

MATEMATIČKI MODEL POKRETANJA ELEKTROMOTORNIH POGONA MLINOVA U INDUSTRIJI CEMENTA

MATHEMATICAL MODEL FOR START-UP OF MILLS IN CEMENT INDUSTRY DRIVEN BY ELECTRIC MOTOR

Muhamed Ramić¹, Asim Hodžić², Mensur Kasumović³

Sažetak: U radu je ukratko opisano postrojenje mlina cementa, te je postavljen matematički model asinhronog dvokaveznog motora koji se najčešće koristi za direktno pokretanje mlinova u industriji cementa. Osnovni razlog za njihovu primjenu je to što mogu postići relativno veliki polazni moment pri maloj struji pokretanja. Na bazi kreiranog računarskog programa je za konkretne podatke o asinhronim dvokaveznim motorima, iz Tvornice cementa Kakanj, urađena simulacija pokretanja. Razvijeni matematički i računarski alati omogućavaju uspostavljanje određenih kriterijuma za izbor vrste pogonskog motora i ostalih komponenti elektromotornih pogona (EMP) mlinova u industriji cementa.

Ključne riječi: elektromotorni pogon, asinhroni dvokavezni motor, matematički model, mlin, industrija cementa.

Abstract: In this work presents a cement mill plant and a mathematical model of a two-caged induction motor, mostly used for the start-up of mills in the cement industry. The main reason for their implementation is their capacity to achieve a relatively large starting torque at low start-up current. In the particular case, simulation of operation of induction two-caged motors installed at the Cement factory in Kakanj has been made using a custom-made software. The developed mathematical and computer tools enable the establishment of certain criterions to be used for selecting the motor type and other components of the electric motor drive (EMD) for mills in the cement industry.

Keywords: electric motor drive, two-caged induction motor, mathematical model, mill, cement industry.

UVOD

Posljednjih godina problematika povećanja energetske efikasnosti i stabilnosti u radu elektromotornih pogona zbog porasta cijena električne energije sve više dobiva na aktuelnosti, tako da mnogi problemi o kojima ranije nije vođeno računa sada izlaze u prvi plan. Pored toga, prelazak privrede na model tržišne ekonomije nameće potrebu da se što je moguće više smanje troškovi proizvodnje, kako bi se postigla konkurentnost proizvoda na tržištu.

Smanjenje troškova proizvodnje u mnogim industrijskim granama moguće je ostvariti preko osavremenjavanja tehnoloških procesa, podizanja nivoa automatizacije pogona i primjene savremenih uređaja energetske elektronike, te savremenih metoda upravljanja i zaštite. Za povećanje efikasnosti i stabilnosti elektromotornih pogona s asinhronim motorima, u praksi se primjenjuju različita tehnička rješenja koja se značajno razlikuju kako po

stepenu automatizacije pogona, tako i po uticaju na kvalitet napona napajanja. U takvoj situaciji, uz veliku reklamu koja neizbježno prati plasman svih tipova uređaja i koja često nije u srazmjeri sa rezultatima koji se ostvaruju njihovom primjenom, korisniku nije jednostavno da realno procijeni da li postoji opravdanost primjene određenog tehničkog rešenja ili ne.

U zavisnosti od radnih mehanizama, uslova rada elektromotornog pogona i slično, pogonski asinhroni elektromotori mogu biti sa kaveznim ili tzv. kratkospojnim rotorom (kliznokolutni asinhroni motori). Gdje će se upotrijebiti prvi a gdje drugi tip asinhronog motora zavisi od mnoštva faktora, a najznačajniji faktor je način i težina pokretanja pogona, odnosno radnog mehanizma.

Kako je već poznato konverzija električne energije u mehaničku u elektromotoru vrši se u samom rotoru. Zato je taj dio mašine posebno izložen kako mehaničkim, tako i termičkim naprezanjima. Ova naprezanja nisu toliko opasna kod lakih pogona, ali kod teških pogona ova naprezanja mogu izazvati jako velika oštećenja na samom rotoru elektromotora [1]. To je posebno izraženo kod kaveznih asinhronih elektromotora. Zbog toga će u radu biti obrađena problematika pokretanja mlinova u cementnoj industriji, posebno mlinova cementa i mlinova

¹ "Deling" d.o.o., Tuzla, Bosna i Hercegovina

² Fakultet elektrotehnike, Tuzla, Bosna i Hercegovina

³ Fakultet elektrotehnike, Tuzla, Bosna i Hercegovina
muhamed@deling.ba; asim.hodzic@untz.ba;
mensur.kasumovic@untz.ba

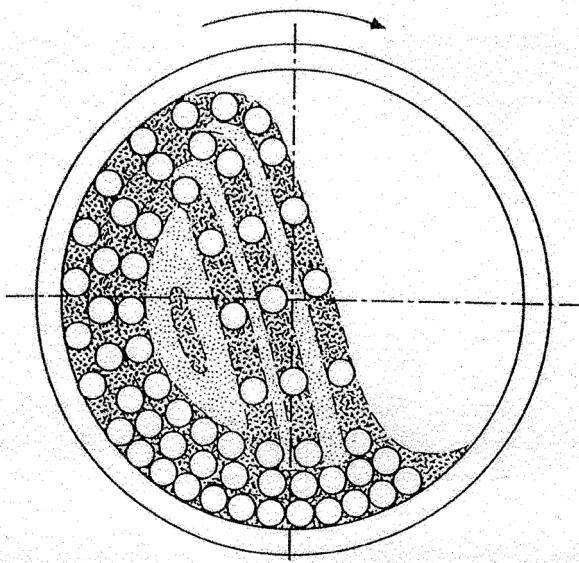
Rad dostavljen: juni 2013. Rad prihvaćen: decembar 2013.

sirovine. To podrazumijeva prikaz promjene parametara pogonskog motora kod uključenja na mrežu.

