



## IZBOR ASINHRONOG MOTORA ZA POGON SA NAPONSKO-FREKVENTNIM PRETVARAČEM NA BAZI SIMULACIJE

### AN ASYNCHRONOUS MOTOR CHOICE FOR THE SIMULATION BASED VOLTAGE-FREQUENCY CONVERTER DRIVE

J. Radaković, A. Nad\*

**Kratak sadržaj:** *Opisan je matematički model trofaznog kaveznog asinhronog motora napajanog iz naponsko-frekventnog pretvarača. Na bazi simulacije na računaru proračunate su dinamičke karakteristike za dva kavezna asinhrona motora projektovana za intermitentni pogon-režim S5. Na osnovu proračunatih promenljivih stanja motora analizirani su uslovi i veličine bitne za izbor asinhronog motora i naponsko-frekventnog pretvarača za pogone koji zahtevaju radni režim S5.*

**Ključne reči:** *izbor motora, frekventni pretvarač, simulacija*

**Abstract:** *A voltage-frequency converter supplied three-phase asynchronous motor mathematical model is described. The simulation based computer calculation for two cage asynchronous motors designed for work in intermitent drive-schedule S5 is performed. The motor state variables based calculations on essential conditions and values from the choise of the asynchronous motor and the voltage-frequency converter for the demanding work schedule S5 drives are analyzed.*

**Keywords:** *the choice of the motor, frequency converter, simulation*

#### UVOD

U današnje vreme se postavljaju sve veći zahtevi u pogledu dinamičkog ponašanja na elektromotorne pogone. Da bi se što bolje udovoljio tim zahtevima, projektant mora poznavati i uzeti u obzir dinamičke karakteristike pogona pri izboru motora i pripadajućeg pretvarača. Dinamičko ponašanje pogona je opisano diferencijalnim jednačinama. Te jednačine su obično nelinearnog tipa i/ili su većeg reda, tako da ne postoji mogućnost eksplicitnog rešavanja. Mora se zbog toga pribegavati nekim od postojećih numeričkih i iterativnih postupaka za rešavanje diferencijalnih jednačina [L.3].

Rešavanje diferencijalnih jednačina pomoću ovakvih numeričkih postupaka je izvodljivo samo uz primenu digitalnih računara. U tu svrhu u ovom radu je prvo postavljen matematički model

\* Mr Jovan Radaković, dipl.ing. Atila Nad, SEVER ERA-Drive, Subotica

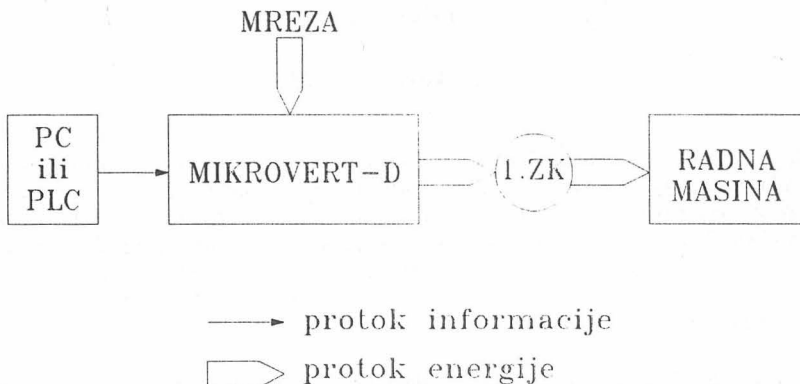
pogona sa kaveznim asinhronim motorom i naponsko-frekventnim pretvaračem, koji je u zadnje vreme postao dominantan u industrijskim i drugim postrojenjima. Kao primer koji ukazuje na potrebu korišćenja rezultata simulacije već u fazi projektovanja uzet je problem izbora asinhronog motora u pogonima za brze liftove (brzina vožnje  $v > 2$  m/s) [ L.2].

Simulacijom na digitalnom računaru proračunate su dinamičke karakteristike dva kavezna asinhrona motora i pripadajuća pretvarača iz SEVER-ovog programa. Analizom veličina bitnih za izbor asinhronih motora i pretvarača, te poredenjem dinamičkih karakteristika date su smernice za izbor asinhronog motora i pretvarača regulisanog elektromotornog pogona lifta.

