

## PODRŽANE OSCILACIJE BRZINE U POGONU ASINHRONOG MOTORA

Veran Vasić, Miodrag Zubić, *Fakultet tehničkih nauka Novi Sad*  
Slobodan Vukosavić, Vladan Vučković, *Elektrotehnički fakultet Beograd*

**Sadržaj:** Za pogon pumpi, ventilatora i kompresora koriste se frekventno regulisani asinhroni motori sa otvorenom petljom. Podržane oscilacije brzine su često sretane u ovim pogonima. U ovom radu biće izložen koncizan način za predviđanje oblasti nestabilnosti.

**Ključne reči:** mrtvo vreme/podržane oscilacije/oblast stabilnosti/asinhroni motor

### 1. UVOD

U savremenim industrijskim i tehnološkim procesima u pogonima sa promenljivom brzinom sve se više koristi asinhroni motor. Za pogon pumpi, ventilatora i mlinova uobičajeno se koriste asinhroni motori napajani iz izvora promenljive frekvencije, što je realizovano sa trofaznim PWM invertorima. U ovakvim pogonima u opsegu malih i srednjih brzina pri napajanju iz sinusnog naponskog izvora zapažena je pojava podržanih oscilacija brzine (nestabilan režim rada). Ispravno funkcionisanje invertora zahteva izvesno vreme tokom koga su isključena oba prekidača u grani, kako bi se izbeglo istovremeno provodenje prekidača odnosno kratak spoj u jednosmernom međukolu. Taj vremenski period se zove mrtvo vreme (*dead time*,  $t_d$ ). Uvođenje mrtvog vremena kod PWM invertora dodatno dovodi do pogoršanja stabilnosti pogona, što zahteva razvoj jednostavnog analitičkog postupka za predviđanje nestabilnog režima rada.

U literaturi [1-3] razmatra se uticaj mrtvog vremena pretvarača na stabilnost asinhronog motora i predlažu se mogućnosti za kompenzaciju efekta mrtvog vremena. Lockwood u [3] eksperimentalno pokazuje da kada asinhroni motor radi u oscilatornom modu brzina obrtnaja, napon i struja na jednosmernoj strani invertora kao i aktivna i reaktivna snaga postaju oscilatorne veličine. Eksperimentalno je locirana oblast nestabilnosti. Simulacijama na računaru moguće je predvideti odziv pogona u ustaljenom stanju i tokom prelazne pojave [3].

Za predikciju oblasti nestabilnosti u ovom radu razvijen je linearizovani matematički model pogona koji uvažava mrtvo vreme invertora, kao i diskontinualni mod ispravljačke sekcije. Simulacijom vremenskog odziva nelinearizovanog modela pogona verifikovani su rezultati dobijeni pomoću linearizovanog modela. Eksperimentalni rezultati potvrdili su postojanje predviđene oblasti nestabilnosti pomoću linearizovanog modela.

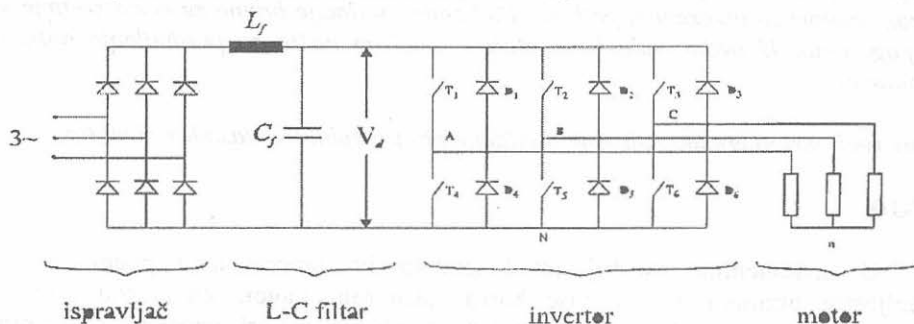
## 2. MODELOVANJE POGONA ASINHRONOG MOTORA ZA REŽIM MALIH POREMEĆAJA

Ovaj rad će omogućiti da se detektuju radni režimi koji su praćeni oscilacijama enerģije a što uslovljava oscilaciju brzine pogona, kao i da se istraži uticaj parametara pogona (mrtvo vreme invertora, moment inercije pogona, moment opterećenja).

