

UTICAJ MRTVOG VREMENA INVERTORA NA MEHANIČKU KARAKTERISTIKU ASINHRONOG MOTORA

Kratak sadržaj: *matra se uticaj mrtvog vremena invertora na mehaničku karakteristiku asinhronog motora. Pomoću napravljenog modela invertora i modela asinhronog motora simuliran je zalet motora. Simulacije dinamike pogona izvršene su pomoću programskog paketa MATLAB.*

Ključne reči: *mrtvo vreme, invertor.*

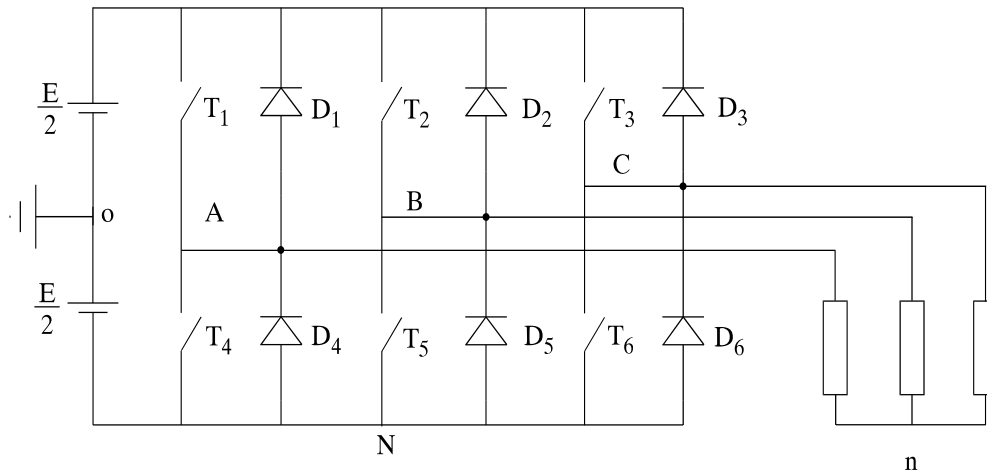
1. UVOD

Vreme komutacije tokom koga su isključena oba prekidača u grani invertora, označava se kao mrtvo vreme (t_{Δ}). U radu se razmatra uticaj mrtvog vremena na mehaničku karakteristiku asinhronog motora. Napon na invertoru je ne upravljiv tokom mrtvog vremena, zato nastojimo smanjiti mrtvo vreme.

Za realizaciju servo pogona, pogona sa regulacijom brzine, upotrebljava se frekventni pretvarač. Izlazna struja treba biti sinusnog talasnog oblika promenljive amplitude i frekvencije. Na sl. 1. prikazan je blok dijagram elektromotornog pogona sa motorom naizmenične struje (asinhroni motor, sinhroni motor sa permanentnim magnetima).

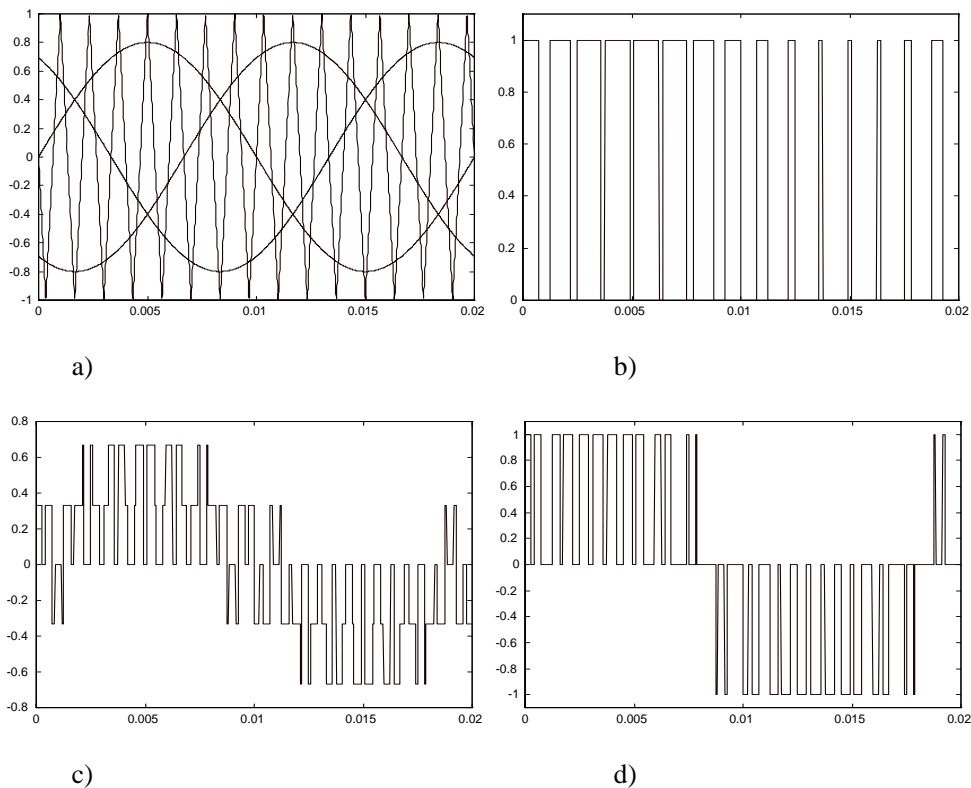
Jednosmerni napon se najčešće dobija pomoću ispravljača sa nepristupačnom srednjom tačkom. Invertor se sastoji od šest prekidačkih komponenti i njima paralelno vezanih povratnih dioda. Tranzistori rade u prekidačkom režimu, što znači da su u zasićenju ili su zakočeni. Izlazni naponi u tačkama A,B,C imaju diskretan karakter. Ovakvim invertorom se jednosmerni napon napajanja konvertuje u trofazni sistem napona.

