

# Mjerenje električnih veličina u ispitnim procedurama asinkronog stroja

---

Ivanković, Mario

Master's thesis / Diplomski rad

2021

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:267841>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-15**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**MJERENJE ELEKTRIČNIH VELIČINA U  
STANDARDNIM ISPITNIM PROCEDURAMA  
ASINKRONOG STROJA**

**Diplomski rad**

**Mario Ivanković**

**Osijek, 2021.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Osijek, 30.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Mario Ivanković
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	D-1231, 06.10.2019.
<b>OIB studenta:</b>	70845756661
<b>Mentor:</b>	Doc. dr. sc. Vedrana Jerković Štil
<b>Sumentor:</b>	Dr. sc. Tin Benšić
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	Ferdo Bošnjak
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	Prof. dr. sc. Tomislav Barić
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	Doc. dr. sc. Vedrana Jerković-Štil
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	Dr. sc. Željko Špoljarić
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Mjerenje električnih veličina u ispitnim procedurama asinkronog stroja
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	Opisati svrhu i vrste mjerenja električnih veličina u ispitnim procedurama asinkronog stroja. Načiniti laboratorijski postav za mjerenje električnih veličina asinkronog stroja. Provesti mjerenja električnih veličina laboratorijskog asinkronog stroja i analizirati rezultate mjerenja. Sumentor s FERIT-a: Tin Benšić Sumentor Danieli Systeem: Ferdo Bošnjak Tema rezervirana za: Mario Ivanković
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	30.09.2021.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 19.10.2021.

**Ime i prezime studenta:**

Mario Ivanković

**Studij:**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

D-1231, 06.10.2019.

**Turnitin podudaranje [%]:**

6%

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Mjerenje električnih veličina u ispitnim procedurama asinkronog stroja**

izrađen pod vodstvom mentora Doc. dr. sc. Vedrana Jerković Štil

i sumentora Dr. sc. Tin Benšić

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. ISPITIVANJE ASINKRONOG MOTORA.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Asinkroni motor .....</b>	<b>3</b>
2.1.1. Princip rada.....	5
2.1.2. Nadomjesna shema asinkronog motora .....	7
2.1.3. Moment.....	9
2.1.4. Momentna karakteristika .....	10
<b>2.2. Standardne procedure ispitivanja asinkronog motora.....</b>	<b>12</b>
2.2.1. Standardi IEEE 112 i IEC 60034.....	13
2.2.2. Gubici u asinkronom motoru .....	15
2.2.3. Provjera redosljeda faza i smjera vrtnje.....	16
2.2.4. Ispitivanje namota.....	17
2.2.5. Pokus praznog hoda.....	18
2.2.6. Pokus kratkog spoja.....	21
2.2.7. Test opterećenja.....	25
2.2.8. Test optimalnog napona.....	27
<b>3. SUSTAV ZA AUTOMATIZIRANO ISPITIVANJE ASINKRONOG MOTORA .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1. Mjerenja i izračuni električnih veličina .....</b>	<b>28</b>
3.1.1. Izračun efektivne vrijednosti .....	28
3.1.2. Mjerenje struje.....	30
3.1.3. Mjerenje napona .....	30
3.1.4. Izračun snage .....	31
3.1.5. Izračun faktora snage.....	34
3.1.6. Određivanje učinkovitosti.....	35
<b>3.2. Laboratorijska oprema za mjerenje električnih veličina .....</b>	<b>35</b>
3.2.1. Strujna klijesta Tektronix A622.....	35
3.2.2. Diferencijalna naponska sonda GW-Instek GDP-025 .....	36
3.2.3. DAQ kartica.....	37
3.2.4. Programski paket LabVIEW .....	40
<b>3.3. Laboratorijski postav za ispitivanje asinkronog motora.....</b>	<b>42</b>
<b>3.4. Programska podrška.....</b>	<b>47</b>
<b>4. PRIKAZ, OBRADA I ANALIZA REZULTATA MJERENJA.....</b>	<b>50</b>

<b>4.1. Linearna regresija</b> .....	<b>50</b>
<b>4.2. Metoda najmanjih kvadrata</b> .....	<b>52</b>
<b>4.3. Matlab</b> .....	<b>53</b>
<b>4.4. Primjer ispitne procedure asinkronog motora</b> .....	<b>54</b>
4.4.1. Pokus praznog hoda:.....	54
4.4.2. Pokus kratkog spoja:.....	57
4.4.3. Pokus opterećenja:.....	60
4.4.4. Pokus optimalnog napona:.....	73
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>74</b>
LITERATURA .....	75
SAŽETAK .....	77
ABSTRACT .....	78
ŽIVOTOPIS .....	79
PRILOZI .....	80

# 1. UVOD

Ovaj diplomski rad dio je većeg projekta koji je razvijen u laboratoriju za električne strojeve na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Radi se o automatiziranoj stanici za ispitivanje asinkronih motora prema IEE 112 i IEC 60034 standardima. U ovom radu obrađen je dio stanice koji služi za automatizirano mjerenje i prikupljanje električnih veličina asinkronog motora i njihovom obradom u sklopu razvijenog programskog rješenja koristeći programske pakete LabVIEW i MATLAB. Stanica omogućava provođenje standardnih ispitnih procedura asinkronih strojeva s ciljem procjene kvalitete ili provjere ispravnosti stroja.

