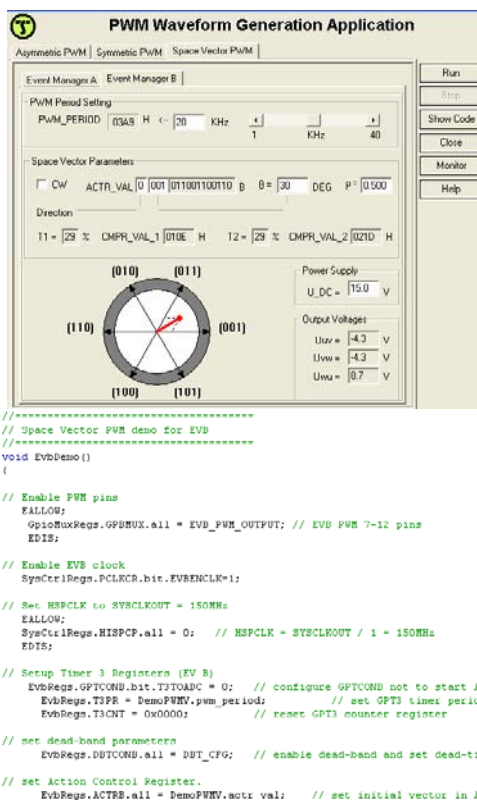
Slika 3: Paneli za definisanje parametara AIŠM i SIŠM

Za generisanje asimetrične ili simetrične IŠM potrebno je prvo podesiti IŠM period (PWM_PERIOD), odnosno vreme koje definiše frekvenciju IŠM. To vreme dobija se upisivanjem odgovarajuće heksadecimalne vrednosti u registar brojača koje označava njegovo maksimalnu vrednost, nakon čega se brojač resetuje i počinje od nule - "Up mode" (asimetrična IŠM) ili broji u natrag do nule - "Up/Down mode" (simetrična IŠM). Vreme PWM_PERIOD povezano je sa klizačem koji direktno preračunava ovo vreme u željenu frekvenciju IŠM. Na taj način korisnik ne mora da direktno vodi računa o vrednosti koja se upisuje u registar brojača i frekvenciji takta procesora za određivanje frekvencije IŠM, već se klizačem može jednostavno definisati potrebna frekvencija. Frekvencija u ovoj aplikaciji se kreće od 1 do 40kHz a mogu se postaviti i veće i manje vrednosti direktnim menjanjem koda i upisivanjem potrebne vrednosti u odgovarajući registar brojača. U polja *Compare Threshold settings* potrebno je definisati vrednosti za poređenje, tj. vrednosti koje određuju vrednost potrebnog napona u sve tri faze. Takođe, definisanje ovih vrednosti omogućeno je klizačima odakle se procentualna ispunjenost IŠM impulsa prevodi u heksadecimalni broj

koji je potrebno upisati u registre brojača za poređenje. Kada se vrednost brojača u toku brojanja izjednači sa vrednostima u registrima za poređenje događa se setovanje logičke jedinice ili logičke nule, odnosno pojave impulsa koji dalje služe za upravljanje prekidačkim elementima invertora čime se definiše veličina izlaznog napona.

Za tako podešene vrednosti aplikacija automatski preračunava napon između faza na izlazu (polje *Output Voltage*) za podešeni napon jednosmernog međukola (U_{DC}).

Kada se radi o IŠM sa prostornim vektorom (IŠMPV) za razliku od AIŠM i SIŠM potrebno je podesiti dve vrednosti za poređenje koje definišu napon u d i q stacionarnoj osi (obično se d-osa postavlja u pravcu vektora (001) a q osa je upravna na nju). Na Sl. 4 (levo) prikazan je panel za podešavanje potrebnih veličina za ispravan rad IŠMPV-a kao i grafička predstava željenog naponskog vektora sa rasporedom sektora i stanjima prekidača. Na osnovu ovih vrednosti DSP proračunava potrebna vremena uključivanja prekidača u sve tri grane invertora.



Slika 4: Panel za definisanje parametara IŠMPV (levo) i odgovarajući C kod (desno)