## 1. MODEL ZA SIMULACIJU POGONA

### 1.1. Struktura pogona

Ispitivani pogon se sastoji od statičkog poluprovodničkog pretvarača iz SEVER-ove familije MIKROVERT\_D, asinhronog kaveznog motora iz familije 1.ZK, radnog mehanizma i upravljačkog uređaja (PC ili PLC) (Slika 1).



Sl. 1. Strukturalni blok dijagram ispitivanog regulisanog elektromotornog pogona.

Nadređeni upravljački sistem je zaslužan za generisanje zadatog profila brzine obrtanja. Oblik profila uglavnom zavisi od prirode radnog mehanizma odnosno tehnološkog procesa u kome se dati pogon nalazi i primenjenog kriterijuma za optimiranje dinamičkog ponašanja pogona. U praksi su najčešće u primeni dva: linearni - odgovara optimumu po minimalnom vremenu i eksponencijalni - odgovara optimumu po minimalnoj energiji [ L.4 ].

Da bi se realizovala zadana karakteristika vožnje lifta, pogonski asinhroni motor se mora napajati iz pretvarača napona i frekvencije. Naponsko - frekventni pretvarač zadani oblik profila brzine pretvara u odgovarajuću promenu napona i frekvencije. Napon i frekvencija asinhronog motora menjaju se do nazivne brzine obrtanja uz konstantan odnos napona i frekvencije, a iznad nominalne frekvencije uz konstantan napon i promenljivu frekvenciju.

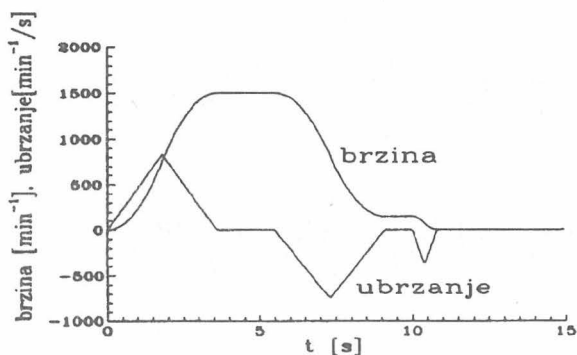
### 1.2. Režim rada sa ulaznim podacima

Podaci pogona, koji su definisani u skladu sa propisima za istraživani regulisani elektromotorni pogon konkretnog lifta, su prikazani u tabeli 1. Sve veličine preračunate su na pogonsku stranu motora. Kod liftova moment tereta, koji predstavlja radni mehanizam, je aktivnog tipa. To znači da je konstantnog iznosa i smera bez obzira na iznos i smer brzine obrtanja [L.5].

Tabela 1. Ulazni podaci elektromotornog pogona lifta.

broj uključenja na sat ( $T_c$ - ciklus ponavljanja)	240 (15s)
trajanje opterećenja	60%
moment tereta, svedeni	200 Nm
moment inercije tereta, svedeni	0.05 kgm <sup>2</sup>
promena brzine obrtanja motora	0-1500 min <sup>-1</sup> □

Zadana karakteristika vožnje lifta odnosno željena promena brzine obrtanja pogonskog motora i pripadajuća karakteristika ubrzanja prikazana su na slici 2. Primenjeni profil je eksponencijalnog oblika, što odgovara kriterijumu optimuma po minimalnom utrošku energije [L.4]. Osim toga kod ovakvog oblika profila brzine obrtanja, ubrzanje, a samim tim i moment motora, raste linearno (nema skokovite promene ubrzanja). To vodi ka manjem trošenju radnog mehanizma, udobnijoj vožnji liftom i udobnijem režimu opterećivanja mreže.



Slika 2. Karakteristika vožnje lifta.

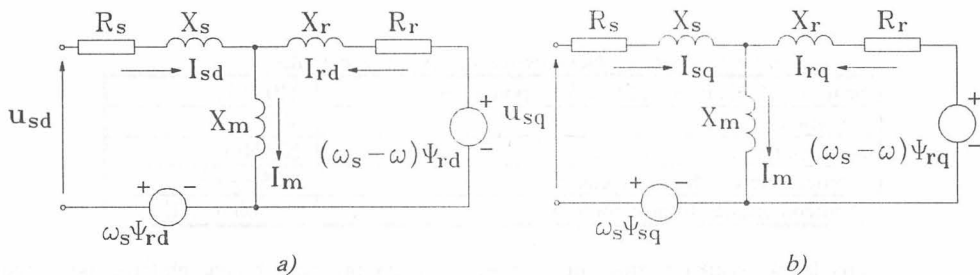
Karakteristika brzine obrtanja motora zadaje se po odsečcima u proračunu (ubrzanje, vožnja, kočenje, pristajanje sl. 1.) i u matematičkom modelu se po želji (preko ulaznih podataka) mogu menjati iznosi brzine vožnje, brzine pristajanja kao i ubrzanja u režimu zaleta odnosno kočenja.

