

Vasilije Sindić\*

[vasilijesindjic@protonmail.com](mailto:vasilijesindjic@protonmail.com)Martin Čalasan  
Elektrotehnički fakultet  
[martinc@ucg.ac.me](mailto:martinc@ucg.ac.me)

## GUI aplikacija za U/f regulaciju asinhronne mašine

### Kratak sadržaj

Ovaj rad se bavi razvojem Matlab-GUI aplikacije za frekventno upravljanje asinhronne mašine. U tom cilju u radu će biti opisan princip rada asinhronne mašine, proračun parametra asinhronne mašine i frekventno upravljanje. Nakon toga biće opisana razvijena interaktivna aplikacija Matlab-GUI, koja pruža mogućnost unosa nominalnih podataka i podataka kratkog spoja i praznog hoda mašine. Štaviše, razvijena aplikacija omogućava određivanje različitih izlaznih karakteristika asinhronne mašine pri frekventnom upravljanju za linearnu i optimalnu nelinearnu vezu napona i frekvencije.

**Ključne riječi:** U/f regulacija, asinhronna mašina, GUI aplikacija, frekventno upravljanje

### U/f control asynchronous machines - matlab-GUI applications and forming the optimal output characteristics

#### SUMMARY

This paper deals with the development of a Matlab-GUI application for frequency control of asynchronous machines. To this end, the principle of operation, the equivalent circuit parameters estimation as well as induction machine frequency control will be described. After that, a developed Matlab-GUI interactive application, which provides the ability to input nominal machine data and to input the short circuit and open-circuit data will be described. Moreover, the developed application allows to determine the different output characteristics of the asynchronous machine with frequency control for linear and for optimal nonlinear voltage and frequency ratio.

**Key words:** U/f regulation, induction machine, GUI application, frequency control

## 1. Uvod

Asinhronna mašina, ili induckiona mašina, je najčešće korišćena obrtna električna mašina u električnim pogonima [1-5]. Riječ je o mašini naizmjenične struje, koja može imati ulogu i motora i generatora i elektrodinamičke kočnice. Ipak, najveću primjenu je našla u ulozi motora u AC pogonima [1].

Kao najvažniji pogonski motor u industriji ovakav tip motora se sve češće koristi u pogonima gdje su se u prošlosti koristili motori jednosmjerne struje. Glavni razlozi za to leže u mogućnosti kontinualne regulacije brzine primjenom frekventnog upravljanja, lakim održavanjem, dužim vijekom trajanja i mogućnostima upotrebe kod električnih pogona velikih snaga [6]. Međutim, njihova povećana potražnja rezultat je razvoja energetske elektronike, posebno u oblasti invertora [6,7].

---

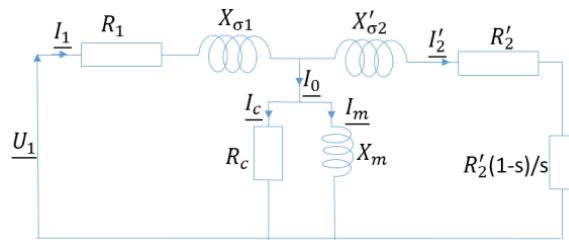
\* 8.Mart br.62,Podgorica

Cilj ovog rada je opis realizovane Matlab GUI aplikacije, koja omogućava dobijanje izlaznih karakteristika asinhronne mašine pri frekventnom upravljanju. Osim toga, aplikacija pruža mogućnost unosa nominalnih podataka mašine, podataka o praznom hodu i kratkom spoju, na osnovu čega se može izvršiti proračun samih parametara zamjenske šeme asinhronne mašine.