Dvokavezni asinhroni motori su veoma rijetko predmet numeričke analize, u najvećoj mjeri zbog poteškoća pri određivanju parametara matematičkog modela. Iz tog razloga u radu je definiran matematički model i kreiran računarski program za izračunavanje svih relevantnih i uticajnih parametara koji karakteriziraju dinamičko stanje EMP. Numerički proračun je izvršen za konkretne podatke i to prema vrsti pogonskih motora. Razrađene matematičke procedure i kreirani modeli za simulaciju pokretanja EMP se uz odgovarajuće izmjene mogu primijeniti za razne slučajeve analize rada i pogona s asinhronim motorima.

1. OPIS POSTROJENJA MLINA CEMENTA

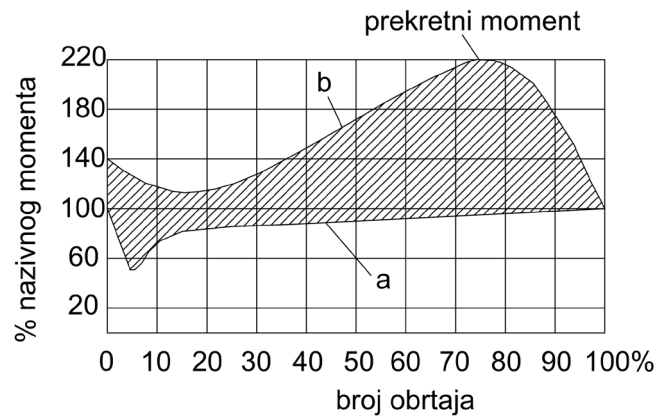
Mlinovi cementa uobičajeno spadaju u grupu cijevnih mlinova i glavni su uređaji postrojenja za mljevenje u proizvodnji cementa. Mlin cementa predstavlja jedan rotirajući čelični cilindar u kome se usitnjavanje događa kretanjem tijela za mljevenje (kugli). Obrtanjem cilindra mlina podiže se gomila kugli i materijala za mljevenje na takvu visinu kako bi se dobilo optimalno mljevenje. Mljevenje se vrši udarcima i trenjem između tijela za mljevenje i plašta mlina, što je shematski predstavljeno Slikom 1.



Slika 1: Shematski prikaz kretanja materijala u mlinu sa kuglama

2. ELEKTROMOTORNI POGONI MLINOVA

Radni mehanizam EMP mlina cementa ima približno centrifugalnu karakteristiku momenta tereta u zavisnosti od brzine vrtnje, kao što je prikazano na Slici 2.



Slika 2: Mehanička karakteristika
a) mlina b) pogonskog motora

2.1. Pogonski motori

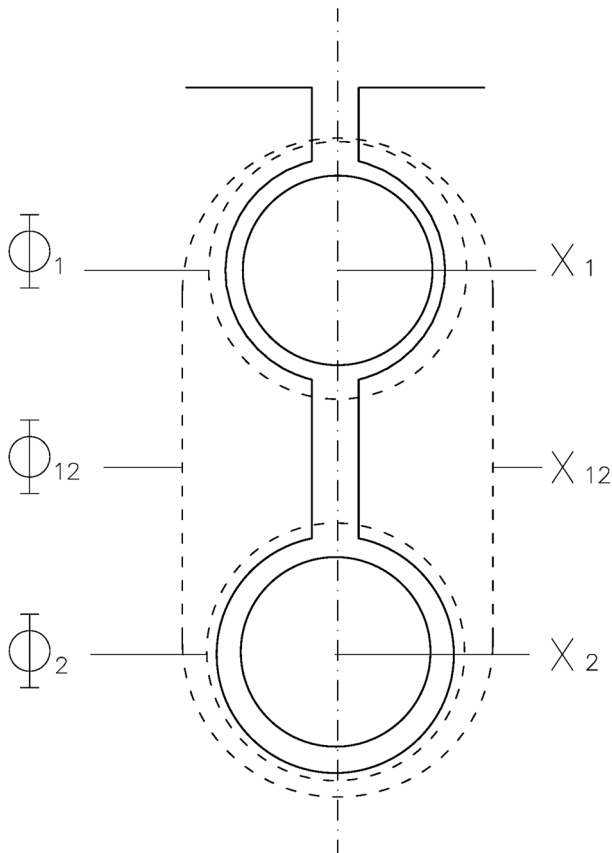
Za pogon mlinova u industriji cementa, koji se zalijeću direktno pod punim opterećenjem, koriste se asinhroni motori i to uglavnom asinhroni motori s namotanim rotorom (kliznokolutni motori) i asinhroni dvokavezni motori. U režimu rada elektromotornog pogona veoma je bitan proces pokretanja, gdje motor mora razviti dovoljan potezni moment da savlada moment tereta i da obezbijedi energiju za savladavanje ukupnog momenta inercije pogona. Kod asinhronih kliznokolutnih motora potezni moment može da dostigne i $200\% M_n$, dok je struja pokretanja $(1,5-2,0) \cdot I_n$ [1].