Izvorni ulazni podaci - intermitencija 60% - u proračunu su promenjeni tako da je trajanje opterećenja produženo za 1.5 s (uz zadani teret), koliko je predviđeno vreme pristajanja lifta na tačnu poziciju na stanici.

### 1.3. Opis modela simulacije

Za proračun dinamičkog ponašanja pogonskog asinhronog motora korišćen je matematički model kaveznog asinhronog motora u transformisanom "d,q" sistemu uz zanemarenje zasićenja u gvožđu, te zanemarenje potiskivanja struje u namotajima.

Prema ekvivalentnoj šemi na sl. 3. motor je opisan sa šest diferencijalnih jednačina prvog reda [L.1]:



Sl. 3. Ekvivalentna šema trofaznog asinhronog motora za nestacionarna stanja:

a) "d" - osa; b) "q" - osa.

$$\frac{d\Psi_{sd}}{dt} = \omega_s \cdot \Psi_{sq} - \frac{1}{T'_s} \Psi_{sd} + \frac{k_r}{T'_s} \Psi_{rd} + u_{rd} \quad (1)$$

$$\frac{d\Psi_{sq}}{dt} = -\omega_s \cdot \Psi_{sd} - \frac{1}{T'_s} \Psi_{sq} + \frac{k_r}{T'_s} \Psi_{rq} + u_{sq} \quad (2)$$

$$\frac{d\Psi_{rd}}{dt} = (\omega_s - \omega) \cdot \Psi_{rq} - \frac{1}{T'_r} \Psi_{rd} + \frac{k_r}{T'_r} \Psi_{sd} \quad (3)$$

$$\frac{d\Psi_{rq}}{dt} = -(\omega_s - \omega) \cdot \Psi_{rd} - \frac{1}{T'_r} \Psi_{rq} + \frac{k_r}{T'_r} \Psi_{sq} \quad (4)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_\Sigma} (m_e - m_t) \quad (5)$$

$$m_e = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{k_s}{L_s} \cdot (\Psi_{sq} \cdot \Psi_{rd} - \Psi_{sd} \cdot \Psi_{rq}) \quad (6)$$

Pri čemu su:

$$k_s = \frac{L_m}{L_s}; \quad k_r = \frac{L_m}{L_r}; \quad L'_s = L_s \cdot (1 - k_s \cdot k_r); \quad L'_r = L_r \cdot (1 - k_s \cdot k_r); \quad T'_s = \frac{L'_s}{R_s};$$

$$T'_r = \frac{L'_r}{R_r}.$$

U korišćenom matematičkom modelu ulazne veličine su "d" i "q" komponente napona napajanja statora, frekvencija napona statora i moment tereta. Izlazne veličine modela, koje su ujedno i promenljive stanja u modelu, su "d" i "q" komponente statorskog i rotorskog fluksa, te ugaona brzina obrtanja motora. Iz ovih veličina se preslikavanjem određuju veličine potrebne za proračun i izbor motora, elektromagnetni moment motora, električna snaga na stezaljkama statora, snaga na vratilu motora i druge potrebne veličine:

$$p_e = u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q \quad \text{- električna snaga uzeta iz mreže}$$

$$p_m = m_t \cdot \omega \quad \text{- mehanička snaga na vratilu motora}$$

$$e = \int_0^T p_e \cdot dt \quad \text{- ukupna potrošena električna energija}$$

$$m = \int_0^T p_m \cdot dt \quad \text{- ukupna potrošena mehanička energija}$$

$$\% = \frac{W_m}{W_e} \cdot 100 \quad \text{- stepen iskorišćenja.}$$

Za rešavanje diferencijalnih i algebarskih jednačina matematičkog modela korišćena je metoda Runge-Kutta četvrtog reda s korakom iteracije 0.5 ms.

## 2. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Istraživanje, čiji su rezultati prikazani u ovom radu, sprovedeno je za dva asinhrona motora posebno konstruisana za intermitentni režim rada i napajanje iz pretvarača napona i frekvencije.