Uvođenjem većeg broja impulsa po periodi smanjuje se harmonijski sastav izlaznog napona. Postupak kojim se određuju uglovi paljenja prekidačkih komponenti, zove se impulsno širinska modulacija (PWM). Osnovni cilj tehnika PWM je kontrola amplitude i učestanosti osnovnog harmonika izlaznog napona. U [1] analiziran je PWM sa upotrebom različitih modulacionih signala, uz osvrt na harmonijski sadržaj izlaznog napona invertora. Za računarske simulacije izvršene u ovom radu, uglovi paljenja prekidačkih komponenti određeni su poređenjem trougaonog moduličanog nosioca sa referencom napona. Za referencu napona koristi se signal sinusnog oblika.



sl. 1. Blok dijagram pogona sa mašinom naizmenične struje

Na sl. 2. prikazan je trougaoni modulišni nosilac i referenca æeljenog napona na motoru.



sl. 2. Talasni oblici trofaznog PWM

Na sl. 2b. prikazan je upravljački signal (T_A) prekidačke komponente T_1 u grani A. Pretpostavlja se da su prekidačke komponente idealne u smislu da se trenutno mogu isključiti odnosno da nikada nisu istovremeno uključena oba prekidača u grani. Zbog prisustva povratnih dioda izlazni napon je nezavisan od smera struje. Izlazni naponi U_{AN} , U_{BN} , U_{CN} definisani u odnosu na negativan pol jednosmernog međukola imaju isti oblik kao i upravljački signali T_A , T_B , T_C . Od interesa je fazni napon motora preko kojeg se napaja mašina. U slučaju izvedene nulte tačke namota statora, povezane sa srednjom tačkom ispravljača ovi naponi su jednaki. Pri trofaznom napajanju bez izvedene nulte tačke naponi U_{AN} , U_{BN} , U_{CN} definisani u odnosu na zvezdište motora dati su sa sledećom jednačinom:

$$\begin{vmatrix} U_{An} \\ U_{Bn} \\ U_{Cn} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} U_{AN} \\ U_{BN} \\ U_{CN} \end{vmatrix} \quad (1)$$

Za pravilan rad motora značajni su linijski naponi. Na sl. 2c. i sl. 2d. prikazan je oblik napona faze A, prema zvezdištu motora, i linijski napon U_{AB} . Da bi se postigao nominalan napon motora minimalna vrednost napona jednosmernog međukola data je jednačinom (2).

$$E_{\min} = \frac{2\sqrt{2}U_{nf}}{m_a} \quad (2)$$

Za postizanje kvalitetne dinamike pogona potrebna je naponska rezerva od 30%.

$$E = 1.3 * E_{\min} \quad (3)$$

Indeks amplitudske modulacije m_a definisan je kao količnik amplitude referentnog signala i amplitude trougaonog modulišućeg signala.

$$m_a = \frac{V_{cont}}{V_{tr}} \quad (4)$$

Indeks frekvencijske modulacije definisan je kao količnik prekidačke učestanosti (f_s) i učestanosti fundamentalne komponente (f_1).