Također, asinhroni dvokavezni motori mogu postići relativno veliki polazni moment uz malu polaznu struju. Međutim, karakteristika momenta $M=M(n)$ asinhronog dvokaveznog motora posjeduje tzv. „sedlo” u području od brzine jednake nuli do brzine koja odgovara prekretnom momentu. Postojanje „sedla” na karakteristici momenta može u određenim slučajevima dovesti do tzv. „zapinjanja” motora u toku zaleta pri brzini vrtnje koja je znatno manja od nominalne brzine vrtnje. S obzirom na karakteristike momenta tereta kod mlinova cementa, poželjno bi bilo da pogonski motor ima karakteristiku momenta sa što manje izraženim sedlom, što veći polazni moment i što manju polaznu struju. Osim naprijed navedenog treba istaći da se svi konstruktivni elementi dimenzionišu na maksimalno naprezanje koje se pojavljuje u toku rada pogona.

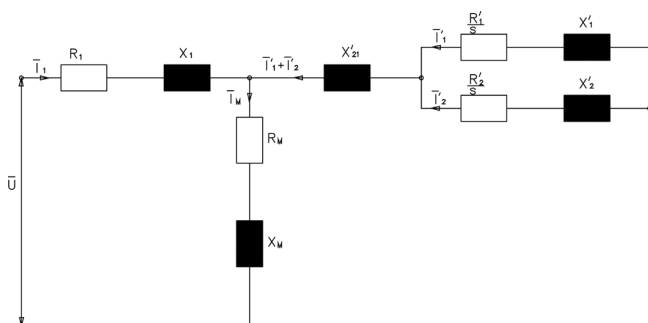
2.2. Zamjenska shema dvokaveznog asinhronog motora

Zamjenska shema rotora dvokaveznog asinhronog motora može se dobiti na osnovu razmatranja rasipnih polja u žlijebu rotora motora, što je prikazano na Slici 3. Fluks rasipanja Φ_{12} obuhvata konture struja kaveza „1” i „2” i određen je geometrijskom sumom tih struja. Tom rasipnom fluksu odgovara induktivni otpor rasipanja X_{12} . Fluks rasipanja Φ_2 obuhvata kavez „2” i određen je strujom u tom kavezu i njemu odgovara induktivni otpor rasi-

panja X_2 . Fluks rasipanja Φ_1 obuhvata samo kavez "1" i određen je strujom u tom kavezu i njemu odgovara induktivni otpor rasipanja X_1 .



Slika 3: Fluks rasipanja u žlijebu asinhronog dvokaveznog motora



Slika 4: Zamjenska shema asinhronog dvokaveznog motora

Na osnovu naponskih jednačina rotora (vanjski, unutrašnji i zamjenska jednačina oba kaveza) [4]:

$$0 = \bar{E}' + \bar{I}_2 \cdot j \cdot X'_{21} + \bar{I}_1' \cdot \left(\frac{R'_1}{s} + j \cdot X'_1 \right)$$

$$0 = \bar{E}' + \bar{I}_1' \cdot j \cdot X'_{12} + \bar{I}_2' \cdot \left(\frac{R'_2}{s} + j \cdot X'_2 \right)$$

$$0 = \bar{E}' + (\bar{I}_1' + \bar{I}_2') \cdot (R'_R + j \cdot X'_R)$$

(1)

te korištenjem zamjenske sheme (Slika 4) i uvažavajući relacije navedene u jednačini (1) može se zapisati izraz za impedansu rotorskog kola:

$$\bar{Z}'_2(s) = \frac{(R_2 + j \cdot s \cdot X_2) \cdot [R_1 + j \cdot s \cdot (X_1 - X_{12})]}{R_1 + R_2 + j \cdot s \cdot (X_1 + X_2 - 2 \cdot X_{12})} + \frac{j \cdot s \cdot X_{12} \cdot [R_2 + j \cdot s \cdot (X_2 - X_{12})]}{R_1 + R_2 + j \cdot s \cdot (X_1 + X_2 - 2 \cdot X_{12})} \quad (2)$$

pri čemu je:

$X'_{12} = X'_{21}$ – induktivni otpor uzajmne indukcije kaveza "1" i kaveza "2"

X'_1, X'_2 – induktivni otpor kaveza "1" i kaveza "2"

R'_1, R'_2 – aktivni otpor kaveza "1" i kaveza "2"

X'_R, R'_R – ekvivalentni induktivni i aktivni otpor kaveza "1" i kaveza "2"

$\bar{Z}'_2(s)$ – impedansa rotorskog kola

Svi otpori i struje, kao i elektromagnetna sila su svedene veličine na stranu statora, preko sljedećih koeficijenata:

– koeficijent svođenja otpora

$$k = \frac{12 \cdot N_1^2 \cdot k_{n1}^2}{Z_2}$$

– koeficijent svođenja struja

$$k = \frac{6 \cdot N_1 \cdot k_{n1}}{Z_2}$$

– koeficijent svođenja elektromotorne sile

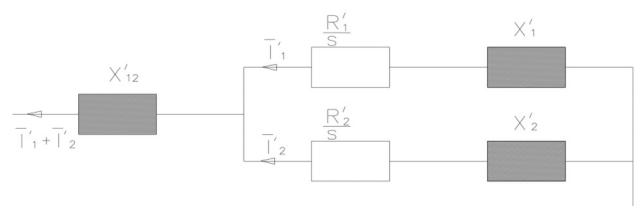
$$k = 2 \cdot N_1 \cdot k_{n1}$$

Transformišući jednačinu (1) jednačine (2) poprimaju sljedeći oblik:

$$0 = \bar{E}' + (\bar{I}_1' + \bar{I}_2') \cdot j \cdot X'_{12} + \bar{I}_1' \cdot \left(\frac{R'_1}{s} + j \cdot X'_1 \right) \quad (3)$$

$$0 = \bar{E}' + (\bar{I}_1' + \bar{I}_2') \cdot j \cdot X'_{12} + \bar{I}_2' \cdot \left(\frac{R'_2}{s} + j \cdot X'_2 \right) \quad (4)$$

Jednačinama (1), (3) i (4) odgovara zamjenska shema kola rotora, prikazana na Slici 5.



Slika 5: Zamjenska shema kola rotora dvokaveznog asinhronog motora

Na osnovu zamjenske sheme (Slika 5) i uvažavajući relacije navedene u jednačini (1) može se zapisati izraz za impedansu rotorskog kola:

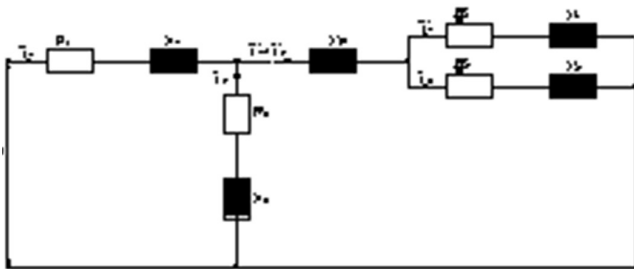
$$\bar{Z}'_2(s) = \frac{(R_2 + j \cdot s \cdot X_2) \cdot [R_1 + j \cdot s \cdot (X_1 - X_{12})]}{R_1 + R_2 + j \cdot s \cdot (X_1 + X_2 - 2 \cdot X_{12})} + \frac{j \cdot s \cdot X_{12} \cdot [R_2 + j \cdot s \cdot (X_2 - X_{12})]}{R_1 + R_2 + j \cdot s \cdot (X_1 + X_2 - 2 \cdot X_{12})} \quad (5)$$

Razdvajajući izraz (5) na realni i imaginarni dio dobiva se:

$$R_R(s) = \text{Re}\{\bar{Z}'_2(s)\}$$

$$X_R(s) = X'_{21} + \text{Im}\{\bar{Z}'_2(s)\} \quad (6)$$

Izrazi (6) su dosta složeni za analizu uticaja elektromagnetnih parametara rotora na vrijednost impedance rotorskog kola, ali je uz pomoć računarskih mašina tu analizu moguće uspješno provesti. Dalje je moguće predstaviti zamjensku T-shemu dvokaveznog asinhronog motora prikazanu na Slici 6:



Slika 6: Zamjenska T-shema asinhronog dvokaveznog motora

3. MATEMATIČKI MODEL ASINHRONOG DVOKAVEZNOG MOTORA

Na bazi jednačina koje prikazuju asinhronu mašinu u formi prostora stanja [3, 4], korištenjem programskog paketa MATLAB verzija 7.6.0 (R2008a) kreiran je dinamički matematički model, pomoću MATLAB-ovog paketa SIMULINK, koji je korišten za simulaciju zalijetanja dvokaveznog asinhronog motora (Prilog – Slika 11). Kao polazna osnova korišten je skup diferencijalnih jednačina i algebarskih jednačina koji opisuje rad asinhronne mašine u stacionarnom stanju i u prelaznim režimima, a u skladu sa zamjenskom shemom asinhronog motora, bazirane na vektorskoj analizi asinhronne mašine [2]. Za simulaciju zalijetanja uzeti su konkretni podaci o asinhronom dvokaveznom motoru u pogonu mlina sirovine u Tvornici cementa Kakanj:

- proizvođač *Ganz Transelektro 2004. godina*,
- nominalna snaga *1500 kW*,
- nominalna brzina *990 %/min*,
- nominalni napon *6000 V*,
- nominalna frekvencija *50 Hz*,
- nominalna struja statora *172 A*,

- nominalni moment *M_n=14460 Nm*,
- moment inercije rotora *J_r=140 kg m²*,
- *cosφ=0,87*,
- stepen korisnog dejstva *η=0,963*,
- otpor po fazi rotora *0,113 Ω* (sveden na statorsku stranu),
- masa bakra statora *545 kg*,
- masa bakra rotora (vanjski/unutrašnji kavez) *205/120 kg*.