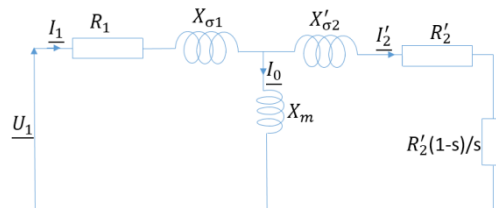
U cilju boljeg pregleda rada sam tekst je organizovan u nekoliko cjelina. U poglavlju 2 je prikazana električna šema asinhronne mašine, sa svim njenim parametrima. U poglavlju 3 je opisan način dobijanja parametara asinhronne mašine. Matematički aparat za dobijanje momentne karakteristike asinhronne mašine opisan je u poglavlju 4. U nastavku u poglavlju 5 je opisano frekventno upravljanje. Opis realizovane GUI aplikacije, i odgovarajući rezultati prikazani su u poglavlju 6. Poglavlje 7 je rezervisano za zaključak.

## 2. Zamjenska šema asinhronne mašine

Ekvivalentna zamjenska šema asinhronne mašine prikazana je na slici 1. [4, 6, 7]. Postojanje otočne grane uslođnjava matematički aparat pa se prethodna zamjenska šema može svesti na sliku 2. Parametri prikazani na slici 1. i slici 2. i njihov način dobijanja biće detaljno pojašnjen u poglavlju 3.



**Slika 1.** Ekvivalentno kolo jedne faze asinhronne mašine svedeno na statorski namotaj.



**Slika 2.** Ekvivalentna šema jedne faze asinhronne mašine sa zanemarenjem aktivnog otpora u otočnoj grani

## 3. Proračun parametara asinhronne mašine

Proračun parametara asinhronne mašine je veoma naučno zastupljena oblast. Međutim u ovom radu će biti prikazan način dobijanja navedenih parametara uz pomoć korišćenja dva standardna ogleda – ogleda praznog hoda i ogleda kratkog spoja, dok se otpornost namotja astatora mjeri standardnom UI metodom [1, 2, 4, 8].

### 3.1. Ogled kratkog spoja

Iz ogleda kratkog spoja može se doći do rednih parametara zamjenske šeme mašine, odnosno impedanse redne grane, najprije određujući ukupnu impedansu kratkog spoja kao:

$$Z_{ks} = \frac{U_{ks}}{I_{ks}}, \quad (1)$$

gdje je  $U_{ks}$  napon kratkog spoja,  $I_{ks}$  struja kratkog spoja.

Znajući vrijednost otpornosti statorskog namotaja može se lako doći do parametra otpornosti rotora svedene na stator.

$$R_{ks} = R_1 + R'_2 = \frac{P_{ks}}{I_{ks}^2}. \quad (2)$$

gdje je  $P_{ks}$  aktivna snaga kratkog spoja.

Poznavajući impedansu redne grane i aktivnu otpornost iste može se doći i do reaktanse kratkog spoja.

$$X_{ks} = X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2} = \sqrt{Z_{ks}^2 + R_{ks}^2} \quad (3)$$

pri čemu se može i uvesti pretpostavku da reaktansa statora i rotora ravnopravno utiču na rasipanje odnosno da su jednake.

### 3.2. Ogljed praznog hoda

Iz praznog hoda određuju se parametri otočne grane asinhronne mašine. Do parametara otočne grane dolazimo poznavanjem indukovane elektromotorne sile:

$$E = U_1 - (R_1 + jX_1)I_1, \quad (4)$$

odakle se dolazi do otpornosti otočne grane i reaktanse magnećenja na sljedeći način:

$$R_m = \frac{E^2}{P_0}, \quad (5)$$

$$X_m = \frac{E}{I_m}, \quad (6)$$

gdje je  $P_0$  snaga praznog hoda, a  $I_m$  struja magnećenja.