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (5)$$

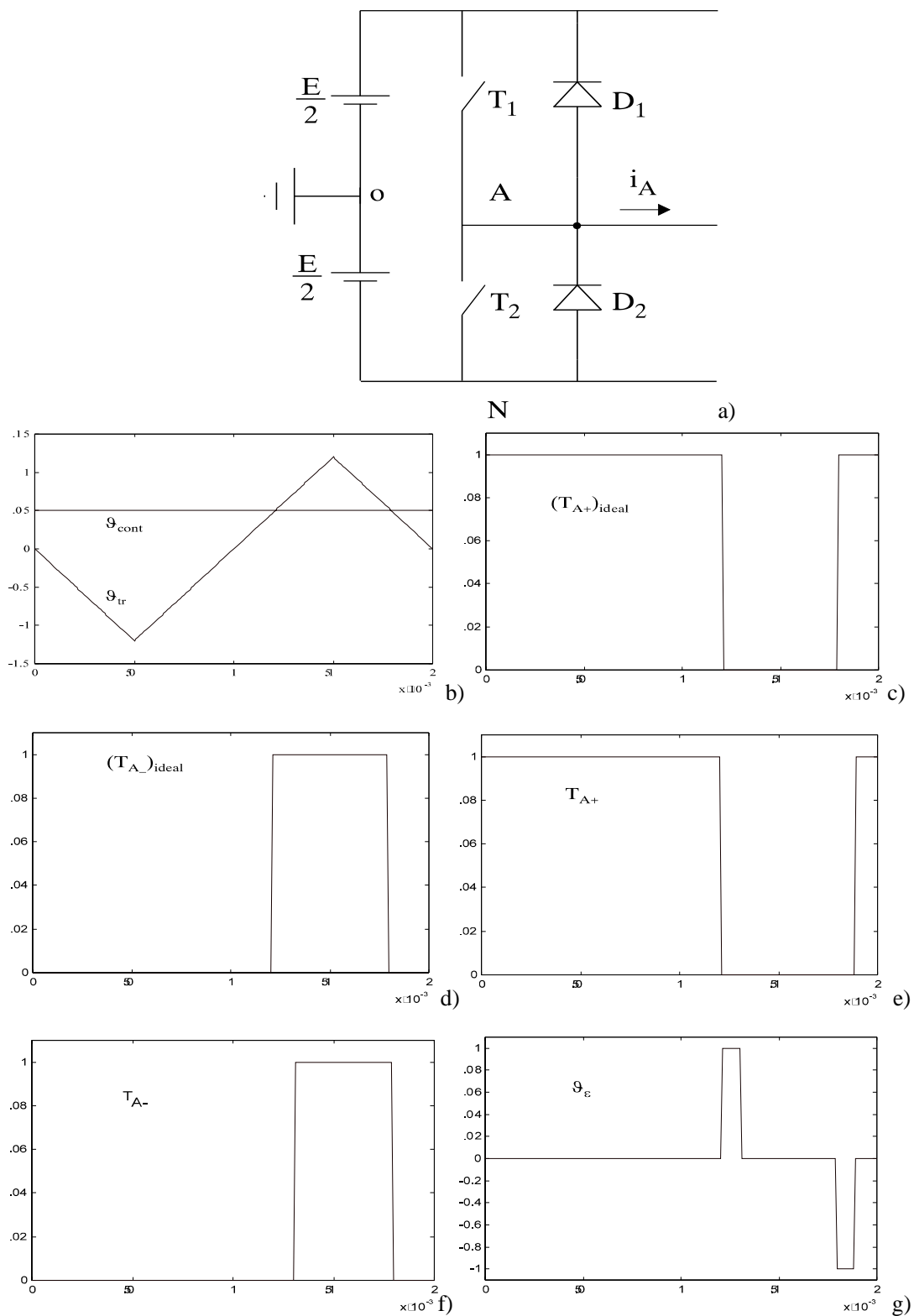
2. EFEKAT MRTVOG VREMENA NA IZLAZNI NAPON IMPULSNO ŠIRINSKI MODULISANOG INVERTORA

Uticaj mrtvog vremena na izlazni napon invertora, objašnjen je na primeru jedne grane trofaznog invertora što je prikazao na sl. 3a. U prethodnom razmatranju pretpostavljeno je da su prekidači idealni, da mogu trenutno promeniti stanje ON, OFF, da nikada istovremeno nisu uključena oba prekidača u istoj grani.

Sa ϑ_{cont} prikazan je izgled naponske reference, za koju se pretpostavlja da je konstantna tokom jedne prekidačke periode. Poređenjem napona ϑ_{cont} sa trougaonim nosiocem ϑ_{tr} određeni su uglovi paljenja prekidačkih komponenti. Upravljački signali, od $(T_{A+})_{ideal}$ i $(T_{A-})_{ideal}$ prikazani su na sl.3c. i sl.3d. U praksi, zbog konačnog vremena uključavanja i isključavanja (turn-on i turn-off) karakterističnog za svaku komponentu, prekidači se isključuju u trenutku određenom kao kod 3e.i sl.3f. Na sl.3e. i sl. 3f. prikazan je izgled upravljačkih signala grane A sa uvažavanjem efekta mrtvog vremena t_{Δ} . Napon, je određen znakom struje, dok su istovremeno isključena oba prekidača u jednoj grani invertora. Napon ϑ_{ε} definisan je kao razlika napona U_{AN} bez uvažavanja mrtvog vremena i napona U_{AN} sa uvažavanjem mrtvog vremena [2].

$$\vartheta_{\varepsilon} = (U_{AN})_{idel} - (U_{AN})_{st\ var\ no} \quad (6)$$

Na sl.3g. prikazan je napon ϑ_{ε} pri $I_A > 0$ odnosno pri $I_A < 0$.



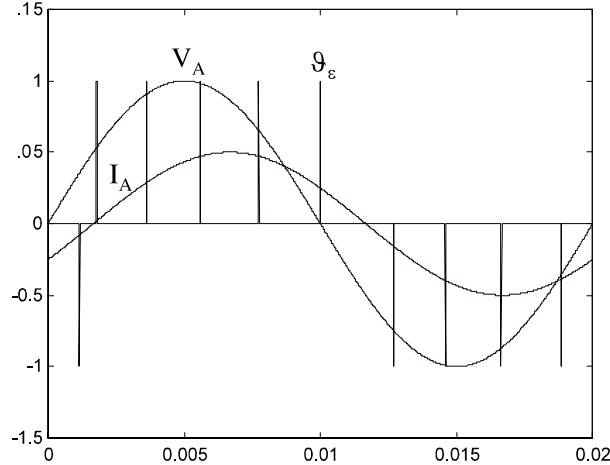
sl. 3. Efekat mrtvog vremena t_{Δ}

Usrednjavanjem napona ϑ_{ε} , tokom prekidačke periode, dobija se promena izlaznog napona izazvana vremenom t_{Δ} .

$$\begin{aligned} \Delta U_{AN} &= \frac{t_{\Delta}}{T_s} E & I_A > 0 \\ \Delta U_{AN} &= -\frac{t_{\Delta}}{T_s} E & I_A < 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Promena napona ne zavisi od amplitude nego isključivo od znaka struje.