Jednosmerno međukolo ulaznog stepena može biti u kontinualnom ili u diskontinualnom modu, što se mora na odgovarajući način uvažiti u matematičkom modelu pogona koji će biti iskorišćen za ispitivanje stabilnosti pogona za režim malih poremećaja.

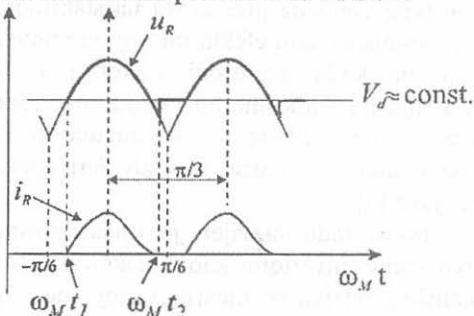
### 2.1. Modelovanje diskontinualnog moda ulaznog stepena

Za realizaciju pogona promenljive brzine obrtanja sa asinhronim motorom koristi se pretvarač sa jednosmernim međukolom, prikazan na Sl. 1.



Sl. 1. Pogon sa asinhronim motorom

Kod razmatranih pretvarača (*low cost*) potrebno je da pretvarač snage poseduje što manji gabarit i težinu pa se zbog toga u jednosmerno međukolo postavlja induktivnost relativno male vrednosti. Struja kroz induktivnost filtra ( $i_R$ ) postaje diskontinualna ako se induktivnost filtra  $L_f$  smanji ispod neke vrednosti ili ako je struja  $i_R$  mala. Matematički model pogona je sedmog odnosno šestog reda u zavisnosti od moda ulaznog stepena. Većina pretvarača zaista ima ulazni stepen u diskontinualnom modu. Vremenski oblici za napon  $V_d$  i struju  $i_R$  uz pretpostavku da je struja  $i_R$  diskontinualna prikazani su na Sl. 2.



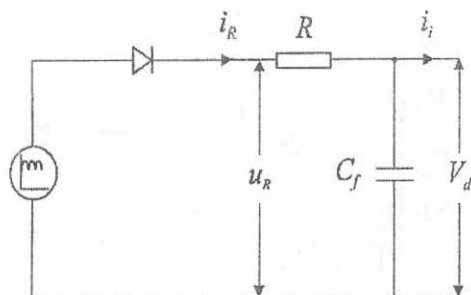
Sl. 2. Struja i napon filtra u diskontinualnom modu

Ako je struja ispravljača  $i_R > 0$ , L-C filter se može opisati sa sledeće dve diferencijalne jednačine u stacionarnom koordinatnom sistemu:

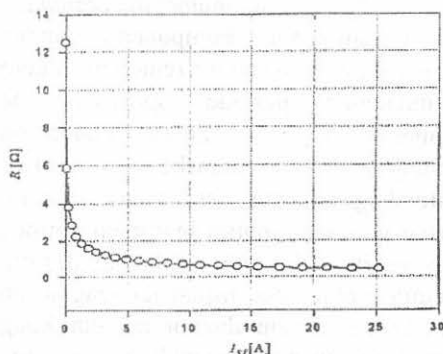
$$\frac{di_R}{dt} = \frac{u_R - R_f i_R - V_d}{L_f}; \frac{dV_d}{dt} = \frac{i_R - i_i}{C_f} \quad (1,2)$$

Za diskontinualni režim struje  $i_R$ , L-C filter se može ekvivalentirati sa kolom prvog reda kao što je prikazano na Sl. 3. Otpornik u kolu na Sl. 3. je promenljiv sa strujom invertora i predstavlja nagib na izlaznoj karakteristici ispravljača.