### 2.1. Proračun dinamičkih karakteristika asinhronih motora

Podaci navedenih motora, s kojima su izvedeni proračuni dinamičkih karakteristika, su prikazani u tabeli 2.

Tabela 2. Podaci ispitivanih asinhronih motora.

tip motora	1.ZK 225 M-6	1.ZK 225 S-4
sprega motora	trougao	trougao
$P_n$	30 kW	37 kW
$U_n$	380 V□	380 V
$f_n$	50 Hz	50 Hz
$I_n$	60 A	71 A
$n_n$	975 min <sup>-1</sup>	1470 min <sup>-1</sup>
$M_n$	294 Nm	240 Nm
$J_{mot}$	0.656 kgm <sup>2</sup>	0.38 kgm <sup>2</sup>
$R_s$	0.306 Ω	0.236 Ω
$R_r$	0.210 Ω	0.194 Ω
$X_m$	16.067 Ω	23.134 Ω
$X_s$	16.62 Ω	23.721 Ω
$X_r$	17.3 Ω	24.628 Ω

U proračunu dinamičkih karakteristika asinhronih motora pretpostavljeno je napajanje motora promenljivim naponom i frekvencijom sinusnog oblika (simulacija prvog harmonika nesinusnog napajanja). Napon i frekvencija asinhronog motora menjaju se od nule do nazivne brzine obrtanja uz konstantan napon i promenljivu frekvenciju.

Deo rezultata proračuna, uz navedene uslove, prikazan je na Sl. 4. - Sl. 4.a.1. do 4.a.5. za motor tipa 1ZK 225 M-6 i Sl. 4.b.1. do 4.b.5. za motor tipa 1.ZK 225 S-4. Na dijagramima su prikazane, za definisani ciklus rada lifta, veličine na osnovu kojih se može doneti, na nivou projektovanja, odluka o izboru motora za pogon lifta. Jasno je da dobijene rezultate treba proveriti merenjem na objektu.

Iz literature je poznato da je zagrevanje motora u intermitentnom radu manje ako je iznos srednje efektivne vrednosti struje manji od nazivne efektivne struje motora. Srednja efektivna vrednost struje se računa po izrazu:

$$I_{se} = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} |i_s| \cdot dt,$$

$$|i_s| = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$$

gde je  $|i_s|$  - iznos vektora struje statora asinhronog motora, a  $T_c$  vreme trajanja ciklusa intermitentnog režima rada.

Na Sl. 4.a.3. i 4.b.3. prikazani su elektromagnetni moment motora i moment tereta. Iz ovih dijagrama se jednostavno određuje moment koji motor mora razviti da bi savladao teret na vratilu. Sl. 4.a.4. i 4.b.4. prikazuju promenu električne snage koju motor uzima iz mreže i promenu mehaničke snage na vratilu motora. Razlika te dve veličine je snaga gubitaka u motoru čijom se daljom analizom može dobiti uvid i u zagrevanje motora.

Električna energija  $W_e$  uzeta iz mreže, i mehanička energija  $W_m$  predana radnom mehanizmu na vratilu motora, prikazane su na Sl. 4.a.5. i 4.b.5. Osim toga, na dijagramima je prikazana i promena stepena iskorišćenja motora tokom jednog ciklusa. Ovi podaci su projektantu elektromotornog pogona korisni, jer iz podatka o potrošenoj energiji tokom jednog ciklusa rada lifta dobije se potrošnja pogona u bilo kojem vremenu.

## 2.2. Komentar rezultata proračuna

Dobijeni rezultati proračuna dinamičkih karakteristika motora 1.ZK 225 M-6 i 1.ZK 225 S-4 pokazuju da oba motora zadovoljavaju navedene zahtevе za pogon brzih liftova. Vrednosti, kao što su odnos karakterističnih veličina posmatranih prema nazivnim, te stepen iskorišćenja, daju prednost četvoropolnom motoru, što je vidljivo iz tabele 3.