Klasične metode ispitivanja motora nailazi na mnoge nedostatke, kao što su nedostatak pouzdanosti i stabilnosti mjernih instrumenata u proizvodnom okruženju te vremensko trajanje provođenja ispitivanja. U literaturi [1] autor navodi sve prednosti jednog automatiziranog sustava za obradu podataka koji nastaje razvojem senzora i drugih komponenti za automatizaciju, čime je omogućeno da se ovaj proces automatizira pomoću programabilnog logičkog kontrolera (PLC) i softvera kao što je LabVIEW. U literaturi [2] navodi se kako klasične metode ispitnih procedura ne daju dovoljno pouzdane rezultate te da je potrebno iste modificirati i unaprijediti kako bi se kvalitetnije mogle proučavati polazne karakteristike motora. Glavni nedostatak asinkronih motora bio je kompliciran način upravljanja brzinom, a što je danas omogućeno razvojem elektronike i primjenom frekvencijskih pretvarača o čemu se govori u literaturi [3]. Kao rezultat ispitivanja dobiva se izvješće koje sadrži sve ključne karakteristike motora kao i parametre njegove nadomjesne sheme. Određivanje parametara nadomjesne sheme asinkronog motora moguće je izvršiti na različite načine. Prema literaturama [4][5] parametri motora mogu se odrediti iz poznate pločice motora s nazivnim vrijednostima te pokusom praznog hoda, dok će se u ovom radu koristiti metoda više različitih pokusa na motoru, a s ciljem što preciznijeg određivanja parametara motora kao što je to opisano u literaturi [6].

U drugom poglavlju dan je fizikalni opis asinkronog motora kao i njegov princip rada te su opisane standardne ispitne procedure. Pojašnjeni su standardi koji su praćeni u ovom radu i detaljno su opisani pokusi koji su ključni za analizu električnih veličina. U trećem poglavlju objašnjene su uloge mjerenja električnih veličina, što je sve potrebno mjeriti i na koji način te rezultate treba tumačiti. Također opisana je laboratorijska oprema koja je korištena za prikupljanje električnih veličina kao i implementacija te opreme u sklopu cijelog ispitnog postava. Pojašnjena su i različita programska rješenja koja su nužna za ispravan rad opreme i

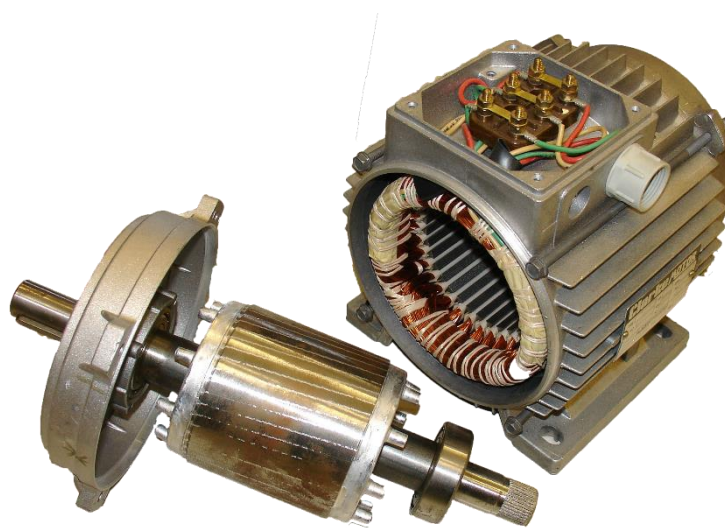
međusobnu razmjenu prikupljenih podataka pri čemu je naglasak stavljen na programsko okruženje LabVIEW. U zadnjem poglavlju objašnjen je postupak regresijske analize i njegova implementacija u Matlab. Na kraju, rad stanice demonstriran je na praktičnom primjeru jednog asinkronog motora.



## 2. ISPITIVANJE ASINKRONOG MOTORA

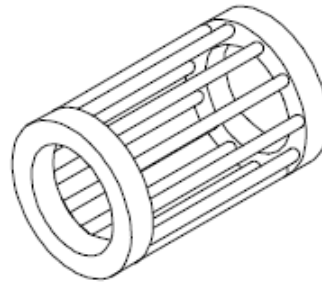
### 2.1. Asinkroni motor

Asinkroni stroj tipičan je predstavnik električnog stroja koji ima vrlo široku primjenu. U praksi se najčešće susreće kao trofazni motor, ali za potrebe manje snage izvodi se i kao jednofazni. Glavne prednosti zbog kojih je ovaj tip stroja naišao na vrlo široku primjenu su jednostavnost konstrukcije, manja cijena, robusnost, manji moment inercije u odnosu na ostale električne strojeve, pouzdanost i sigurnost u radu te jednostavno održavanje. Nedostaci asinkronih strojeva su većinom vezani uz pokretanje i mogućnosti upravljanja brzinom.



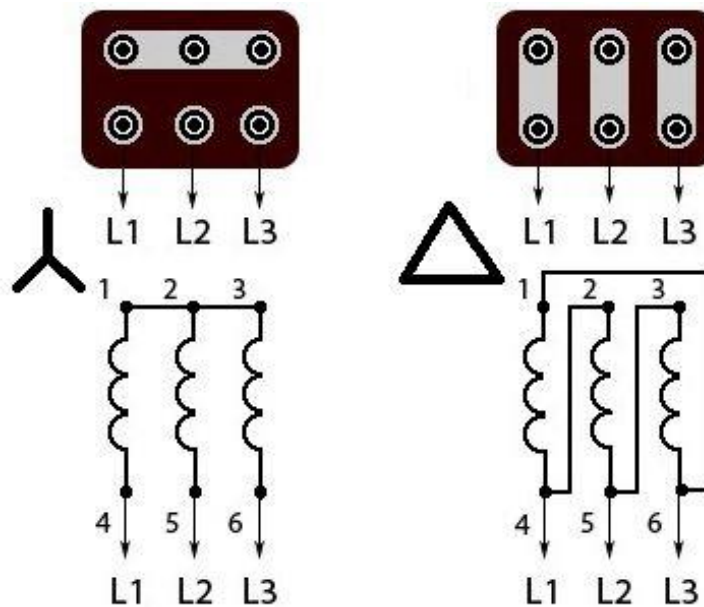
Slika 2.1. Asinkroni stroj sa razdvojenim rotorom (lijevo) i statorom(desno) [7]

Najčešće upotrebljavana vrsta asinkronog stroja je kavezni motor. Ime je dobio prema rotorskom namotu koji je izveden od bakrenih ili aluminijskih štapova koji su međusobno izolirani, a na krajevima kratko spojeni prstenima što podsjeća na oblik kaveza (slika 2.2..). Najveću primjenu ovakav motor ima u industrijskim postrojenjima jer nije potrebno dovoditi struju u rotor pa nema potrebe ni za četkicama ni za kolektorom [8]. Kako bi se motor zaštitio od pregrijavanja, na osovini se nalaze lopatice koje služe kao ventilator. On stvara određene gubitke u radu motora, a o kojima će detaljnije biti rečeno u narednim poglavljima.