Filtar se u ovom slučaju opisuje sa jednom diferencijalnom jednačinom. Zavisnost  $R - I_{sr}$  ( $I_{sr}$  srednja vrednost struje  $i_i$ ) na Sl. 4. dobijena je za  $L_f = 1,1$  mH i  $C_f = 2,2$  mF.



Sl. 3. Ekvivalentno kolo L-C filtra za diskontinualni mod



Sl. 4. Otpornost R

Ako je struja ispravljača  $i_R$  diskontinualna, jednačina stanja L-C filtra glasi:

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{u_R - V_d}{RC_f} - \frac{i_i}{C_f} \quad (3)$$

Skup diferencijalnih jednačina koji predstavlja matematički model pogona asinhronog motora [4] je nelinearan i nepodesan za praktičnu primenu. Da bi primenili relativno jednostavne kriterijume stabilnosti razvijene za linearne sisteme potrebno je izvršiti linearizaciju skupa diferencijalnih jednačina. U svakoj tački  $f_i$  (učestanost) -  $m_e$  (moment) ravni izračunavaju se sopstvene vrednosti Jakobijeve matrice linearizovanog sistema, kako bise dobila oblast u kojoj bar jedna sopstvena vrednost ima pozitivan realan deo, dakle oblast nestabilnosti. Oblast nestabilnosti locirana je uz pretpostavku da su nastupili proizvoljno mali poremećaji.

## 2.2. Modelovanje efekta mrtvog vremena frekventnog pretvarača

Efekat mrtvog vremena u modelu pogona koji se koristi za detekciju oblasti nestabilnosti uvažen je pomoću promenljivog otpornika. Kada se mrtvo vreme invertora uvaži na pomenuti način, matrica sistema pogona biće modifikovana na način kao što je prikazano u ovom delu. Lociranje oblasti stabilnosti se svodi na određivanje sopstvenih vrednosti ovako modifikovane matrice sistema. U toku mrtvog vremena  $t_\Delta$  oba prekidača u grani su isključena. Izlazni napon invertora je tada određen smerom izlazne struje. Ako je struja  $i_A$  pozitivnog referentnog smera napon usled efekta mrtvog vremena faze "a" je  $-V_d$ . Za struju  $i_A$  negativnog referentnog smera napon  $u_e$  je  $V_d$ . Odstupanje napona usled efekta mrtvog vremena ima oblik povorke impulsa, kao što je prikazano na Sl. 5b. Slika 5. ilustruje odnos između struje  $i_A$  i neželjene komponente napona prouzrokovane mrtvim vremenom ( $u_e$ ). Struja  $i_A$  je prikazana kao prostoperiodična, zanemareni su viši harmonici struje. Uticaj mrtvog vremena moguće je uvažiti usrednjavanjem napona usled efekta mrtvog vremena tokom komutacionog perioda ( $T_s$ ), tako da se dobija napon:

$$\Delta u = U_D, I_A < 0; \quad \Delta u = -U_D, I_A > 0; \quad U_D = V_d \frac{t_\Delta}{T_s} \quad (4)$$

gde su:

$t_{\Delta}$  -iznos mrtvog vremena,  
 $T_s$  -komutaciona perioda.

Usrednjavanje komponente napona prouzrokovane mrtvim vremenom tokom komutacione periode opravdano je primeniti, jer je  $t_{\Delta}$  znatno manje od tranzijentne vremenske konstante statorskog namota asinhronog motora, mrtvo vreme je znatno manje od periode sopstvenih podržanih oscilacija, drugim rečima motor neće uspeti da reaguje na tako brzu promenu ulaznog napona. Zbog kumulativnog dejstva izobličenja napona uticaj mrtvog vremena na dinamičko ponašanje asinhronog motora ipak postoji. Komponenta napona prouzrokovana mrtvim vremenom prema zvezdištu motora prikazana je na Sl. 5d. Napon  $\Delta u_n$  je šestopulsnog oblika. Amplituda prvog harmonika faznog napona  $\Delta u_n$  je:

$$(\Delta \hat{u}_n)_1 = \frac{4}{\pi} V_d \frac{t_{\Delta}}{T_s}; \quad (5)$$

Efekat mrtvog vremena na rad motora i dinamičko ponašanje u linearizovanom modelu uvažen je pomoću ekvivalentnog nelinearnog otpornika. Pretpostavlja se da pad napona na otporniku ekvivalentira napon usled mrtvog vremena. Neželjena komponenta napona prouzrokovana mrtvim vremenom je konstantana i nezavisana od amplitude struje motora. Odstupanje napona usled mrtvog vremena ima konstantnu amplitudu i ne zavisi od struje motora. Vrednost otpora ( $R_{\Delta}$ ) kojim se ekvivalentira efekat mrtvog vremena mora biti promenljiv sa amplitudom struje motora.

$$R_{\Delta}(|i_s|, V_d) = \frac{4}{\pi} \frac{V_d t_{\Delta}}{|i_s| T_s}. \quad (6)$$

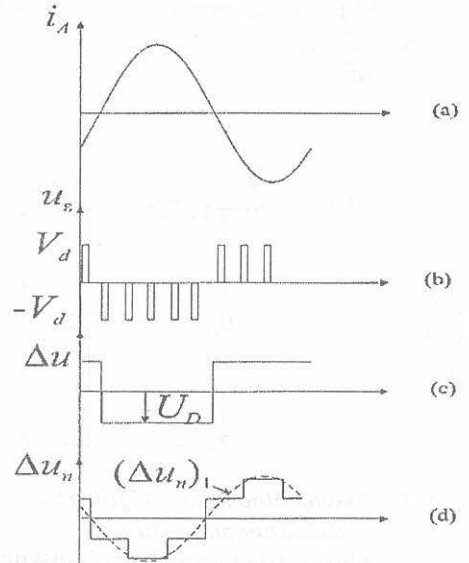
Jednačina naponske ravnoteže statora kada se uvaži mrtvo vreme invertora glasi:

$$\underline{u}_s - R_{\Delta}(|i_s|, V_d) i_s = R_s i_s + \frac{d\underline{\psi}_s}{dt} + j\omega_1 \underline{\psi}_s. \quad (7)$$

Jednačina (7) se može iskoristiti za uvažavanje mrtvog vremena invertora u linearizovanom modelu pogona.

### 3. REZULTATI PREDVIĐANJA OBLASTI NESTABILNOSTI POGONA

U ovom delu biće prikazani rezultati predviđanja oblasti nestabilnosti dobijeni pomoću linearizovanog modela pogona, simulacijom vremenskog odziva pogona koji je modelovan pomoću potpunog matematičkog modela pogona i eksperimentalnim



Sl. 5. Efekat mrtvog vremena

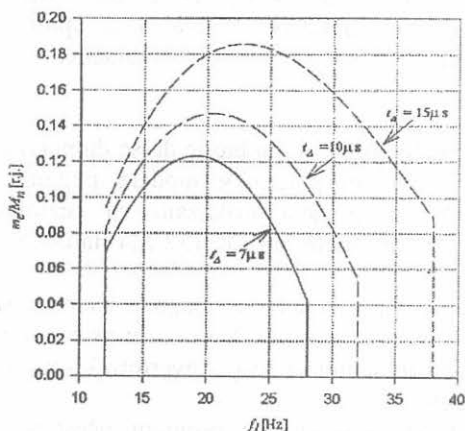
- a) struja statora  
 b) neželjena komponenta napona prouzrokovana mrtvim vremenom  
 c) usrednjena vrednosti napona  $u_s$   
 d) napon prema zvezdištu motora usled mrtvog vremena

putem. Analiziran je uticaj varijacije pojedinih parametara pogona na stabilnost pogona.