## 4. Elektromagnetski moment asinhronne mašine

Ulazna snaga asinhronog motora predstavlja električnu snagu. Ova snaga se troši na obavljanje mehaničkog rada, ali i na pokrivanje gubitama u mašini. Elektromagnetski moment asinhronne mašine definisan je onom vrijednošću snage koja se sa statora prenosi na rotor, tzv. obrtna snaga:

$$P_{obr} = P_{cu2} + P_{meh} = 3R'_2 I_2'^2 + 3R'_2 \frac{1-s}{s} I_2'^2. \quad (7)$$

Matematičkom operacijama prikazanim u [4] može se doći do izraza za razvijeni elektromagnetski moment mašine:

$$M = \frac{3}{\omega_s} \frac{R'_2}{s} I_2'^2, \quad (8)$$

gdje je

$$I_2 = \frac{U_t}{\sqrt{\left(R_t + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_t + X'_{\sigma 2})^2}}, \quad (9)$$

vrijednost struje rotora svedena na stator, pa je konačan izraz za moment:

$$M = \frac{3}{\omega_s} \frac{U_t^2}{\left(R_t + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_t + X'_{\sigma 2})^2} \frac{R'_2}{s}, \quad (10)$$

## 5. Frekventno upravljanje

Ranije, dok uređaji energetske elektronike nijesu bili razvijeni, regulacija brzine obrtanja električnih pogona naizmjenične struje se vršila promjenom napona statora ili dodavanjem otpornosti u kolo rotora (kod mašina sa namotanim rotorom) ili mogućnošću promjene pari polova. Međutim, prilikom promjene napona napajanja, održavanjem frekvencije konstantnom, javljao se problem zasićenja magnetskog materijala mašine. Naime, prilikom ulaska u zasićenje, čak i mala promjena fluksa može izazvati veliku promjenu struje. Takva promjena može dovesti do pregorijevanja rotorskog namotaja, odnosno namotaja armature, a samim tim i uništenja mašine. Regulacija brzine pogona promjenom broja pari polova je moguća realizacijom statora tako da ima više nezavisnih namotaja, pri čemu svaki od njih ima različiti broj polova. Međutim, ovakav način realizacije nije praktičan jer dovodi do skokovite promjene brzine.

Način koji omogućava kontinualnu regulaciju brzine asinhronne mašine jeste upotreba invertora. Upravo invertorom je omogućena promjena napona napajanja kao i frekvencije na takav način da se fluks održi konstantnim ili skoro konstantnim. S tim u vezi može se govoriti o linearnom i o nelinearnom frekventnom upravljanju.

Ako se pođe od osnovne naponske jednačine za bilo koju fazu asinhronne mašine

$$U = E \approx 4,44Nfk\Phi, \quad (11)$$

može se zapisati da je :

$$\frac{U}{f} = 4,44Nk\Phi. \quad (12)$$

Odnosno, vid upravljanja kod kojeg se vrši proporcionalna promjena napona i frekvencije se naziva linearno frekventno upravljanje. Međutim, u realnom slučaju, proporcionalan (linearan) način promjene napona i frekvencije neće održati prevalni moment konstantnim. Razlog leži u tome što za male vrijednosti napona i frekvencije imamo dominantan pad napona na aktivnoj otpornosti namotaja statora. Iz tog razloga potrebno je naći matematički model uz pomoć kojeg se može dobiti nelinearnu promjenu napona i frekvencije, za koju će se fluks, ali i prevalni moment, održavati konstantnim.

Da bi održali prevalni moment konstantnim odnosno nominalnim potrebno je prvo proračunati vrijednost prevalnog momenta uz pomoć sljedeće relacije

$$M_{pren} = \frac{3}{\omega_s} \frac{Ut^2(X_t+X_2)}{(R_t+X_t+X_2)^2+(X_t+X_2)^2}, \quad (13)$$

Kod promjene frekvencije promijeniće se i reaktanse i ugaone brzine, koje figurišu u relaciji (13) i to za  $\frac{fk}{f}$  gdje je  $f_k$  nova vrijednost frekvencija. Nova vrijednost momenta je određena sljedećom relacijom

$$M_{prenk} = \frac{3}{\omega_{sk}} \frac{Utk^2(X_{tk}+X_{2k})}{(R_t+X_{tk}+X_{2k})^2+(X_{tk}+X_{2k})^2}, \quad (14)$$