Model asinhronog dvokaveznog motora formiran je u okviru Simulink paketa „*SimPowerSystems*“ korištenjem bloka „*Asynchronous machine*“. Blok za napajanje formiran je u okviru Simulink paketa „*SimPowerSystems*“ korištenjem bloka „*Three-phase programmable Voltage Source*“. Moment tereta je prikazan u obliku tabele (*M_{t,n}*) te je pomoću Simulink bloka „*Lookup Table*“ izvršena linearna aproksimacija momenta tereta u funkciji brzine *M_t = f_(n)*. S obzirom da je veoma bitno voditi računa o opterećenju napojne mreže motora u toku procesa pokretanja, izvršeno je formiranje Simulink bloka „*Distributed Parameter Line*“ koji je u obzir uzeo parametre napojnog kabla (aktivni, induktivni otpor i kapacitet voda) od napojne transformatorske stanice do motora, te također parametre napojnih transformatora u *TS 110/6kV Cementara* (aktivni i induktivni otpor transformatora).

Kreirani model za simulaciju pokretanja EMP daje široke mogućnosti za analizu niza električnih i mehaničkih veličina (u funkciji realnog vremena) za vrijeme samog prelaznog režima procesa pokretanja elektromotornog pogona.

Na osnovu zamjenske T-sheme asinhronog dvokaveznog motora, izvršen je proračun parametara motora potrebnih za simulaciju pokretanja EMP [2].

Standardni podaci koje dostavljaju proizvođači motora ne sadrže podatke za međukupljinu gornjeg i donjeg namota, te induktivni otpor donjeg kaveza. Na osnovu standardnih podataka koje dostavljaju proizvođači motora, te na osnovu podataka o poteznoj i nominalnoj struji, izvršen je proračun ekvivalentnog aktivnog i induktivnog otpora kompletnog rotora (oba kaveza). Proračun je izvršen na bazi aproksimacije mehaničke karakteristike dostavljene od strane proizvođača.

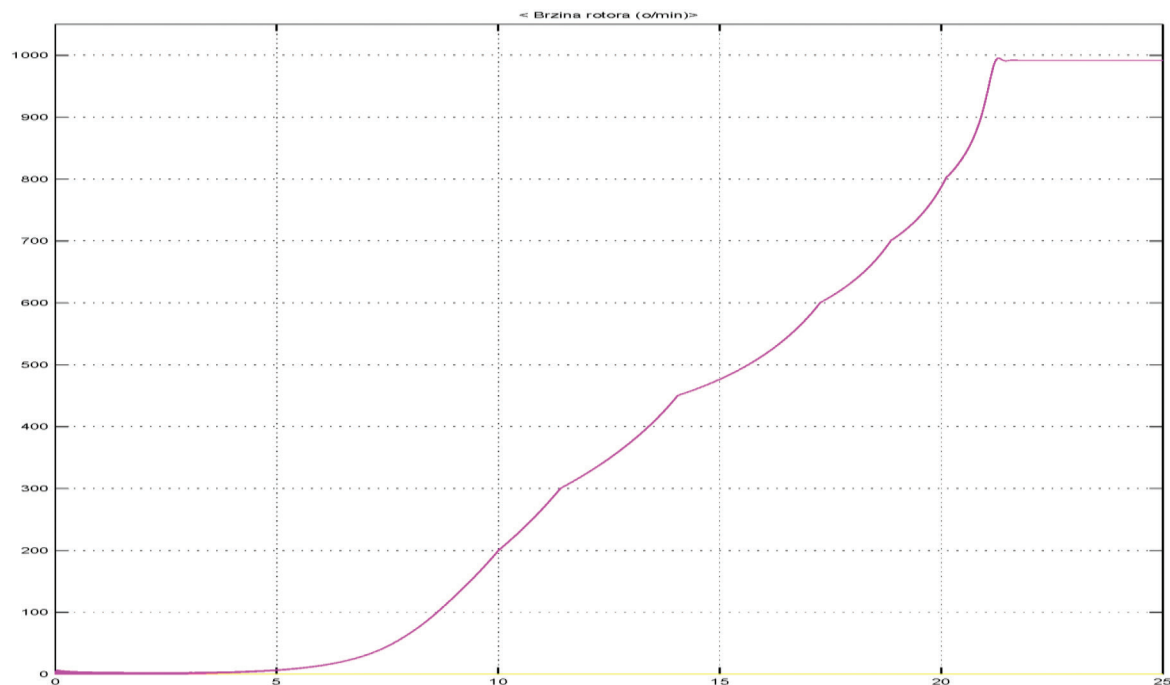
Kao rezultat proračuna se dobije:

- vrijednost induktivnog otpora gornjeg kaveza (preračunata na stator)
- $$X'_1 = 0.00005 \, \Omega,$$
- vrijednost međukupljinu gornjeg i donjeg kaveza (preračunata na stator)
- $$X'_{12} = 0.15 \, \Omega,$$
- ekvivalentni aktivni otpor rotora (sveden na stator) za *s=1*
- $$R'_{r1} = 0.8522 \, \Omega,$$
- ekvivalentni induktivni otpor rotora
- $$X'_r = 2.0800 \, \Omega,$$