Na sl. 4. prikazan je talasni oblik napona V_A , struje I_A i napona ϑ_{ε} tokom periode od 20 ms.



sl.4. Uticaj mrtvog vremena na napon V_A , i struju I_A ($m_a = 1$, $m_f = 9$)

3. MATEMATIČKI MODEL ASINHRONE MAŠINE

Radi pogodnog matematičkog opisa asinhronog motora uvode se uobičajene polazne pretpostavke [3]. Smatra se da su fazni namoti statora identični i međusobno pomereni po obodu statora za 120° električnih, magnetopobudna sila po obimu zazora je sinusno raspodeljena, zanemaruje se magnetno zasićenje, parametri su konstantni.

Matematički model asinhronne mašine napisan u Br-području, u obliku pogodnom za simulaciju na računaru glasi:

Jednačine naponske ravnoteže:

$$\begin{aligned} U_{ds} &= R_s I_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs} & ; & \quad \psi_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} \\ U_{qs} &= R_s I_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds} & ; & \quad \psi_{qs} = L_s I_{qs} + L_m I_{qr} \\ 0 &= R_r I_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \psi_{qr} & ; & \quad \psi_{dr} = L_r I_{dr} + L_m I_{ds} \\ 0 &= R_r I_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \psi_{dr} & ; & \quad \psi_{qr} = L_r I_{qr} + L_m I_{qs} \end{aligned} \quad (8)$$

Jednačina mehaničke ravnoteže:

$$T_e + T_l = \frac{J}{P} \frac{d\omega_{re}}{dt} + \frac{K_{tr}}{P} \omega_{re} \quad (9)$$

Moment konverzije glasi:

$$T_e = PL_m (I_{dr} I_{qs} - I_{ds} I_{qr}) \quad (10)$$

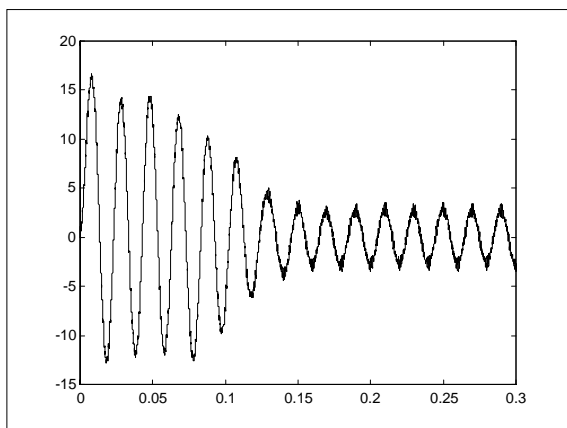
4. PRIKAZ SIMULACIONIH REZULTATA

U radu se analizira uticaj mrtvog vremena invertora na mehaničku karakteristiku asinhronog motora. Simuliran je start asinhronog motora sa podacima datim u tabeli 1. Motor je opterećen sa 0.8 Nm.

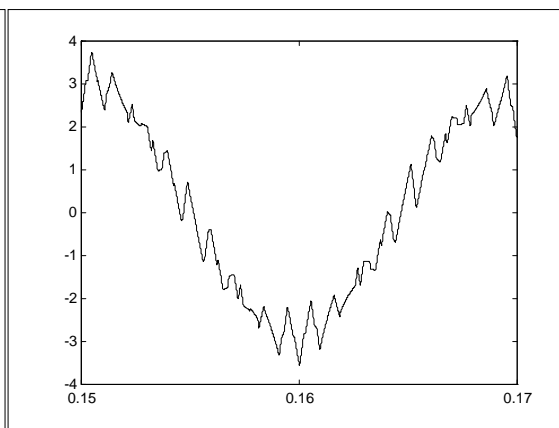
tabela 1. Parametri motora

$R_s = 10 \quad \Omega$	$R_r = 6.3 \quad \Omega$
$L_{\gamma s} = 43.067 \text{ mH}$	$L_{\gamma r} = 40.107 \text{ mH}$
$L_m = 0.4212 \text{ H}$	$J = 0.00442 \text{ kgm}^2$

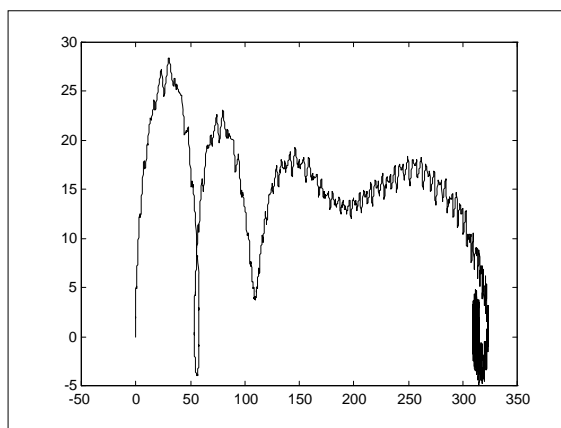
Rezultati prezentirani na sl.5-8.dobijeni su simulacijom napajanja motora iz invertora kod koga nije uvaæen efekat mrtvog vremena. Indeks frekvencijske modulacije iznosi $m_f = 21$.