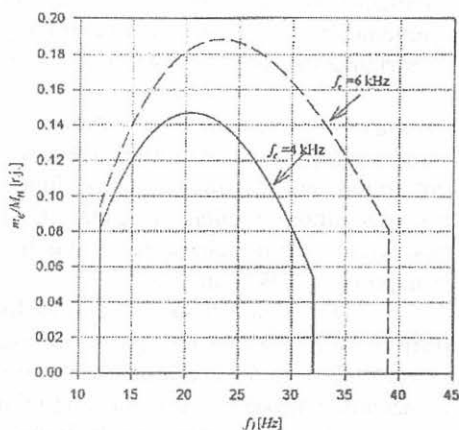
Linearizovni model pogona koji je razvijen u ovom radu koristi se za efikasno lociranje oblasti nestabilnosti pogona. U tu svrhu napisan je program u programskom paketu MATLAB kojim se locira oblast unutar koje je neki od polova sa pozitivnim realnim delom. Ispravnost dobijenih rezultata pomoću linearizovanog matematičkog modela verifikovana je simulacijama odziva kompletnog, nelinearizovanog modela pogona. Za radnu tačku u kojoj pogon poseduje polove u desnoj poluravni kompleksne ravni simuliran je vremenski odziv pogona. Simulacija vremenskog odziva pogona izvršena je pomoću programa koji je napisan u FORTRANU. Rezultati istraživanja prikazani su na Sl. 6-15.

Na Sl. 6 prikazan je uticaj mrtvog vremena na oblast nestabilnosti. Sa povećanjem mrtvog vremena povećava se oblast nestabilnosti. Za svaku radnu tačku čije su koordinate unutar oblasti nestabilnosti motor poseduje oscilatorni režim rada.

Povećanjem prekidačke učestanosti invertora povećava se oblast nestabilnosti a što je prikazano na Sl. 7. Ako je prekidačka učestanost ( $f_c$ ) ispod 2250 Hz može se smatrati da je pogon stabilan nezavisno od učestanosti izlaznog napona invertora. U simulacijama čiji su rezultati prikazani u ovom radu mrtvo vreme je iznosilo  $t_{\Delta}=10\mu\text{s}$ . Rezultati simulacija su dobijeni za SEVER-ov motor ZK 132 M4.