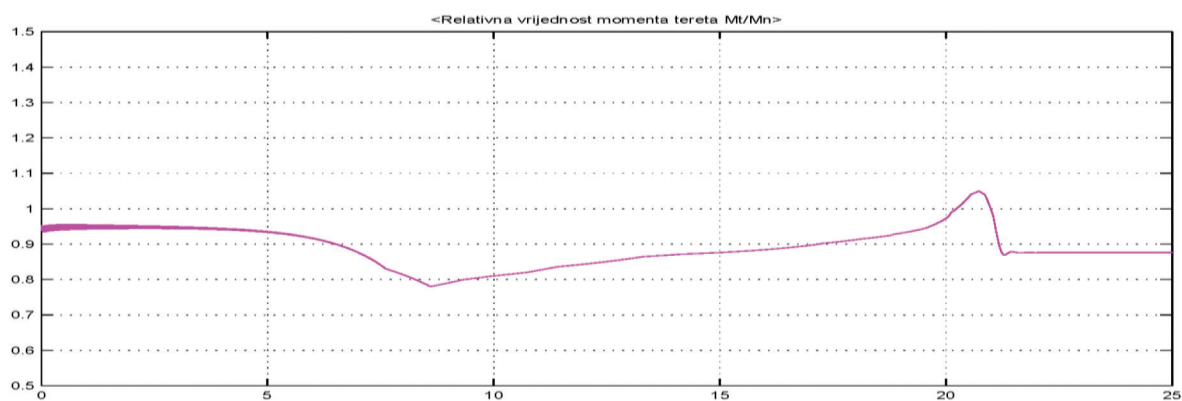
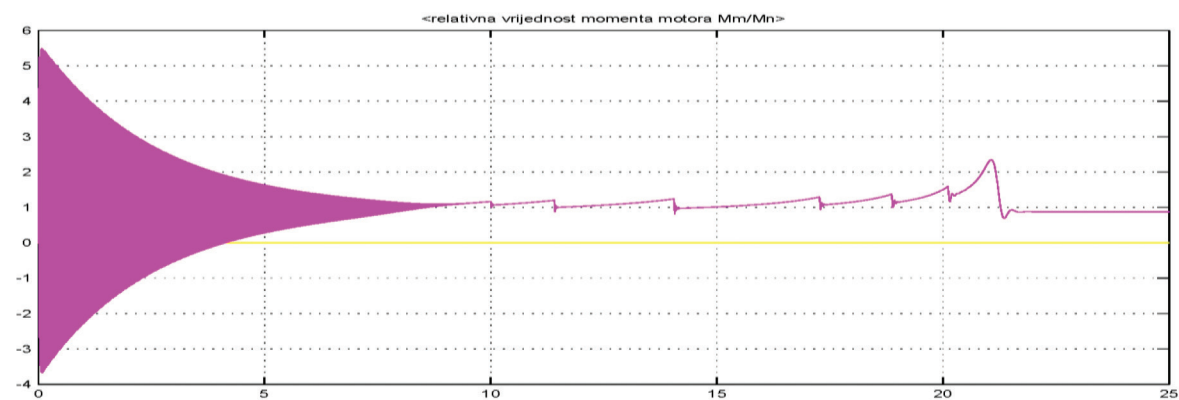
- ekvivalentni aktivni otpor rotora (sveden na stator) za $s = spr$ $X_{rp}' = 1.7710 \Omega$.
- $R_{rp}' = 0.2295 \Omega$,
- ekvivalentni induktivni otpor rotora (sveden na stator) za $s = spr$

4. ANALIZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA

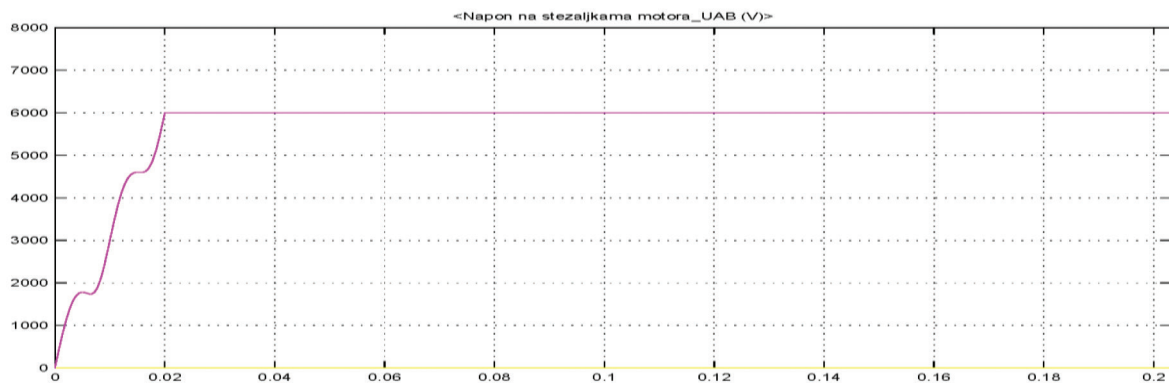
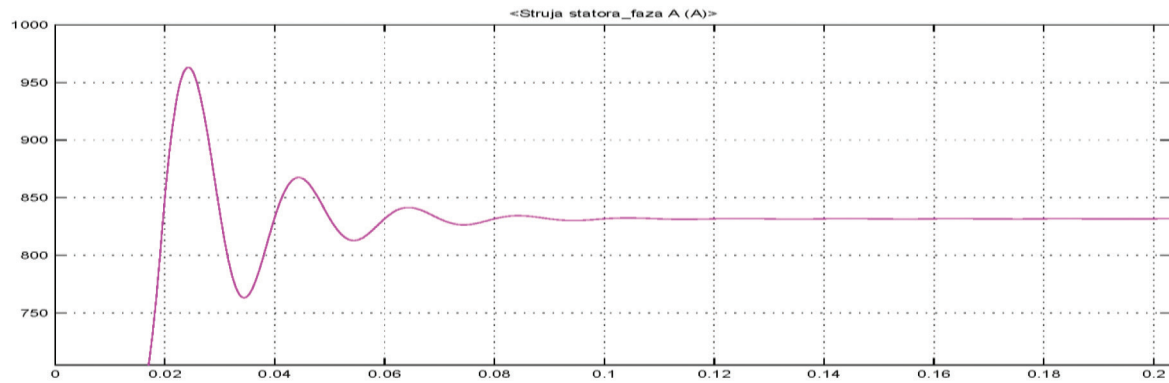
U nastavku su prikazani samo neki od rezultata simulacije.