Slika 2.2.. Rotor kaveznog asinkronog motora[9]

Svi počeci i krajevi faznih namota statora izvode se u priključnoj kutiji koja se nalazi na kućištu stroja. Namoti se mogu spojiti u spoj zvijezda ili spoj trokut (slika 2.3.).



Slika 2.3. Spoj zvijezda (lijevo) i spoj trokut (desno)[9]

Svaki stroj na sebi mora imati natpisnu pločicu čija je zadaća dati sve osnovne podatke o stroju te njegovim mogućnostima. Ukoliko se na stroju rade bilo kakve izmjene ili popravci, potrebno je dopuniti ili izmijeniti natpisnu pločicu. Natpisna pločica sadrži slijedeće podatke:

- Osnovne podatke o proizvođaču
- Godinu proizvodnje
- Tipsku oznaku
- Izvedbeni oblik

- Spoj statorskog namota
- Klasu izolacije
- Nazivne podatke za koje je stroj građen

Na slijedećoj slici može se vidjeti natpisna pločica asinkronog motora koji je ispitivan u sklopu ovog diplomskog rada.



Slika 2.4. Natpisna pločica ispitivanog asinkronog motora

### 2.1.1. Princip rada

U asinkronom motoru okretno protjecanje stvara se prolaskom višefazne izmjenične struje (najčešće trofazne) kroz statorske namote, a koje su međusobno fazno pomaknute za  $120^\circ$  odnosno za kut od  $2\pi/3$ .

$$i_{sa} = I_{sa} \cos(\omega t) \quad (2-1)$$

$$i_{sb} = I_{sb} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2-2)$$

$$i_{sc} = I_{sc} \cos\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (2-3)$$

Okretno protjecanje u zračnom rasporedu stvara okretno magnetsko polje indukcije  $B$  koje rotira brzinom  $n$  (2-4). To magnetsko polje presijeca i ulančuje rotorske namote u kojima se prema Faradayevom zakonu (2-5) induciraju naponi jednaki brzini promjene ulančanog magnetskog toka. Inducirani napon ima negativan predznak prema Lenzovom pravilu jer struja inducirana u rotorskom paketu proizvodi magnetsko polje koje nastoji poništiti svoj uzrok.

$$n = \frac{60f_1}{p} \quad (2-4)$$

$$E = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (2-5)$$

Inducirani napon potjerat će struje kroz rotorske namote koje će zaostajati za naponima za kut  $\varphi_2$ , a koji će ovisiti o omjeru reaktancije i radnog otpora rotorskog faznog namota. Rezultantno protjecanje je uvijek za kut od  $\pi/2$  ispred induciranih napona, a protjecanje rotora  $\theta_2$  uvijek je za kut  $\varphi_2$  iza njih, tako da je kut opterećenja odnosno kut koji nam pokazuje veličinu razvijenog momenta jednak:

$$\delta = \frac{\pi}{2} + \varphi_2 \quad (2-6)$$

Brzina resultantnog okretnog polja određuje frekvenciju rotorskih napona dok rotor miruje:

$$f_{20} = \frac{pn_s}{60} \quad (2-7)$$

Kako je broj pari polova za stator i rotor jednak, brzina okretnog polja rotora jednaka je brzini okretnog polja koje ga je proizvelo:

$$n_{20} = \frac{60f_2}{p} = \frac{60pn_s}{p \cdot 60} = n_s \quad (2-8)$$

Odnos relativne brzine okretnog magnetskog polja rotora i brzine okretnog magnetskog polja naziva se klizanje. Označava se oznakom  $s$ , a vrlo često se izražava u postocima:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2-9)$$

$$s_{\%} = \frac{n_s - n}{n_s} 100 \quad (2-10)$$

Rotorska frekvencija jednaka je:

$$f_2 = sf_1 \quad (2-11)$$

a napon induciran u fazi rotora:

$$E_2 = 4,44 \Phi_{g1} f_2 \omega_2 f_{n2} = 4,44 \Phi_{g1} s f_1 \omega_2 f_{n2} \quad (2-12)$$

Napon induciran u fazi statora:

$$E_1 = 4,44 \Phi_{g1} f_1 \omega_1 f_{n1} \quad (2-13)$$

Napon u fazi otvorenog rotora koji je zaustavljen, označen je s  $E_{20}$ :

$$E_{20} = 4,44 \Phi_{gl} f_1 \omega_2 f_{n2} \quad (2-14)$$

Kako je napon induciran u rotoru proporcionalan rotorskoj frekvenciji, tada za klizanje  $s$  vrijedi:

$$E_2 = sE_{20} \quad (2-15)$$

Inducirani napon i njegova frekvencija proporcionalni su klizanju  $s$ . Pri pogonskom stanju u kojem se motor vrti sinkronom brzinom, odnosno kada je klizanje jednako nuli, napon u rotoru također je nula te tada nema ni struja koje bi stvorile moment. Kako bi se stvorio moment i ostvario asinkroni rad, klizanje mora biti različito od nule.