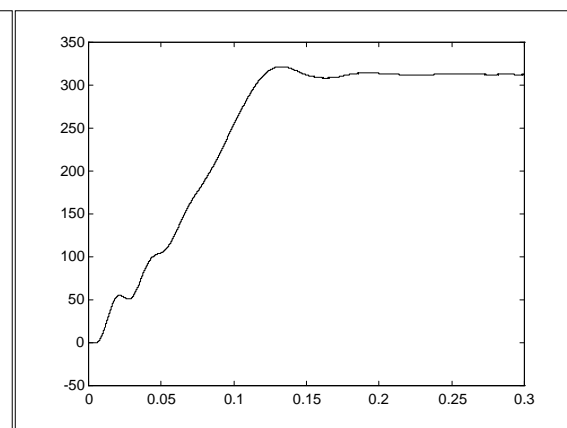
sl.5. Struja faze A, $I_A = f(t)$



sl.6. Struja faze A, $I_A = f(t)$



sl. 7. Zavisnost moment-brzina, $T_e = f(\omega)$

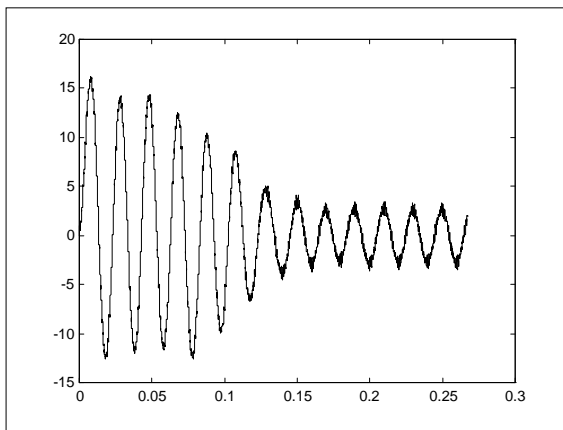


sl.8. Brzina motora, $\omega = f(t)$

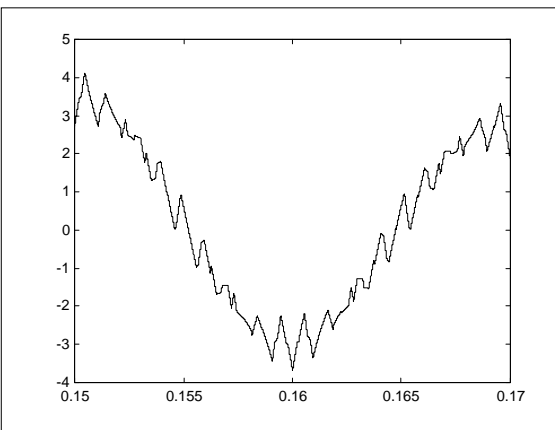
Na sl. 5.-6. prikazan je izgled struje motora tokom zaletanja i nakon dostizanja stacionarnog stanja. U stacionarnom stanju struja faze A je razliãita od nule zbog optereñenja motora. Slika 7 prikazuje zavisnost momenta od brzine tokom zaleta, sl.8.prikazuje uspostavljanje brzine motora.

Sve raãunarske simulacije odziva asinhronog motora koji se napaja iz invertora, urađene su u programskom paketu MATLAB, koji omoguñuje modelovanje i simulaciju dinamiãkih sistema. Program je sastavljen od celina koje simuliraju rad pojedinih delova pogona. Pri svim simulacijama posmatran je sinhroni PWM, pri ãemu indeks m_f ima celobrojnu vrednost.

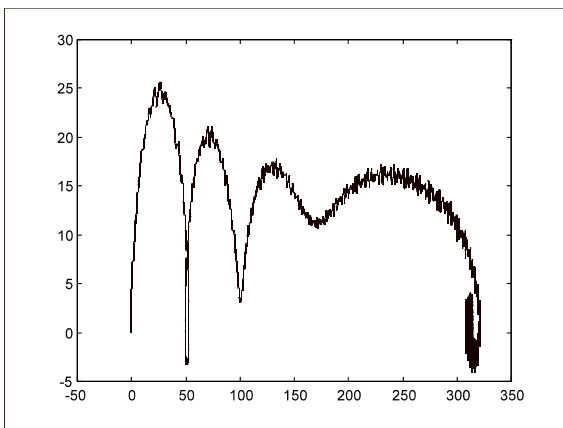
Rezultati dobijeni pri uvaæavanju mrtvog vremena invertora prezentirani su na sl.9.-12.