Tabela 3. Odnos karakterističnih iznosa posmatranih veličina prema nazivnim.

tip motora	1.ZK 225 M-6	1.Zk 225 S-4
ismax/In	*2.27	1.94
Ies/In	0.71	0.52
memax/Mt	3.94	1.87
pemax/Pn	2.63	1.07
We (15s)	57.06 Wh	52.54 Wh
$\eta$ (konačni)	86.36	92.84

Dakle, bolji izbor, s obzirom na tehničke performanse, od dva tražena motora za pogon brzih liftova bio bi 1.ZK 225 S-4. Razlog tome su bolje karakteristike: manji iznos potrebnog momenta, zatim manja potrošnja energije. Osim toga važno je zapaziti, da snaga motora 1.ZK 225 S-4 u čitavom režimu rada ima pozitivan predznak. Ova činjenica igra veoma važnu ulogu pri izboru odgovarajućeg pretvarača. Naime, ako se upotrebi motor 1.ZK 225 S-4, tada nije potrebno voditi računa o električnom kočenju.

Polazeći od podatka koji su navedeni u SEVER-ovom prospektu za MIKROVERT-D i činjenice da su isti namenjeni za univerzalnu industrijsku primenu, navedenim motorima bi trebali da odgovaraju tipovi pretvarača kao što je dato:

1.ZK 225 M-6 → MIKROVERT-D 39/380 (S = 39 kVA; I<sub>max</sub> = 88.5 A; 30 s)

1.ZK 225 S-4 → MIKROVERT-D 50/380 (S = 50 kVA; I<sub>max</sub> = 114 A; 30 s)

Analizirajući dijagrame Sl. 4.a.2. i Sl. 4.b.2. dolazimo do zaključka - da bi navedeni zahtevi bili realizovani sa pomenutim motorima, morali bismo izabrati sledeće uređaje:

MIKROVERT-D 72/380 (I<sub>max</sub> = 165 A; 30 s) → 1.ZK 225 M-6

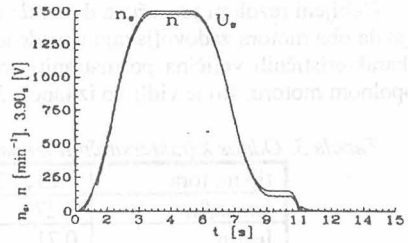
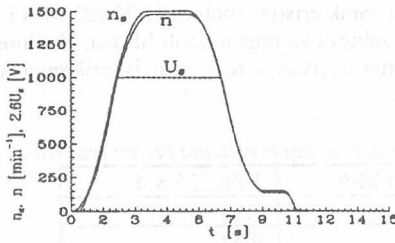
MIKROVERT-D 50/380 (I<sub>max</sub> = 140 A; 30 s) → 1.ZK 225 S-4

Pored toga na dijagramima Sl. 4.a.3. i Sl. 4.b.3. je uočljiva velika razlika vršnih vrednosti elektromagnetnih momenata u režimu ubrzanja (750 Nm; 366 Nm) što je posledica različitih vrednosti momenata inercije f<sub>motora</sub>. Sa druge strane u režimu usporenja, kod pogona sa šestopolnim motorom je uočljiv period generatorskog režima rada električne mašine. Ova razlika ide u prilog četvoropolnom motoru, jer bi za šestopolni bilo neophodno predvideti neki način rešavanja vraćanja energije (rekuperativno ili otporničko kočenje).

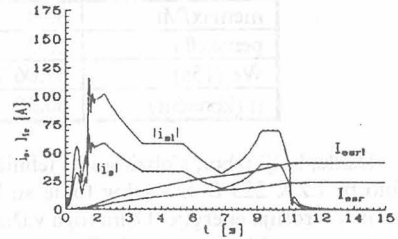
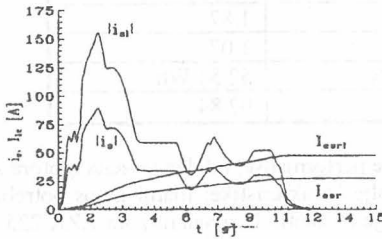
Takođe se i na Sl. 4.a.5 i Sl. 4.b.5. vidi da su energetske pokazatelji (stepen korišćenja i faktor snage) bolji za četvoropolno pogon.