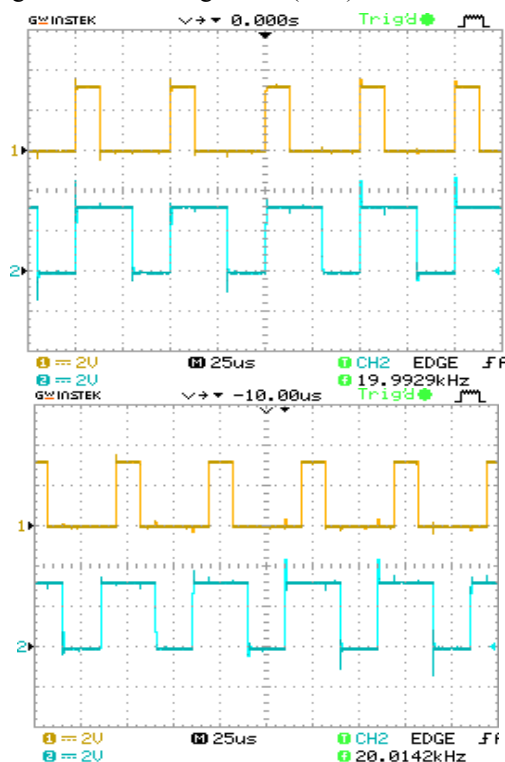
U polju *Space vector Parameters* definišu se smer obrtanja vektora, njegov početni ugao i amplituda. Ove vrednosti određene su vrednostima koje se upisuju u registre “*Action Control Register – ACTRA*” i „*Compare Control Register– COMCONA*“ koji definišu aktiviranje IŠMPV, omogućavaju poređenje, uslove osvežavanja vrednosti, rezultate poređenja itd. Ono što omogućuje ova aplikacija a što umnogome olakšava rad sa generisanjem prostornog vektora jeste mogućnost definisanja vektora mišem povlačeći vrh vektora u proizvoljnom pravcu menjajući mu amplitudu i fazni stav. Na taj način lako je

omogućeno praćenje definicija registara u zavisnosti od položaja prostornog vektora, što veoma olakšava kasnije projektovanje IŠMPV-a u druge svrhe. Takođe, vrednosti vremena T_1 i T_2 , prevedena u procenete, definišu ispunjenost IŠM perioda sa dva naponska vektora koja definišu sektor u kome se nalazi željeni naponski vektor. Time je omogućeno praćenje potrebnih vrednosti vremena T_1 , T_2 i T_0 koje se upisuju u registre za poređenje. Na isti način kao i kod AIŠM i SIŠM omogućeno je praćenje vrednosti dobijenih linijskih napona u zavisnosti od raspoloživog napona jednosmernog kola.

Sve tri prikazane aplikacije imaju mogućnost pregleda kompletnog koda pisanog u C jeziku (Sl. 4 – desno), njegovu analizu i izmenu koja omogućava definisanje parametara simulacije van opsega koji je definisan korisničkim panelom. To daje mogućnosti za razvoj novih aplikacija i omogućava razumevanje principa funkcionisanja DSP-a kroz direktno menjanje delova koda.

4. SNIMLJENI ODZIVI IŠM

Kada se podese potrebni parametri IŠM za asimetrični i simetrični režim i startuje se aplikacija dobijaju se sledeće vrednosti snimljene osciloskopom sa izlaza za gornje prekidače prve i druge grane invertorskog mosta (Sl. 5).

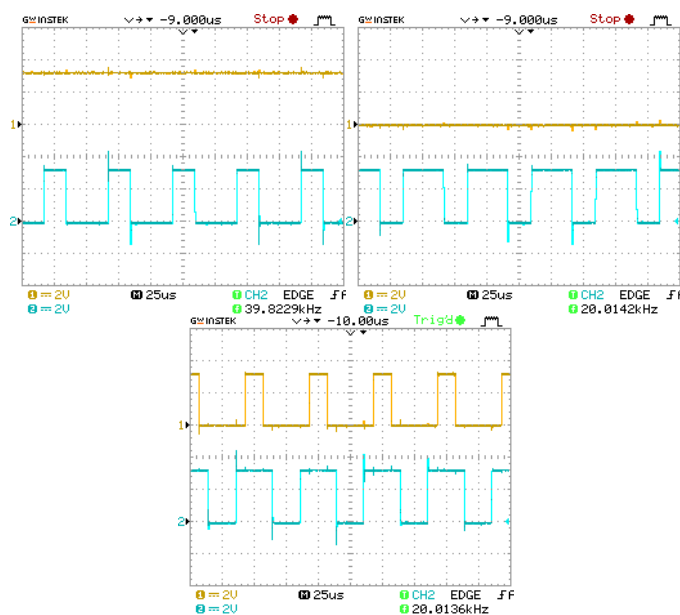


Slika 5: Snimljeni impulsi asimetrične i simetrične IŠM

Na Sl. 5 (levo) data je asimetrična IŠM sa referentnim vrednostima od 25% za prvu i 60% i drugu fazu dok je na slici desno prikazana simetrična IŠM sa istim referentnim vrednostima željenog napona. Jasno se uočava da u slučaju asimetrične IŠM ova impulsa počinju u istom trenutku a traju 25% i 60% od ukupnog vremena IŠM perioda, dok su u slučaju simetrične IŠM

impulsi istog trajanja smetrični u odnosu na njihovu sredinu, odnosno na trenutak kada je vrednosti brojača koja određuje IŠM period maksimalna. IŠM period za obe modulacije kao što se vidi sa slike je $50\mu\text{s}$ što odgovara podešenoj frekvenciji IŠM od 20kHz (Sl. 3). U toku izvršavanja samog koda moguće je menjanje stanja klizača za poređenje što omogućava intuitivniji uvid u impulsno širinsku modulaciju.

Na Sl. 6 dati su IŠM signali za gornje prekidače prve dve grane invertora kada je u pitanju modulacija prostornim vektorom.