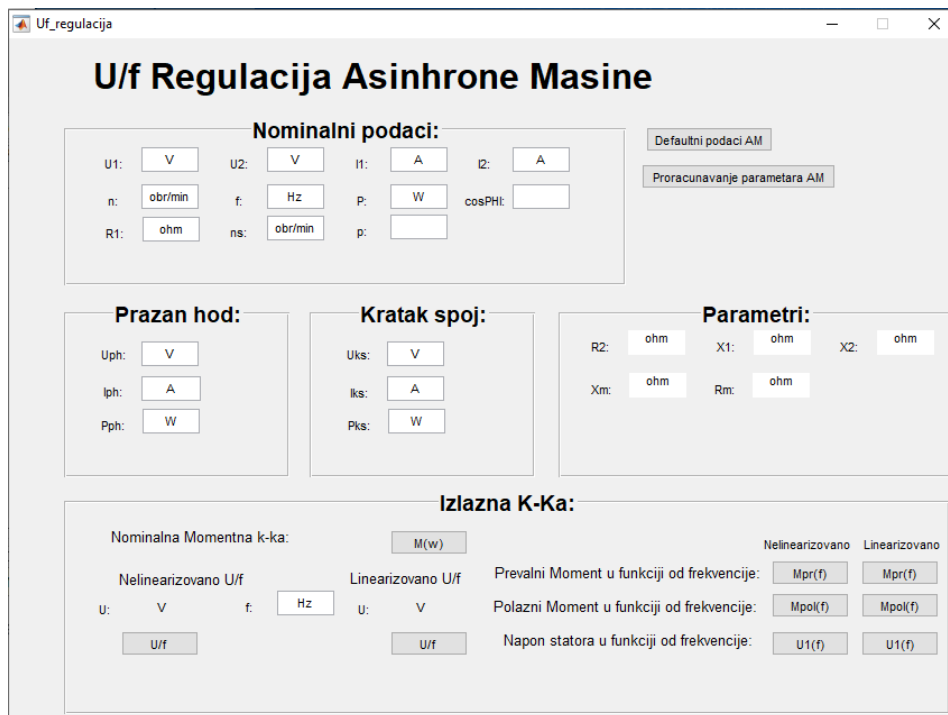
gdje je  $U_{tk}$  vrijednost teveninovog napona ekvivalentnog kola mašine, proračunata za novu vrijednost frekvencije. Kombinujući prethodne jednačine, nova vrijednost napona, koji je potrebno dovesti na statorski namotaj da bi frekventno upravljanje održalo moment konstantnim u oblasti  $f \in [0; f_n]$  možemo proračunati iz:

$$U_{1k} = \sqrt{\frac{M_{pren}((R_t+X_{tk}+X_{2k})^2+(X_{tk}+X_{2k})^2)\omega_{sk}}{3k_t(X_{tk}+X_{2k})^2k_t}}. \quad (15)$$

## 6. GUI aplikacija

Kao što je već naglašeno aplikacija je realizovana u programskom paketu Matlab. Realizovana aplikacija nudi korisniku mogućnost unosa nominalnih podataka mašine, kao i podataka o praznom hodu i kratkom spoju. Pored toga korisnik ima mogućnost samog testiranja aplikacije za podatke realne mašine – dugme „Defaultni parametri AM“. Dugme „Proračunavanje parametara AM“ omogućava proračun svih parametara za unešene podatke, dok dugme „M(w)“ crta prirodnu, nominalnu, momentnu karakteristiku

asinhrona mašine. Nakon unosa željene frekvencije u panelu nazvanom „Izlazna K-Ka“ korisnik ima mogućnost crtanja momentne karakteristike za željenu frekvenciju, kao i proračun potrebne vrijednosti napona statora (linearna/nelinearna promjena  $U/f$ ). Na kraju, aplikacija pruža mogućnost određivanja prevalni moment – frekvencija, polazni moment – frekvencija, i napon statora - frekvencija karakteristika. U slučaju pogrešnog korišćenja aplikacije korisnik će biti obavješten o grešci, sa objašnjenjem šta je potrebno da uradi da bi otklonio istu (*PopUp* prozori).