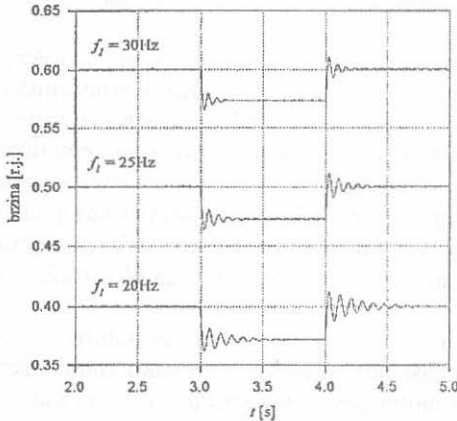


Sl. 6. Uticaj mrtvog vremena na oblast nestabilnosti

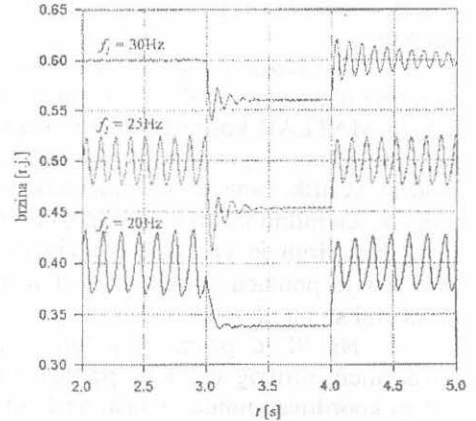


Sl. 7. Uticaj prekidačke učestanosti na oblast nestabilnosti

Na Sl. 8. prikazan je vremenski tok brzine obrtanja za tri vrednosti učestanosti prvog harmonika izlaznog napona  $f_1 = 30$  Hz,  $f_1 = 25$  Hz,  $f_1 = 20$  Hz, mrtvo vreme invertora je zanemareno. Pogon je neopterećen do trenutka  $t = 3$  s kada se motor opterećuje sa  $0,16M_n$ . Odziv pogona je stabilan, nema podržanih oscilacija, međutim to ne odgovara stvarnosti. Na Sl. 9. prikazan je isti prelazni proces kao i na Sl. 8. s tim da je uvaženo mrtvo vreme invertora. Opterećenje pogona utiče na prigušenje oscilacija, što je prikazano na Sl. 9. Podržane oscilacije iščezavaju kada se pogon optereti sa  $0,16M_n$ , pri čemu dolazi do iščezavanja podržanih oscilacija. Nakon rasterećenja motora u trenutku  $t = 4$  s pojavljuju se podržane oscilacije pri  $f_1 = 25$  Hz i  $f_1 = 20$  Hz. Pri učestanosti  $f_1 = 30$  Hz faktor prigušenja pogona je mali po iznosu ali pozitivan, usled čega oscilacije sporo iščezavaju.



Sl. 8. Odziv brzine pri  $t_d = 0 \mu\text{s}$  i  $f_1 = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_1 = 25 \text{ Hz}$  i  $f_1 = 20 \text{ Hz}$



Sl. 9. Odziv brzine pri  $t_d = 10 \mu\text{s}$  i  $f_1 = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_1 = 25 \text{ Hz}$  i  $f_1 = 20 \text{ Hz}$

Za predviđanje oscilatornog režima rada linearizovani model pogona je daleko efikasniji od potpunog nelinearnog modela pogona. Korak proračuna pri simulaciji vremenskog odziva pogona mora biti daleko manji od iznosa mrtvog vremena što utiče na znatno trajanje vremena simulacije odziva, kod upotrebe linearizovanog modela pogona nepostoji problem oko vremena trajnja simulacije.

#### Prikaz eksperimentalnih rezultata

Cilj eksperimentalnih ispitivanja na realnom prototipu bio je da se da potvrda prethodno pokazanih rezultata dobijenih upotrebom potpunog modela pogona i linearizovanog modela pogona. U nastavku ovog dela prikazani su rezultati eksperimentalnih ispitivanja za pogon sa asinhronim motorom ZK 132 M4 napajanim iz naponskog PWM invertora.

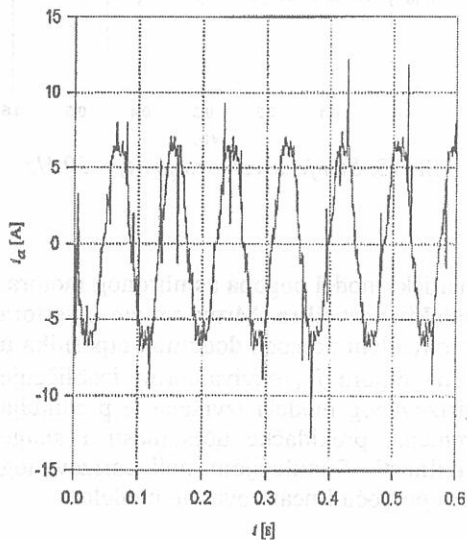
Da bismo eksperimentalno locirali oblast nestabilnosti pogona merene su linijska struja motora i struja na jednosmernoj strani invertora. Na vratilu asinhronog motora nije bilo davača brzine; talasni oblici struje motora i struje invertora koriste se za detektovanje oblasti oscilatornog režima rada.

Eksperimentalno je locirana oblast nestabilnosti pri promeni učestanosti napona na motoru u opsegu od 11 Hz do 25 Hz. Prikazani su odzivi struje  $i_i$  i  $i_a$  za karakteristične vrednosti učestanosti, neposredno pre pojave podržanih oscilacija, nakon pojave podržanih oscilacija, i za učestanost izvan oblasti nestabilnosti. Rezultati prikazani na Sl. 10.-15. dobijeni su za prekidačku učestanost 4,2 kHz i mrtvo vreme od  $t_d = 6 \mu\text{s}$ . Pri izvršenim merenjima pogon je bio rasterećen.