Slika 6: Snimljeni impulsi IŠMPV za tri različita položaja prostornog vektora

Na Sl. 6 (levo) se primećuje da nekim zadatim naponskim vektorima odgovara aktivno stanje prve faze u celom IŠM periodu. Takvo stanje je logično i odgovara Sl. 2 (desno) jer je u sva tri vremena T_1 , T_2 i T_0 potrebno potrebno imati naponske vektore u kojima je uključen gornji prekidač prve grane ($T_1(001)$, $T_2(011)$, $T_0(111)$). Analogno važi i za druge grane invertora u zavisnosti od sektora u kome se željeni naponski vektor nalazi. Takođe, postoje i sektori u kome prekidač u prvoj grani nije aktivan u toku celog IŠM perioda (srednja slika) ($T_1(100)$, $T_2(010)$, $T_0(000)$). Na slici (desno) prikazani su IŠM impulsi u prve dve grane koji odgovaraju naponskom vektoru sa amplitudom $0.5 \cdot U_{DC}$ koji se nalazi u sektoru 3 (između vektora (010) i (110)), pod uglom od 150° , mereći od početnog vektora (001), odnosno d-ose.

Na ovaj način studenti mogu uočiti jasnu razliku između navedenih metoda IŠM i analizirati njihove karakteristike i harmonijski sastav u konačnom izlaznom naponu koji se dovodi motoru.

5. EDUKATIVNI ASPEKTI

Ovakav način edukacije studenata o metodama impulsno širinske modulacije ima više prednosti. Za razliku od klasičnih predavanja na tabli i računarskih apleta i simulacija ovaj način omogućava savladavanje metoda impulsno širinske modulacije kroz praktičnu realizaciju na DSP platformi i merenje trenutnih vrednosti analiziranih veličina. Takođe uz menjanje parametara za vreme izvršavanja samog koda na procesoru mogu se vizuelno pratiti ispunjenosti IŠM impulsa u aplikaciji i na osciloskopu, kao i definicije karakterističnih registara procesora. Ovaj način omogućava osmišljavanje seta laboratorijskih vežbi namenjenih studentima koji

prate kurs regulacije elektromotornih pogona. Ovde će biti navedeni neki primeri mogućih laboratoriskih vežbi:

- Teorijske osnove i upoznavanje sa aplikacijom za generisanje AIŠM, SIŠM i IŠMPV
- Upoznavanje sa arhitekturom procesora TMS320F2812 i kartice MSK2812
- Analiza strukture potrebnih registara koji definišu karakteristike IŠM
- Startovanje aplikacije i praćenje karakterističnih veličina osciloskopom uz menjanje parametara
- Izmene i adaptacija koda za generisanje sinusnih referenci za AIŠM, SIŠM i IŠMPV
- Poređenje AIŠM, SIŠM i IŠMPV i njihovih harmoničnih sastava Furijeovom analizom
- Analiza uticaja mrtvog vremena na izlazni napon i njegov harmonični sastav
- Izmene delova koda, implementacija prekidnih rutina za A/D konverziju.

Navedene vežbe mogu se dalje usložnjavati i proširivati u zavisnosti od zainteresovanosti studenata za rad na DSP-u kao i potrebi za dubljim izučavanjem ovih metoda modulacije i njihovih karakteristika.

6. ZAKLJUČAK

Ovakav pristup ima za cilj da omogući kompletno razumevanje navedenih metoda impulsno širinske modulacije kao i njenu implementaciju na DSP platformi MSK2812. Na ovaj način studentima je najpre omogućena analiza ovih metoda IŠM kroz vizuelizaciju i merenje a potom razumevanje kompletnog postupka implementacije i redosleda događaja u procesoru. Kada se jednom savlada postupak generisanja IŠM na bilo kom DSP onda se on analogno može primeniti i na druge serije procesora i mikrokontrolera što implementaciju čini znatno bržom i univerzalnijom. Takođe, ovaj sistem omogućava jednostavnu analizu karakteristika ovih metoda IŠM koja se najpre odgleda u broju promene prekidačkih stanja prekidača za vreme jednog perioda i harmonijskom sastavu izlaznog napona invertora.

ZAHVALNICA: Rad je razvijen u okviru projekta TR33016 koji je finansiran od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije.

7. LITERATURA

- [1] Azuan Bin Alias: *Modeling and simulation of single phase inverter with PWM using MATLAB/Simulink*, Faculty of electrical & electronic engineering, University Malaysia Pahang, 07
- [2] Mahmoud Riaz: *Simulation of electric machine and drive systems using Matlab and Simulink*, dostupno na: <http://www.ece.umn.edu/users/riaz/index.htm>
- [3] Darko Marčetić: *Primena mikroprocesora u energetici - pogoni naizmjenične struje sa skalarnim upravljanjem i PWM modulacijom*, skripta, Novi Sad, 2008
- [4] K. Vinoth Kumar, Prawin Angel Michael, Joseph P. John and Dr. S. Suresh Kumar: *Simulation and comparison of SPWM and SVPWM control for three phase inverter*, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, ISSN 1819-6608, VOL. 5, NO. 7, July 2010