Slika 4. Prikaz GUI aplikacije

## 6.1. Izlazne karakteristike asinhrona mašine dobijene korišćenjem GUI aplikacije

Kao primjer, za dobijene izlazne karakteristike su korišćeni podaci prikazani na slici 5. Parametri mašine dobijeni korišćenjem GUI aplikacije su prikazani na slici 6.

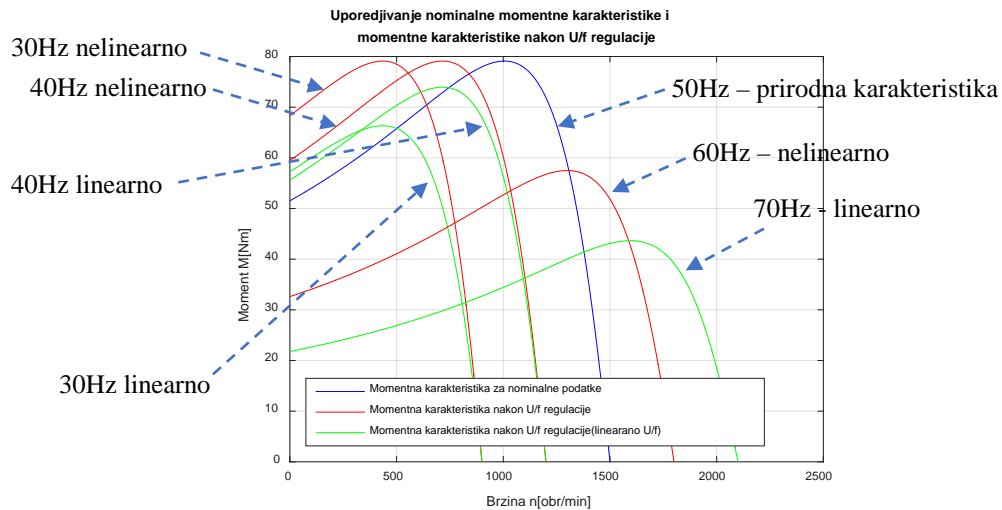


Slika 5. Podaci mašine

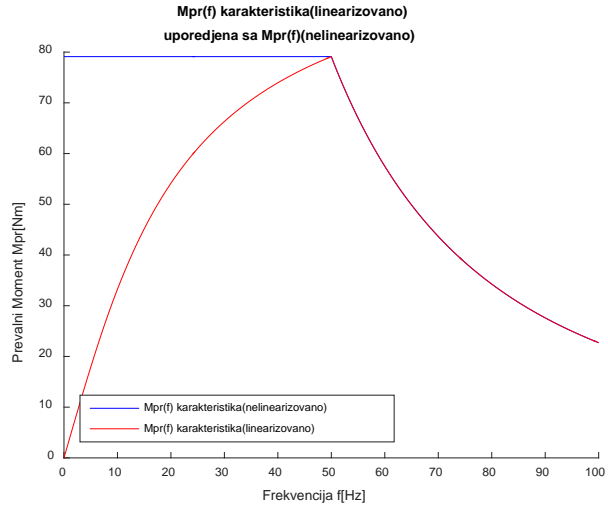
Parametri:		
R2:	1.396	X1: 2.07836
Xm:	50.0451	Rm: 405.07
		X2: 2.07836