Ukoliko rotor motora miruje ( $s=1$ ) i motor se priključi na mrežu, kroz fazni namot rotora poteći će struja kratkog spoja:

$$I_{2k} = \frac{E_{20}}{R_2 + jX_{\sigma 2}} \quad (2-16)$$

Gdje je:

$R_2$  – omski otpor rotorskog namota

$X_{\sigma 2}$  – reaktancija rotorskog namota

Za rotor koji se vrti, struja u fazi rotora je:

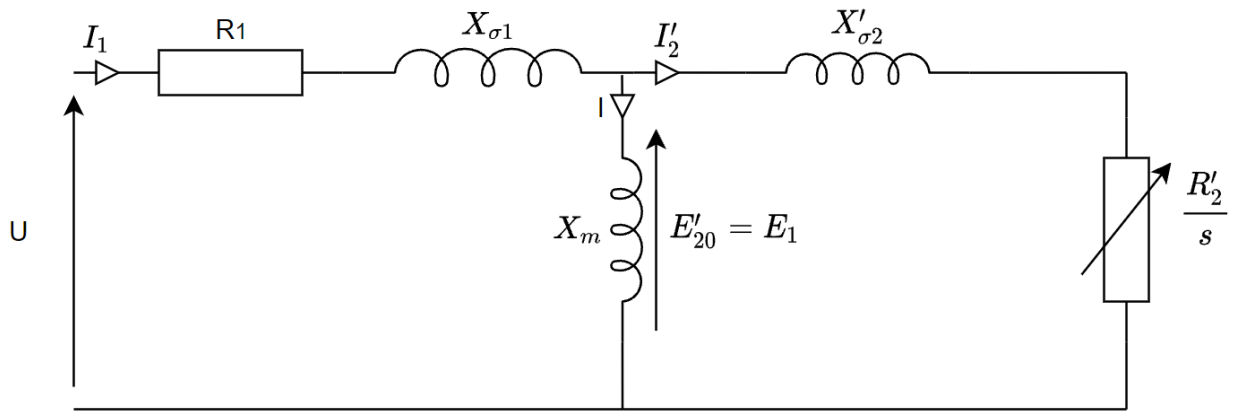
$$I_2 = \frac{sE_{20}}{R_2 + jsX_{\sigma 2}} \quad (2-17)$$

Podijeli li se brojnik i nazivnik sa  $s$ , dobije se:

$$I_2 = \frac{E_{20}}{\frac{R_2}{s} + jX_{\sigma 2}} \quad (2-18)$$

### 2.1.2. Nadomjesna shema asinkronog motora

Napon  $E_{20}$ , struja  $I_2$  i impedancija rotora  $R_2$  i  $X_2$  mogu se svesti na broj zavoja statora. Uz pretpostavljeni prijenosni omjer 1:1 može se rotor i stator asinkronog motora prikazati prema nadomjesnoj shemi 2.5. [10].



Slika 2.5. Nadomjesna shema asinkronog motora u ustaljenom stanju

$U$  – fazni napon mreže [V]

$R_1$  – omski otpor statorskog namota [ $\Omega$ ]

$X_{\sigma 1}$  – rasipna reaktancija statora [ $\Omega$ ]

$X_m$  – međusobna reaktancija [ $\Omega$ ]

$X'_{\sigma 2}$  - rasipna reaktancija rotora svedena na broj zavoja statora [ $\Omega$ ]

$R'_2$  - omski otpor rotorskog namota sveden na broj zavoja statora [ $\Omega$ ]

$\frac{R'_2}{s}$  – imaginarni otpor, predstavlja ukupnu snagu rotora [ $\Omega$ ]

$I_1$  – statorska struja [A]

$I'_2$  – rotorska struja svedena na broj zavoja statora [A]

$I$  – struja magnetiziranja ili struja praznog hoda [A]

$E'_{20}$  - reducirani napon u fazi otvorenog rotora koji je zaustavljen [V]

Kako bi se rotorske veličine svele na broj zavoja statora, koriste se formule (2-19)-(2-23).

$$k = \frac{w_1 f_{n1}}{w_2 f_{n2}} \quad (2-19)$$

$$E'_{20} = \frac{m_1}{m_2} k E'_{20} \quad (2-20)$$

$$I'_2 = \frac{m_2}{m_1} \frac{1}{k} I_2 \quad (2-21)$$

$$R'_2 = \frac{m_1}{m_2} k^2 R_2 \quad (2-22)$$

$$X'_{\sigma 2} = \frac{m_1}{m_2} k^2 X_{\sigma 2} \quad (2-23)$$

Pri čemu su:

$m_1$  – broj faza statora

$w_1$  – broj zavoja statorskog namota

$f_{n1}$  – faktor statorskog namota

$m_2$  – broj faza rotora

$w_2$  – broj zavoja rotorskog namota

$f_{n2}$  – faktor rotorskog namota

Kako su sve struje sada svedene na isti broj zavoja, mogu se zbrajati. Suma struje statora  $I_1$  i reducirane struje rotora  $I'_2$  mora uvijek dati struju magnetiziranja  $I$ , a koja inducira napon jednak mrežnome.

### 2.1.3. Moment

Zakretni moment koji djeluje na rotor može se izračunati iz magnetske indukcije u rasporu  $B$ , rotorskog protjecanja  $\Theta_2$  te kuta između njih  $\delta$ :

$$M = \frac{\pi}{\tau_p} VB\Theta_2 \sin \delta \quad (2-24)$$

Magnetska indukcija proporcionalna je naponu  $E$ , a protjecanje je proporcionalno struji  $I_2$  te je kut  $\delta$  poznat iz izraza (2-6) :