Iz napred navedene komparacije se zaključuje da je povoljnija varijanta sa četvoropolnim pogonskim sistemom za realizaciju navedenog zahteva i to zbog:

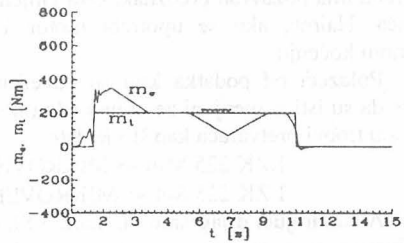
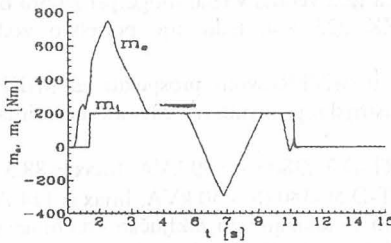
- četvoropolni motor je jeftiniji od šestopolnog,
- za četvoropolni motor i za šestopolni motor je potreban isti tip pretvarača,
- za četvoropolni pogonski sistem nije potreban otpornik i otpornički nodul, jer se usporenje odvija "po rampi", dok je za šestopolni pogonski sistem u ovom slučaju neophodno iste predvideti i kao posebne stavke dodatno platiti,
- velika vršna vrednost elektromagnetnog momenta šestopolnog pogonskog motora mnogo nepovoljnije deluje na kinematičke sklopove od četvoropolnog pogonskog motora (za ovaj primer).



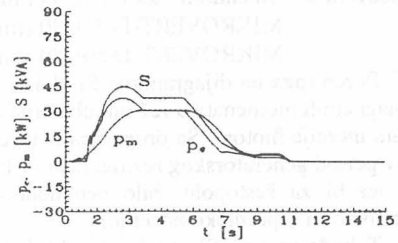
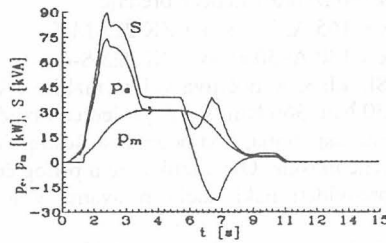
1)



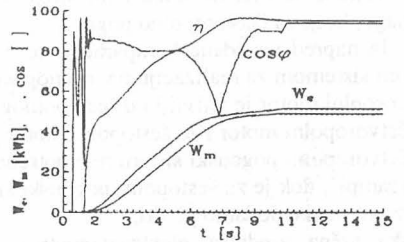
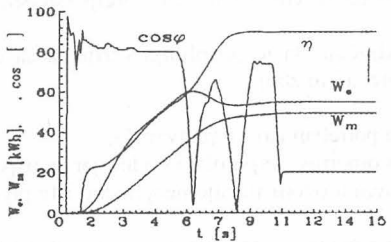
2)



3)



4)



5)

a) Asinhroni motor 1.ZK 225 M-6

b) Asinhroni motor 1.ZK 225 S-4

Sl. 4. Prikaz karakterističnih veličina pogonskih asinhronih motora

## ZAKLJUČAK

Proračun dinamičkih karakteristika asinhronog motora u regulisanim elektromotornim pogonima s većim zahtevima na dinamiku, kao što je pogon brzih liftova, je neophodan pri izboru motora i pripadajućeg statičkog poluprovodničkog pretvarača.

Na primeru dva motora sa različitim nazivnim podacima u radu je prikazan proračun dinamičkih karakteristika i smernice za izbor motora za pogon brzih liftova na osnovu dobijenih rezultata.

Proračun može korisno poslužiti i pri izboru elemenata i uređaja za napajanje asinhronog motora, jer daje podatke o maksimalnim opterećenjima, vremenskom trajanju opterećenja, te o područjima promene pojedinih veličina.

Za veću tačnost proračuna karakteristika asinhronog motora potrebno je opisani matematički model proširiti modelom pretvarača, odnosno upotrebiti celovitiji matematički model regulisanog pogona liftova.

## LITERATURA

- [1] Dr Vladan Vučković *"Opšta teorija električnih mašina"* Nauka, Beograd 1992.
- [2] Mr Ante Magzan *"Izbor asinhronog motora za brza dizala na osnovi proračunatih dinamičkih karakteristika motora"*, VI Međunarodno savjetovanje o elektromotornim pogonima, Brijuni, 13.-15. 10. 1992. , str. 154-158
- [3] Dr Milić R. Stojić *"Digitalni sistemi upravljanja"*, Naučna knjiga Beograd, 1989.
- [4] Mr Jovan Radaković *"Optimizacija upravljanja elektromotornim pogonom jednosmerne struje"*, Energetska elektronika, Zbornik radova sa VI savetovanja u Subotici 17.-16. juna 1986., str. 18-22
- [5] Dr Petar Cmošija *"Elementi slijednih sistema - Svezak I"*, Sveučilište u Zagrebu - Elektrotehnički fakultet Zagreb, 1984.