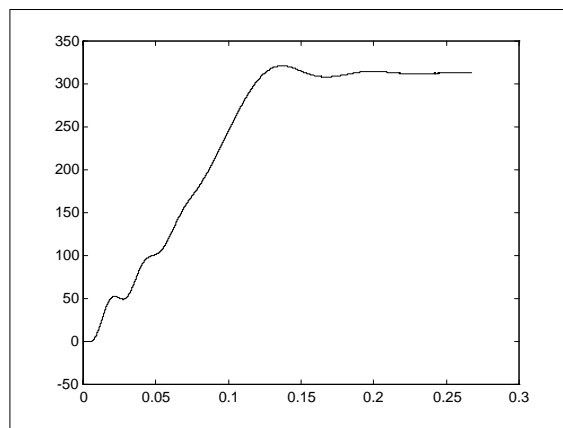
sl.9. Struja faze A, $I_A = f(t)$



sl.10. Struja faze A, $I_A = f(t)$



sl. 11. Zavisnost moment-brzina , $T_e = f(\omega)$



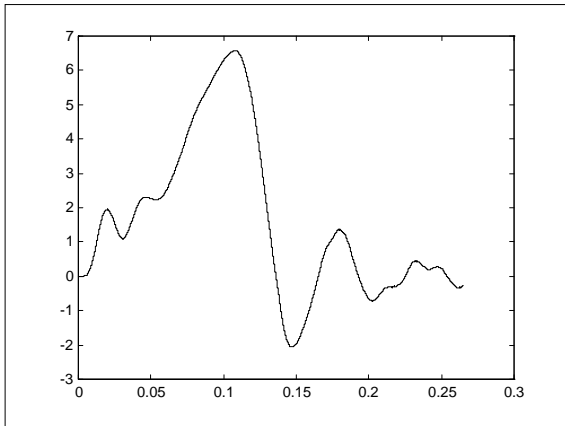
sl.12. Brzina motora, $\omega = f(t)$

Na osnovu rezultata izvršenih simulacija, prikazanih na sl.5-6. i na sl. 9-10., uočava se da su razlike u odzivu struje statora zanemarive. Mehanička karakteristika sa sl. 11. ima sličan oblik kao i karakteristika prikazana na sl.7. što se moglo očekivati.

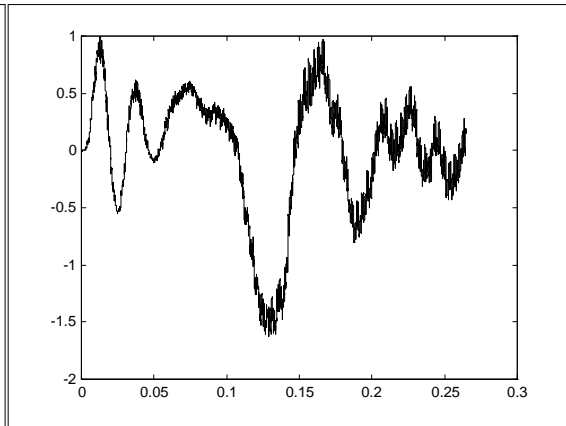
Na sl. 13. prikazana je razlika u brzini motora pri napajanju iz invertora gde nije uvažen efekat mrtvog vremena i brzine motora pri napajanju iz invertora sa uvažavanjem efekta mrtvog vremena. Uočava se da najveće odstupanje brzina postoji pri završetku prelaznog procesa zaletanja. Po obavljenom zaletu definisana razlika brzina pada ispod jednog radijana po sekundi.

Na sl.14. prikazana je razlika razvijenog momenta motora, za napajanje iz invertora pri zanemarenom efektu mrtvog vremena i sa uvaženim efektom mrtvog vremena invertora. Elektromagnetni momenti motora dobijeni simulacijom razlikuju se za manje od 2 Nm tokom zaletanja. Najveće odstupanje momenta postoji pri završetku prelaznog procesa zaletanja motora.

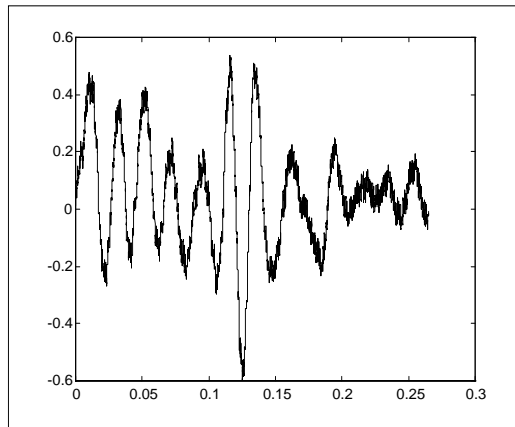
Na sl.15. prikazana je razlika struje statora, za napajanje iz invertora pri zanemarenom efektu mrtvog vremena i sa uvaženim efektom mrtvog vremena invertora. Struje motora se razlikuju za manje od 0.6 A. Nakon obavljenog zaleta razlika struja teži nuli.