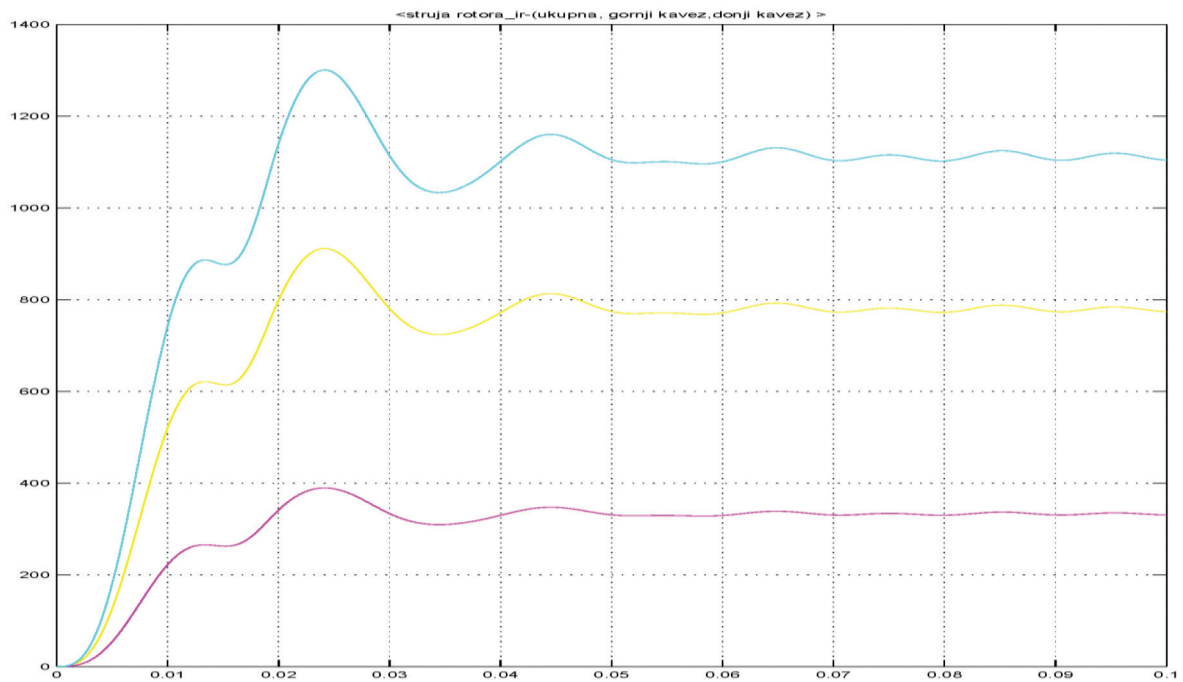
Slika 7: Brzina motora $n(t)$ [min^{-1}]



Slika 8: Relativna vrijednost momenta motora i momenta tereta: M_m/M_n ; M_t/M_n



Slika 9: Efektivna vrijednost struje statora motora i napon na stezaljkama prilikom starta motora (za vrijeme od 0,2s)



Slika 10: Efektivna vrijednost struje rotora $I_r(t)$ [A]
(gornji kavez – gornja linija; oba kaveza – srednja linija; donji kavez – donja linija)

Iz proračuna i simulacije za pogonski motor mlina sirovine i cementa, kada se koristi asinhroni dvokavezni motor, pokazano je da motor s podacima koji su korišteni u proračunu i simulaciji, ne zadovoljava utvrđene tehničke kriterije. Ovo posebno u pogledu kriterija za dozvoljeni pad napona [5]. U konkretnom slučaju, za korištene uslove napajanja, pokazuje se da pad napona u napojnom transformatoru i priključnim kablovima do motora iznosi 21,3%, što je iznad dozvoljene vrijednosti [5]. Kako je kod asinhronog motora moment u funkciji kvadrata napona, tj. $M_m = f(U^2)$, povećani pad napona znatno utiče na smanjenje napona motora i smanjenje momenta motora. Proračun i simulacija pokazuju da motor navedenih karakteristika ne može pokrenuti mlin sirovine pri direktnom pokretanju. Ovo nameće zaključak da je za direktno pokretanje EMP mlina sirovine potreban motor znatno većeg poteznog i prekretnog momenta. Zbog toga je veoma važno provoditi potpunu dinamičku analizu ovakvih teških EMP kako bi se utvrdili potrebni parametri pogonskog motora koji zadovoljavaju utvrđene kriterije.