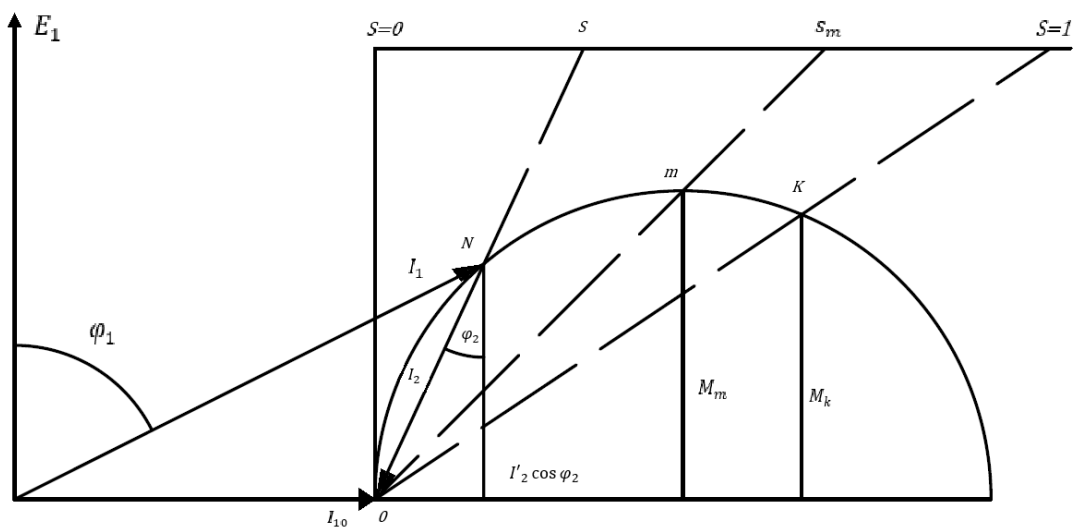
$$M = KEI'_2 \cos \varphi_2 \quad (2-25)$$

Pri tome konstanta  $K$  iznosi:

$$K = \frac{m_1}{\omega_m} \quad (2-26)$$

gdje je  $m_1$  broj faza statora, a  $\omega_m = \frac{\omega}{p}$  je kutna (geometrijska) brzina vrtnje okretnog polja.

U izrazu (2-25)  $K$  i  $E$  predstavljaju konstante, a  $I'_2 \cos \varphi_2$  predstavlja udaljenost od točke  $N$  na kružnom dijagramu za određeno klizanje, do apscisne osi. Ta dužina predstavlja razvijeni moment u određenom mjerilu. Kada rotor miruje (točka  $k$ ), visina do točke  $k$  predstavlja potezni moment  $M_k$  što ga motor razvija pri pokretanju. Kada brzina raste, klizanje opada i moment se povećava do tzv. prekretnog ili maksimalnog momenta  $M_m$  (točka  $m$ ), a onda se opet, pri sinkronoj brzini, smanjuje na vrijednost  $M=0$ . Sve dok je moment motora veći od momenta tereta na osovini, motor ubrzava, pa klizanje opada. Kada nastupi ravnoteža oba momenta, brzina postaje stalna te motor radi uz klizanje koje daje moment jednak momentu opterećenja na osovini. Asinkroni stroj sam se prilagođava opterećenju promjenom klizanja.



Slika 2.6. Klizanje i moment u kružnom dijagramu

#### 2.1.4. Momentna karakteristika

Asinkroni motor razvija svoj maksimalni moment kada je  $\varphi_2 = \pi/4$ , odnosno:

$$\tan \varphi_2 = 1 \quad (2-27)$$

Kut  $\varphi_2$  može se odrediti prema izrazu (2-28).

$$\varphi_2 = \tan^{-1} \frac{SX_{\sigma 2}}{R_2} \quad (2-28)$$

Iz izraza (2-27) i (2-28) može se zaključiti da će razvijeni moment biti maksimalan kada bude:



$$\frac{R_2}{s} = X_{\sigma 2} \quad (2-29)$$

Odnosno kada klizanje bude jednako:

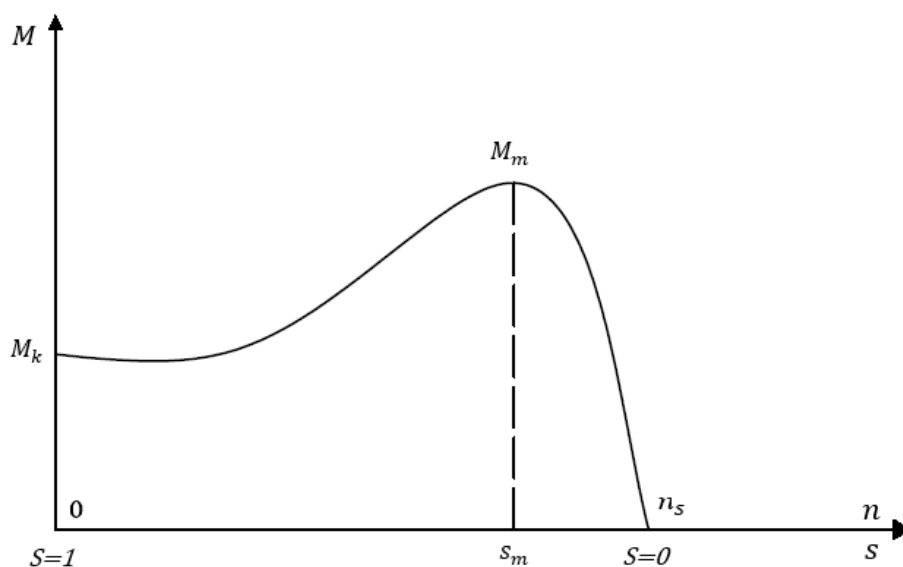
$$s_m = \frac{R_2}{X_{\sigma 2}} \quad (2-30)$$

Klizanje  $s_m$  pri kojem dolazi do maksimalnog momenta naziva se prekretnim klizanjem. Kod porasta opterećenja razvijeni moment raste zajedno s porastom klizanja sve dok se ne dosegne prekretno klizanje, nakon čega moment više ne može rasti i počinje opadati sve dok se motor ne zaustavi. Kako bi se računski mogao izračunati razvijeni moment za bilo koje klizanje, u izraz za moment ubacuju se stvarne vrijednosti struje i napona rotora te se dobije izraz (2-31).

$$M = K_1 \frac{E_{20}^2}{2X_{\sigma 2}} \frac{2}{\frac{R_2}{sX_{\sigma 2}} + \frac{sX_{\sigma 2}}{R_2}} = K_1 \frac{E_{20}^2}{2X_{\sigma 2}} \frac{2}{\frac{s_m}{s} + \frac{s}{s_m}} \quad (2-31)$$

$$K_1 = K \frac{m_1}{m_2} \left( \frac{w_1 f_{n1}}{w_2 f_{n2}} \right)^2 \quad (2-32)$$

Iz navedenih izraza dobiva se momentna karakteristika asinkronog motora koja pokazuje ovisnost momenta motora o klizanju, ali i utjecaj ostalih konstantnih parametara kao što su napon mreže, rasipna reaktancija i omski otpor rotora.