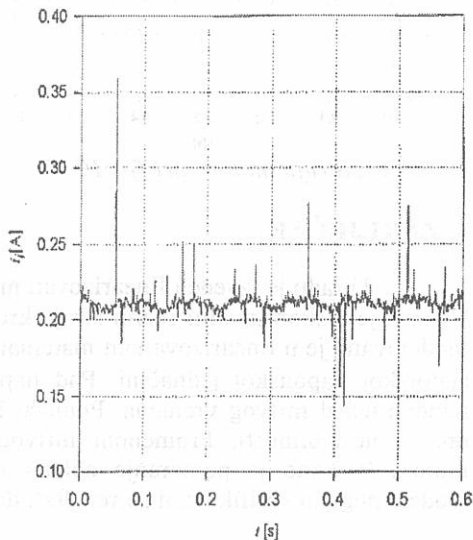
Na Sl. 10. i 11. prikazana je struja motora i struja na jednosmernoj strani invertora pri  $f_1 = 11 \text{ Hz}$ . Vremenski tok struje motora može se smatrati da je prostoperiodičan. Podržane oscilacije nisu prisutne, pogon je stabilan. Ako se učestanost  $f_1$  poveća na 13 Hz pojavljuju se podržane oscilacije, što je prikazano na Sl. 12. i 13. Pogon postaje nestabilan. Struja motora znatno odstupa od prostoperiodičnog oblika, a struja  $i_i$  počinje da osciluje oko srednje vrednosti. Vremenski tok brzine prati oscilacije struje  $i_i$ . Povećanje učestanosti  $f_1$  do 19 Hz praćeno je podržanim oscilacijama. Pri učestanosti  $f_1 = 19 \text{ Hz}$  podržane oscilacije iščezavaju, a struja motora je prostoperiodična i izostaju oscilacije struje  $i_i$  dok pogon postaje stabilan. Dalje

povećanje učestanosti nije praćeno sa podržanim oscilacijama. Na Sl. 14. i 15. prikazane su struje motora i invertora kada je pogon stabilan. Eksperimentalno je ustanovljeno da je oblast nestabilnosti pogona locirana u opsegu učestanosti napona na motoru od 13 do 17 Hz. Simulacijom vremenskog odziva pogona, za navedeni iznos mrtvog vremena, oblast nestabilnosti se nalazi između učestanosti 14 i 17 Hz.

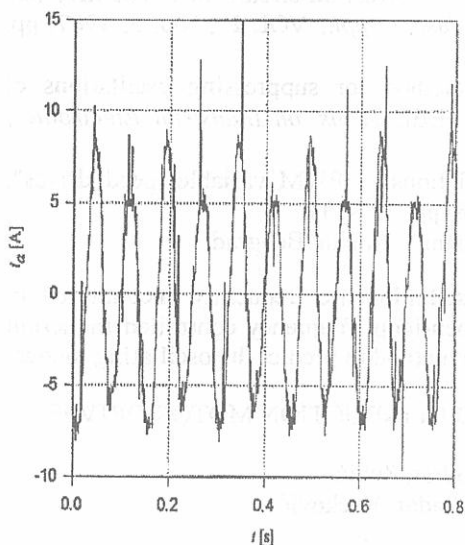
Eksperimentalna ispitivanja pokazuju ispravnost rezultata dobijenih primenom linearizovanog modela pogona i opravdavaju primenu linearizovanog modela pogona za efikasno predviđanje oblasti nestabilnosti.



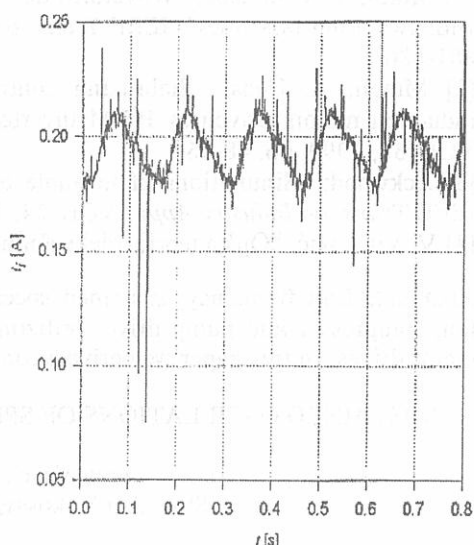
Sl. 10. Struja motora pri  $f_1=11\text{Hz}$