Pokazuje se veoma važnim da se pri izboru i zamjeni pogonskih motora moraju poznavati uslovi napajanja, te se za konkretne podatke o mlinovima, uvijek mora vršiti detaljna analiza dinamičkog režima pokretanja EMP mlina. Ovo zato što su za svaki konkretan slučaj ovi uslovi različiti, te uobičajeni načini izbora pogonskih motora i uopštavanje načina izbora, mogu dovesti do pogrešnih rezultata i zaključaka koji za posljedicu mogu imati veliku tehničku i ekonomsku štetu.

5. ZAKLJUČAK

Dinamički režimi rada EMP mlinova u industriji cementa sa stanovišta prelaznog procesa predstavljaju za pogonske motore veoma napregnuto stanje. To je zbog toga što se po pravilu radi o asinhronim motorima velike snage. Dinamički režim prije svega, pored vrste pogonskog motora, opredjeljuje vrsta i karakter tereta mlina, ukupni moment inercije sistema i stanje elektroenergetske napojne mreže.

U radu je definiran matematički model i kreiran računarski program za izračunavanje svih relevantnih i uticajnih parametara koji karakteriziraju dinamičko stanje EMP. Numerički proračun je izvršen za konkretne podatke i to prema vrsti pogonskih motora – asinhroni dvokavezni motori.

Kako se radi o pogonskim motorima velike snage standardni podaci koje daju proizvođači motora nisu dovoljni za temeljitu analizu prelaznog procesa. Zbog toga su u ovom radu dati matematički modeli i procedure za utvrđivanje

parametara i kompletiranje podataka o motorima koji su neophodni za analizu prelaznih režima EMP u cjelini.

Također je pokazano da kod direktnog pokretanja EMP mlina s asinhronim dvokaveznim motorom značajan uticaj ima stanje električne mreže, odnosno nedozvoljena vrijednost pada napona u energetsom transformatoru i napojnim vodovima. To je zato što se moment motora smanjuje proporcionalno kvadratu smanjenog napona.

Razvijeni matematički modeli, odnosno interpretacija dinamičkog režima rada EMP prezentirana u ovom radu i dobijeni rezultati omogućavaju uspostavljanje određenih kriterijuma za izbor vrste pogonskog motora i ostalih komponenti EMP mlinova u industriji cementa.

6. LITERATURA

- [1] A. Hodžić: Dinamika elektromotornih pogona – odabrana poglavlja, Univerzitet u Tuzli, Tuzla, 2012.
- [2] J. L. Kirtley Jr.: Analytic design evaluation of induction machines, Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [3] R. Krishnan: Electric Motors Drives, Modeling, Analysis and Control, Prentice Hall, 1998.
- [4] V. Ambrožič: Sodobne regulacije pogonov z izmjeničnimi stroji, Fakulteta za elektrotehniko Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 1996.
- [5] A. Hodžić i saradnici.: Analiza dinamičkog režima rada elektromotornog pogona mlina sirovine i mlinova cementa u Tvornici cementa Kakanj, studija, Fakultet elektrotehnike Univerziteta u Tuzli, Tuzla, 2004.

BIOGRAFIJA

Muhamed Ramić zaposlen je u firmi »Deling« d.o.o. Tuzla. Do danas je obavljao poslove rukovodioca proizvodnje elektro opreme za rudarstvo i industriju, odgovornog inženjera za realizaciju projekata u rekonstrukciji i odražavanju rudarske opreme, na izgradnji i rekonstrukciji objekata elektroenergetskog sistema i sl. Iz oblasti dinamike elektromotornih pogona magistrirao je 2009. godine na Fakultetu elektrotehnike Univerziteta u Tuzli.

Asim Hodžić je zaposlen na Fakultetu elektrotehnike Univerziteta u Tuzli u zvanju redovnog profesora, na užoj naučnoj oblasti "Elektrotehnika i sistemi konverzije energije". Doktorsku disertaciju je odbranio 1998. godine na Fakultetu elektrotehnike i maštinstva Univerziteta u Tuzli. Oblast interesovanja su mu: elektromotorni pogoni (EMP), dinamička prelazna stanja EMP, upravljanje i regulacija EMP, uticaj kvaliteta električne energije na EMP.

Mensur Kasumović zaposlen je na Fakultetu elektrotehnike Univerziteta u Tuzli od 2003. godine. Doktorsku disertaciju iz oblasti primjena energetske elektronike u upravljanju i regulaciji EMP odbranio je 2012. godine na Fakultetu elektrotehnike Univerziteta u Tuzli. Trenutno je u zvanju docenta na užoj naučnoj oblasti "Elektrotehnika i sistemi konverzije energije".