Slika 2.7. Momentna karakteristika asinkronog motora

Motor je pri pokretanju u kratkom spoju te je  $s = 1$ . Moment koji motor pri tome razvija naziva se potezni moment  $M_k$ . Nakon pokretanja moment raste do svoje maksimalne vrijednosti pri klizanju  $s_m$ . Zatim slijedi silazni dio momentne karakteristike na kojem asinkroni motor radi normalno. Bilo kakvo ubrzanje ili usporenje u tom području dovodi do takve promjene momenta koja motor vraća u prvobitno tj. stabilno stanje. Zato se kaže da u tom području karakteristike motor radi stabilno. Klizanje pri normalnom radu iznosi nekoliko posto.

Maksimalna vrijednost momenta računa se prema izrazu (2-33).

$$M_m = \frac{K_1 E_{20}^2}{2X_{\sigma 2}} \quad (2-33)$$

Iz izraza se vidi da taj moment ovisi o kvadratu napona, obrnuto proporcionalan je rasipnoj reaktanciji, a ne ovisi o otporu rotora. Sada se može napisati pojednostavljena Klossova jednadžba za moment  $M$ , koja ovisi o maksimalnom momentu  $M_m$ , prekretnom klizanju  $s_m$  i klizanju stroja  $s$ :

$$\frac{M}{M_m} = \frac{2}{\frac{s_m}{s} + \frac{s}{s_m}} \quad (2-34)$$

Jednadžba (2-34) opisuje momentnu karakteristiku uz određena odstupanja, ali uglavnom zadovoljava tehničke proračune.

## 2.2. Standardne procedure ispitivanja asinkronog motora

Postoji više vrsta ispitivanja i provjeravanja asinkronih strojeva. Prvenstveno se provodi u svrhu određivanja mehaničkih i električkih svojstava stroja, ali također i kako bi se provjerilo odgovara li gotov uređaj projektnim podacima. Tako razlikujemo tri vrste ispitivanja električnih strojeva: serijska, tipska i posebna. Zadaća serijskih ispitivanja je otkloniti grube pogreške u proizvodnji samog stroja. Provode se na svakom stroju iz serije. Tipska ispitivanja imaju zadaću odrediti značajke stroja koje su predviđene projektnom dokumentacijom. Provode se na jednom stroju iz cijele serije. Posebna ispitivanja strojeva provode se u specifičnim slučajevima i na zahtjev kupca. Najčešće se provode za potrebe rada u osjetljivim područjima gdje se od stroja očekuje da zagwarantirano zadovoljava određene uvjete koji su unaprijed dogovoreni kao što su razina buke, protu eksplozivna ispitivanja, otpornost na različite uvjete i sl. Prije svakog ispitivanja nužno je unaprijed definirati kriterije prihvatljivosti kako bi se rezultati prikupljeni ispitivanjem mogli pravilno obraditi i donijeti valjani zaključci. Kriterije i načine provođenja ispitivanja može definirati sam kupac, a mogu biti određeni međunarodnim ili nacionalnim standardima kao što su

IEEE, IEC, DIN, ISO i drugi. U ovom radu praćene su upute standarda IEEE 112 te standarda IEC 60034. Detaljnije su opisani samo pokusi koji se odnose na mjerene elektrićne velićine, dok su ostali pokusi objašnjeni u drugim diplomskim radovima na ovom laboratorijskom postavu.

### **2.2.1. Standardi IEEE 112 i IEC 60034**

Standard je dogovoreni naćin da se nešto ućini na dosljedan i ponovljiv naćin. Standardi postavljaju minimalne zahtjeve u smislu sigurnosti, pouzdanosti Standardom IEEE 112 [11] obuhvaćene su upute za provođenje i, ućinkovitosti i povjerenja. izvještavanje ispitnih procedura višefaznih asinkronih motora i generatora. Objašnjava osnovni postupak ispitivanja za određivanje performansi višefaznog asinkronog stroja bilo koje velićine. Izvorno je standard donesen 1964. godine, a svaka slijedeća revizija imala je za cilj poboljšanje instrumentacije i ispitnih tehnika koje su nastale shodno povećanom znanju o umijeću mjerenja i stalnom promjenom želja i potreba korisnika strojeva i onih koji se bave oćuvanjem energije i slićno. Pri korištenju revizijskih dokumenata bitno je provjeravati sve vanjske reference na određene klauzule prethodnih verzija. Svako pojedinaćno ispitivanje je taćno definirano i svaka metoda ispitivanja ućinkovitosti detaljnije je obraćena te su predstavljene korak-po-korak upute. Dodatni testovi koji nisu navedeni u standardu, mogu se koristiti u slućajevima kada je potrebno zadovoljiti specifićne potrebe istraživanja ili primjene. Prema IEEE 112 standardu, kada god se koristi izraz motor, podrazumijeva se da se on moće zamijeniti izrazom generator kada je to primjenjivo. Također kada god se koristi izraz stroj, podrazumijeva se da se moće koristiti izraz motor ili generator, ukoliko je to primjenjivo. Kako su višefazni elektroenergetski sustavi gotovo uvijek trofazni sustavi, jednadžbe u ovom radu pisane su specijalno za trofazne sustave. Drugi standard korišten u ovom radu je IEC 60034 [12]. Naziv standarda predstavlja skraćenicu za Međunarodnu elektrotehnićku komisiju (eng. *The International Electrotechnical Commission*). Radi se o međunarodnoj organizaciji za norme koja izdaje standarde za sve elektrićne, elektronićke i srodne tehnologije. IEC standardi jedinstveni su standardi koji oznaćavaju klase energetske ućinkovitosti elektromotora. Europska komisija 1999. godine utvrdila je različite klase ućinkovitosti za elektromotore kako bi smanjili potrošnju energije i stvorili svijest o vaćnosti održivog okoliša meću različitim industrijama. Te klase ućinkovitosti nazivale su se EFF standardi. Međutim, Sjedinjene Amerićeke Države uspostavile su NEMA (eng. *National Electrical Manufacturers Association*) standarde za elektromotore, koji su se uvelike razlikovali od standarda EFF. Kako bi se prevladale međunarodne nedosljednosti u propisima, standardi EFF-a promijenjeni su u trenutne IEC standarde za elektromotore. Od 2008. godine standardi IEC-a klasificirani su kao:

- IE1 – Standardna klasa učinkovitosti
- IE2 – Visoka učinkovitost
- IE3 – Vrhunska učinkovitost
- IE4 – Super Premium učinkovitost
- IE5 – Ultra Premium učinkovitost

Standard IEC 60034 odnosi se na rotirajuće električne strojeve slijedećih karakteristika:

- Jednibrzinski elektromotori(jednofazni i trofazni), 50 i 60 Hz
- Linearni motori sa permanentnim magnetom
- 2, 4, 6 ili 8 polova
- Nazivna snaga od 0,12 kW do 1000 kW
- Nazivni napon od 50 V do 1 kV
- Motori sposobni za kontinuirani rad pri nazivnoj snazi s porastom temperature unutar navedene temperaturne klase izolacije

Motori na koje se standard IEC 60034 ne odnosi su:

- Motori projektirani za rad potpuno uronjeni u tekućinu
- Kočioni motori, kada se kočnica ne može demontirati ili zasebno napajati
- Jednibrzinski motori s 10 ili više polova ili višebrzinski motori
- Motori potpuno integrirani u stroj (na primjer, pumpa, ventilator ili kompresor) koji se ne mogu testirati odvojeno od stroja
- Motori posebno projektirani za rad:
  - Na nadmorskim visinama većim od 4000 metara
  - Tamo gdje temperature okolnog zraka prelaze 60° C
  - Na maksimalnim radnim temperaturama iznad 400° C
  - Gdje su temperature vanjskog zraka manje od -30° C (bilo koji motor) ili manje od 0° C (motori s vodenim hlađenjem)
  - Ako je temperatura rashladnog sredstva za vodu na ulazu u proizvod manja od 0° C ili prelazi 32° C
  - U potencijalno eksplozivnoj atmosferi kako je definirano u direktivi 94/9/EZ

Prema [11], za sve testove pri kojima je motor opterećen, stroj mora biti ispravno poravnat, stabilan i pravilno pričvršćen. Uobičajena praksa je prvo prikupljati mjerenja pri višem opterećenju te postepeno smanjivati opterećenje. Pokusi u kojima je rotor zakočen, kao što je

pokus kratkog spoja, uključuju veliki mehanički stres i značajne poraste struje i temperature, stoga je potrebno zadovoljiti slijedeće uvjete:

- Motor mora biti odgovarajuće pričvršćen i rotor mora biti zakočen na siguran način kako bi se spriječila moguće ozlijede ljudi ili oštećenje opreme
- Smjer okretanja stroja mora se utvrditi prije provođenja testa
- Stroj treba biti na približno jednakoj temperaturi okoline prije nego se test započne

Standard [11] također navodi da se očitavanja trebaju izvesti što je brže moguće i da temperatura stroja ne bi trebala prijeći nazivno povećanje temperature uvećano za 40° C. Očitavanje svake točke treba se izvršiti unutar 5 sekundi nakon što je odgovarajući napon narinut.

### **2.2.2. Gubici u asinkronom motoru**

Asinkroni motor je stroj koji pretvara električnu energiju u mehaničku, no ta pretvorba nije idealna jer se u procesu pretvorbe i pri radu motora javljaju različiti gubici energije. Energija na ulazu (električna) motora jednaka je zbroju ukupnih gubitaka asinkronog motora i energije na izlazu (mehanička) iz motora. Pod pojmom ukupni gubici asinkronog motora podrazumijevaju se slijedeći gubici:

1. Gubici u statoru
2. Gubici u rotoru
3. Gubici trenja i ventilacije
4. Gubici u jezgri
5. Dodatni gubici

Bitno je poznavati pojedine gubitke motora kako bi se razumio njegov rad i ponašanje pri određenom režimu rada te da bi se odredili svi bitni parametri motora.

Gubici u statoru nastaju protjecanjem struje kroz bakrene namote stroja pa se stoga još nazivaju i gubici u bakru ili gubici u namotima. Za trofazni asinkroni stroj gubici u statoru prikazani su jednadžbom (2-35) [13].

$$P_{Cu} = 1,5 I^2 R \quad (2-35)$$

Gdje je

$P_{Cu}$  – gubici u statoru (bakru) [W]

$I$  – struja koja teče kroz namot motora [A]

$R$  – otpor između bilo koja dva linijska priključka [ $\Omega$ ]

Gubici u rotoru asinkronog stroja  $P_r$  mogu se odrediti koristeći jednačbe (2-36) i (2-37).

$$P_r = (P_{el} - P_{Cu} - P_{fe}) s \quad (2-36)$$

$$P_r = (P_{meh} + P_{Cu} + P_{fe}) s \quad (2-37)$$

Pri čemu oznaka  $s$  predstavlja klizanje u sustavu jediničnih vrijednosti (eng. *per unit*), sa sinkronom brzinom kao referentnom (2-38).  $P_{el}$  predstavlja ulaznu (električnu) snagu motora,  $P_{fe}$  gubitke u jezgri, a  $P_{meh}$  izlaznu (mehaničku) snagu motora. Sve veličine snage izražene su u vatima (W). Vrijednost se treba izraziti kao jedinična vrijednost za daljnju analizu. Klizanje ( $s$ ) može se izračunati pomoću izmjerene brzine motora prema izrazu:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2-38)$$