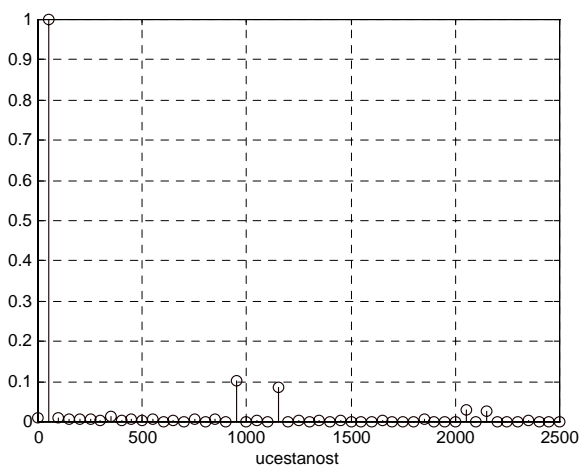
sl. 13. Razlika brzine asinhronog motora pri zanemarenom efektu mrtvog vremena i pri uvaæenom efektu mrtvog vremena invertora



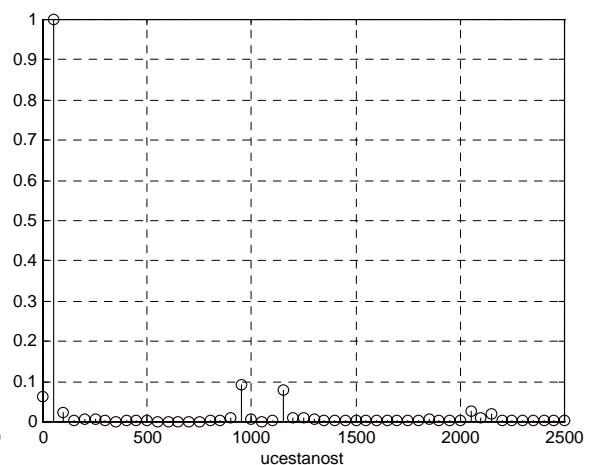
sl. 14. Razlika razvijenog elektromagnetnog momenta asinhronog motora pri zanemarenom efektu mrtvog vremena i pri uvaæenom mrtvom vremenu invertora



sl. 15. Razlika struje statora asinhronog motor pri zanemarenom efektu mrtvog vremena i pri uvaæenom efektu mrtvog vremenu invertora



sl.16. Amplitudski spektar statorske struje pri zanemarenom efektu mrtvog vremena



sl.17. Amplitudski spektar statorske struje pri uvaæenom efektu mrtvog vremena

Na sl. 16. prikazan je amplitudski spektar statorske struje asinhronog motora napajanog iz invertora, sa zanemarenim efektom mrtvog vremena, a na slici 17 uvaæen je efekat mrtvog vremena. Indeks frekvencijske modulacije se uzima da je neparan ceo broj åime se eliminiãu parni harmonici.

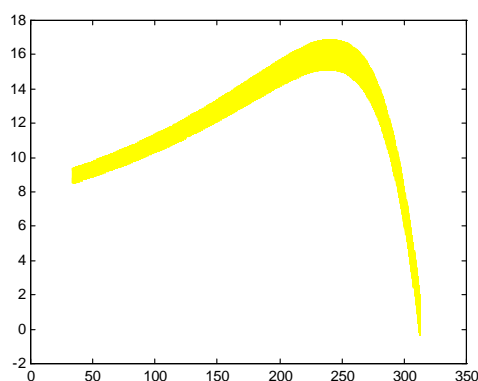
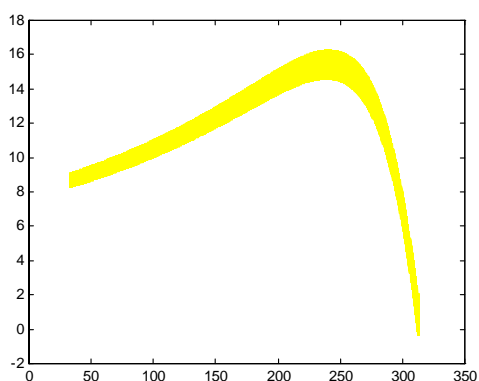
U simulacijama izvršenim u radu uzeto je $m_f=21$. Ako je m_f neparan broj deljiv sa tri eliminisani su harmonici multipli broja tri, što se vidi na priloženim slikama. Amplituda 19 i 23 harmonika iznosi 10% amplitude fundamentalne komponente, a amplituda 41 i 43 harmonika je ispod 5% amplitude fundamentalne komponente. Uvažavanje efekta mrtvog vremena dovodi do porasta jednosmerne komponente. Efektivna vrednost izobličenja struje statora izračunava se prema sledećoj jednačini:

$$(\Delta I)_{\text{eff}} = \sqrt{(I_{\text{eff}}^{\text{total}})^2 - I_1^2 - I_{DC}^2} \quad (11)$$

Za pogon koji se napaja inverterom sa nevažnim efektom mrtvog vremena, efektivna vrednost izobličenja struje statora iznosi: $(\Delta I)_{\text{eff}} = \sqrt{1.944^2 - 1.916^2 - 0.0074^2} = 0.328 \text{ A}$

Ako se asinhroni motor napaja inverterom kod koga je uvažen efekat mrtvog vremena, efektivna vrednost izobličenja struje statora iznosi: $(\Delta I)_{\text{eff}} = \sqrt{1.931^2 - 1.893^2 - (-0.04)^2} = 0.379 \text{ A}$

Na sl.18. prikazana je mehanička karakteristika asinhronog motora pri napajanju iz invertora sa zanemarenim efektom mrtvog vremena. Efekat mrtvog vremena uvažen je pomoću jednačine (7), a odgovarajuća mehanička karakteristika prikazana je na sl. 19.



sl. 18. *Mehanička karakteristika, $T_e=f(\omega)$ sa zanemarenim efektom mrtvog vremena*

sl. 19. *Mehanička karakteristika, $T_e=f(\omega)$ sa uvažnim efektom mrtvog vremena*

Na osnovu sl. 18. i sl. 19. uočava se da je prevalni moment mehaničke karakteristike pri uvažnom efektu mrtvog vremena veći nego prevalni moment karakteristike sa zanemarenim efektom mrtvog vremena.