**Slika 6.** Proračunati parametri asinhrone mašine

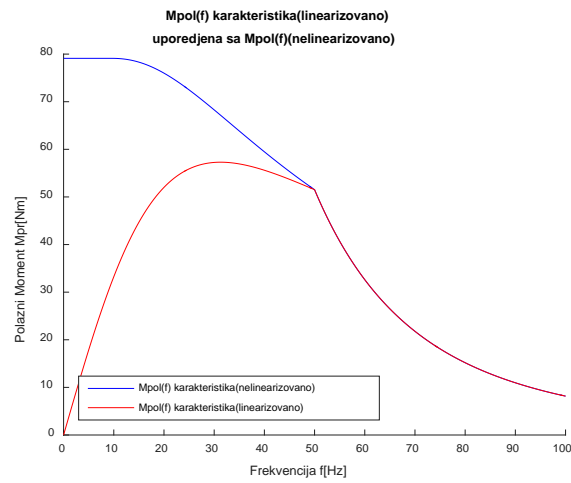
Na slici 7. je prikazana nominalna momentna karakteristika (plavom bojom), momentna karakteristika dobijena nelinearnom promjenom napona i frekvencije (crvenom bojom), momentna karakteristika dobijena linearnom promjenom napona i frekvencije (zelenom bojom). Karakteristike su dobijene za sljedeće vrijednosti frekvencija (respektivno) 30, 40, 60, 70 Hz. Na slici 8. je prikazana promjena prevalnog momenta u funkciji od frekvencije pri linearnoj odnosno nelinearnoj U/f regulaciji odnosno pri linearnoj odnosno nelinearnoj promjeni napona statora. Na slici 9. je prikazana promjena polaznog momenta u funkciji od frekvencije pri linearnoj/nelinearnoj U/f regulaciji. Na slici 10. je prikazana linearna/nelinearna promjena napona.



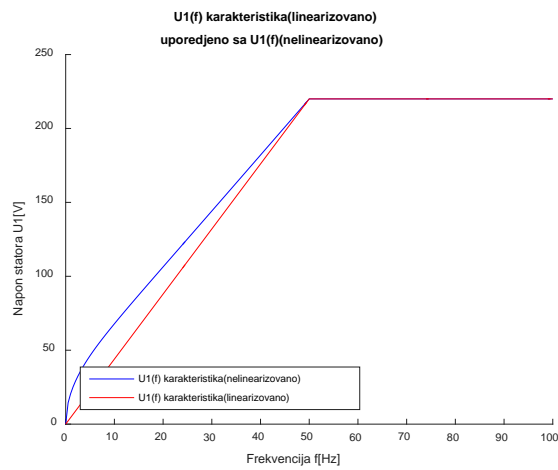
**Slika 7.** Grafički prikaz Nominalne momentne karakteristike i momentne karakteristike nakon nelinearne/linearne U/f regulacije



**Slika 8.** Uporedba prevalnog momenta za linearnu i nelinearnu Uf regulaciju



**Slika 9.** Uporedba polaznog momenta za linearnu i nelinearnu Uf regulaciju



**Slika 10.** Uporedba napona statora za linearnu i nelinearnu Uf regulaciju

## 7. Zaključak

U ovom radu je opisana asinhrona mašina, opisan klasični način proračuna parametara mašine kao i sam problem regulacije brzine odnosno upravljanja asinhronom mašinom. Centralni dio rada je posvećen opisu realizovane GUI aplikacije koja pruža mogućnost određivanja izlaznih karakteristika asinhronne mašine pri frekventnom upravljanju. Realizovana aplikacija je pogodna jer omogućava proračun napona napajanja mašine i može se koristiti za direktno podešavanje invertora u cilju regulacije brzine.

## 8. Literatura

- [1] A. Dolenc, "Asinhronne mašine", ETF Zagreb, 1970.
- [2] B. Mitraković, "Asinhronne mašine", ETF Beograd, 1986.
- [3] V. Hajro, J. Danon, "Električne mašine", 1987.
- [4] G. Joksimović, "Skripta Asinhronne mašine", ETF Podgorica, 2016.
- [5] M. Panić, W. Schuisky, "Elektromotori njihove osobine i primena I deo", 1988.
- [6] V. Vučković, "Električni pogoni", ETF Beograd, 2002.
- [7] Krishnan, R.: 'Electric motor drives – Modeling, Analysis and Control' (Prentice Hall, 2001)
- [8] Rotating Electrical Machines. Part 2-1: Standard Methods for Determining Losses and Efficiency From Tests, IEC Standard 60034-2-1, 2007.