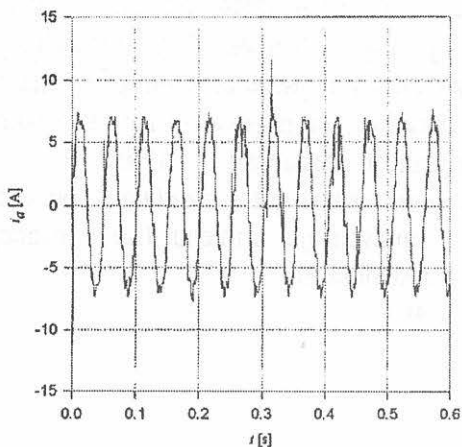
Sl. 11. Struja invertora pri  $f_1=11\text{Hz}$



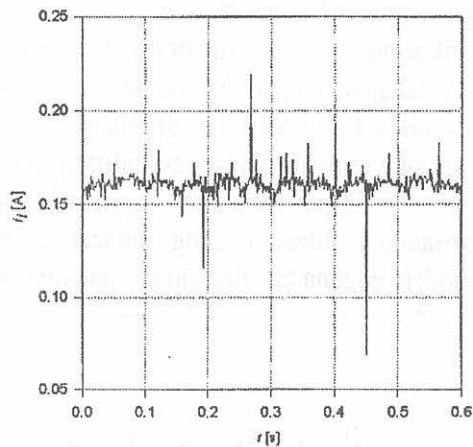
Sl. 12. Struja motora pri  $f_1=13\text{Hz}$



Sl. 13. Struja invertora pri  $f_1=13\text{Hz}$



Sl. 14. Struja motora pri  $f_1 = 19$  Hz



Sl. 15. Struja invertora pri  $f_1 = 19$  Hz

#### 4. ZAKLJUČAK

U radu je izveden linearizovan matematički model pogona asinhronog motora. Uvaženo je diskontinualni režim struje kroz induktivnost filtra. Mrtvo vreme invertora modelovano je u linearizovanom matematičkom modelu pomoću dodatnog otpornika u statorskoj naponskoj jednačini. Pad napona na otporu  $R_\Delta$  ekvivalentira izobličenje napona usled mrtvog vremena. Pomoću linearizovanog modela izvršena je predikcija oblasti nestabilnosti. Promenom mrtvog vremena, prekidačke učestanosti i snage motora locirano je pomeranje oblasti nestabilnosti. Simulacijom nelinearizovanog modela pogona verifikovani su rezultati dobijeni pomoću linearizovanog modela.

#### LITERATURA

- [1] Murai, T. Watanabe; "Waveform distortion, correction circuit for PWM inverters with switching lag-times", *IEEE Trans. on Industry Appl.*, VOL 23, NO. 5, 1987, pp. 881-886.
- [2] Mutoh, A. Ueda; "Stabilizing control method for suppressing oscillations of induction motors driven by PWM inverters", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, VOL. 37, 1990, pp. 48-56.
- [3] Lockwood; "Simulations of unstable oscillations in PWM variable-speed drives", *IEEE Trans. on Industry Appl.*, VOL. 24, 1988, pp. 137-141.
- [4] V. Vučković, "Opšta teorija električnih mašina", Nauka, Beograd.

**Abstract:** Low-frequency, sustained speed oscillation are frequently encountered in fan, compressor and pump drives utilizing open-loop, frequency controlled induction motor drives. In this paper we derive a concise method to predict the oscillating modes.

#### SUSTAINED OSCILLATIONS OF SPEED IN INDUCTION MOTOR DRIVES

Veran Vasić, Miodrag Zubić  
Slobodan Vukosavić, Vladan Vučković