Mehanička karakteristika, asinhronog motora, u oblasti brzina između prevalne i sinhronne, prikazana je na sl.20. pri zanemarenom i pri uvažnom efektu mrtvog vremena. Mehaničke karakteristike se najviše razlikuju u oblasti brzina bliskih prevalnoj brzini, približavanjem ka sinhronoj brzini mehaničke karakteristike se poklapaju.

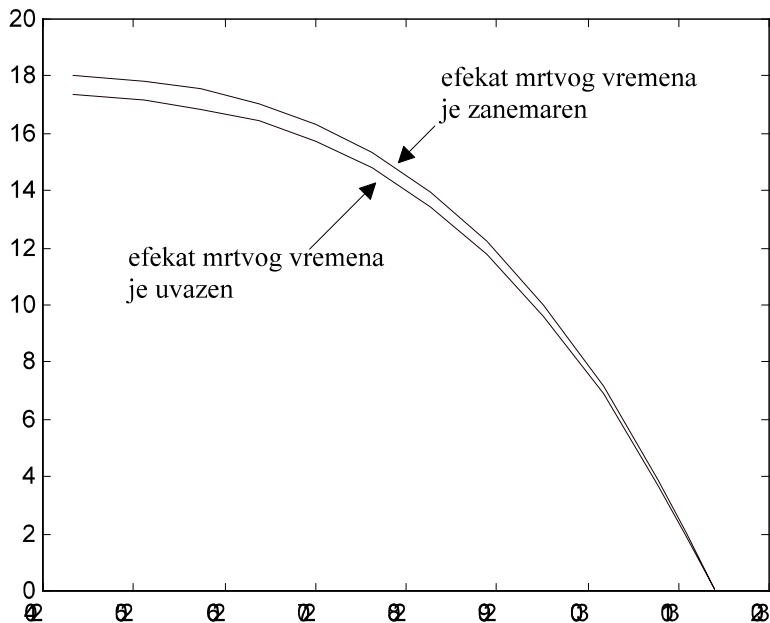
U tabeli 2. prikazane su karakteristične vrednosti klizanja, električne brzine obrtanja rotora asinhronog motora za koje su simulacijama određene stacionarne vrednosti razvijenog elektromagnetnog momenta pri zanemarenom i pri uvažnom efektu mrtvog vremena.

tabela 2. Uticaj efekta mrtvog vremena na stacionarne vrednosti momenta

	klizanje	brzina [rad/s]	Te-dead [Nm]	Te-motor[Nm]
1	0.225	243.25	17.40	18.03
2	0.20	251.20	17.14	17.85
3	0.18	257.48	16.87	17.54
4	0.16	263.76	16.44	17.04
5	0.14	270.04	15.71	16.32
6	0.12	276.32	14.77	15.32
7	0.10	282.60	13.44	13.98
8	0.08	288.80	11.78	12.24
9	0.06	295.16	9.59	9.98
10	0.04	301.44	6.92	7.2

11	0.02	307.72	3.70	3.87
12	0.01	310.86	1.91	2.04
13	0.00	314.00	0.06	0.07

U trećoj koloni prikazane su vrednosti razvijenog elektromagnetnog momenta pri uvaženom efektu mrtvog vremena, a u četvrtoj pri zanemarenom efektu mrtvog vremena.



sl. 20. Mehaničke karakteristike u oblasti od prevalne do sinhronne brzine

4.ZAKLJUČAK

Kao posledica efekta mrtvog vremena invertora, povećani su viši harmonici struje, povećana je jednosmerna komponenta struje, što dovodi do povećanja buke. U cilju smanjenja gubitaka usled viših harmonika, eliminacije dodatne buke nastojimo izvršiti kompenzaciju efekta mrtvog vremena. U regulisanom elektromotornom pogonu, regulaciona struktura, treba da obezbedi kompenzaciju efekta mrtvog vremena invertora. Kompenzacija se izvodi bilo hardverski bilo softverski.

Na osnovu rezultata simulacije može se zaključiti da za dobijene mehaničke karakteristike asinhronog motora, pri napajanju iz invertora nije neophodno uvažeti mrtvo vreme invertora.

5.LITERATURA

- 1.E.Lvi; *Strategija impulsno frekventna modulacije u invertorskom napajanju asinhronne mašine*, XXXII Jugoslovenska konferencija ETAN-a, Sarajevo.
- 2.N.Mohan; *Power electronics*, John Wiley & Sons,1989.
- 3.V.Vučković; *Opšta teorija električnih mašina*, Nauka, Beograd,1992.