Gdje je

$n_s$  – sinkrona brzina motora,

$n$  – izmjerena brzina motora,

Pod mehaničkim gubicima podrazumijevaju se gubici nastali zbog trenja ležajeva i gubici otpora zraka nastali kao posljedica ventilatora na rotoru. Gubici u jezgri nastaju uslijed magnetiziranja jezgre, prema čemu su i dobili naziv, ali također i zbog vrtložnih struja koje se pojavljuju. Utjecaj vrtložnih struja smanjuje se tako što se jezgra pravi od što tanjih dinamo-limova koji su izolirani jedan od drugog. Kako je jezgra najčešće načinjena od željeza, ovi gubici još su poznati pod nazivom gubici u željezu.

U stroju se također pojavljuju i dodatni gubici kojima se ne zna uzrok. Njih nije moguće direktno mjeriti, ali se mogu izračunati. Suma gubitaka u statoru, rotoru, jezgri i gubitaka trenja i ventilacije neće biti jednaka ukupnim gubicima. Upravo ta razlika jednaka je dodatnim gubicima  $P_{dod}$ .

$$P_{dod} = P_g - P_{Cu} - P_{rotor} - P_{fe} - P_{tr,v} \quad (2-39)$$

### 2.2.3. Provjera redosljeda faza i smjera vrtnje

Prije provođenja bilo kakvih ispitivanja na asinkronom motoru, nužno je utvrditi ispravan redosljed faza te smjer vrtnje motora. Motor je potrebno spojiti u spoj trokut prema slici 2.3.

Trofazno napajanje čije su priključnice označene sa L1, L2 i L3 potrebno je dovesti na priključnice motora U1, V1 i W1. U takvom spoju osovina motora mora se zavrtjeti ulijevo (suprotno od smjera kazaljke na satu) kada se motor gleda od iza (u smjeru toka energije). Ovaj smjer vrtnje naziva se još i pozitivan smjer vrtnje motora. Ukoliko ova provjera da potvrđan rezultat, donosi se zaključak o ispravnom redoslijedu faza te se može pristupiti ispitivanju motora.

#### 2.2.4. Ispitivanje namota

Ispitivanje motora započinje mjerenjem otpora namota. Otpor namota mjeri se u tzv. hladnom stanju stroja, odnosno stroj bi prema [1] trebao biti van pogona najmanje 24 sata. Namoti statora asinkronog motora najčešće su trofazni izmjenični namoti. Ispitivanje se sastoji od mjerenja otpora svakog od pojedina tri namota. Proizvođač stroja daje otpore po fazi preračunate na 20° C s kojima se izmjereni rezultati uspoređuju. Mjerenje otpora vrši se pomoću digitalnog multimetra koristeći metodu četiri stezaljke. Bitno je prije samog mjerenja izvršiti kompenzaciju sonde na način da se iste kratko spoje te se vrijednost koju uređaj očitava postavi na 0. Podatak koji je iznimno bitan osim samog otpora jest temperatura, koja je mjerena uz pomoć termoparova postavljenih na točno određena mjesta na motoru. Ukoliko je potrebno izvršiti korekciju otpora namota na drugoj temperaturi, može se koristiti jednadžba (2-40). Pri tome je  $R_{\vartheta}$  otpor namota na temperaturi  $\vartheta$  (otpor toplog stanja), a  $R_{\vartheta_0}$  otpor na temperaturi  $\vartheta_0$  (otpor hladnog stanja). Oznaka  $\alpha_{Cu}$  predstavlja toplinski koeficijent bakra te iznosi 0,0039. Oznaka  $\Delta\vartheta$  predstavlja razliku radne temperature stroja i temperature okoline ( $\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_0$ ).

$$R_{\vartheta} = R_{\vartheta_0}(1 + \alpha_{Cu} \Delta\vartheta) \quad (2-40)$$

Za strojeve koji su napravljeni u otvorenoj izvedbi, u kojoj ispitivač može vršiti prespajanje namota, mjeri se otpor između stezaljki U1-U2, V1-V2, W1-W2. Vrijednosti koje se dobiju odgovaraju omskom otporu po fazi za temperaturu prilikom mjerenja. Preračunate vrijednosti na 20° C, uspoređuju se s vrijednostima dobivenim od proizvođača. Iz izmjerenih vrijednosti donosi se zaključak o simetriji namota. U teoriji omski otpor namota trebao bi u sva tri slučaja biti jednak te bi se tada radilo o savršenoj simetriji, međutim u praksi određeno odstupanje je svakako očekivano, ali ne bi trebalo iznositi više od 5% srednje vrijednosti da bi se za stroj moglo reći da je zadovoljio simetriju. Stroj je također potrebno spojiti u spoj zvijezda i spoj trokut te izmjeriti otpor priključnica pri takvom spoju motora. Očekivane vrijednosti otpora mogu se izračunati prema formulama (2-41).

$$R_d = \frac{2}{3} R_f \quad (2-41)$$

$$R_y = 2 R_f$$

Pri tome je  $R_f$  otpor pojedinog namota,  $R_d$  otpor priključnica u spoju trokut, a  $R_y$  otpor priključnica u spoju zvijezda. Ukoliko se na izmjerenim vrijednostima primijeti veće odstupanje u odnosu na izračunate, može se donijeti zaključak o pogreški u spajanju motora. Za slučaj kada je stroj napravljen u zatvorenoj izvedbi, pri čemu nije moguće direktno izmjeriti otpor pojedinog namota, nužno je poznavati vrstu spoja (zvijezda ili trokut) te izmjeriti otpor na dostupnim priključnicama. Iz izmjerene vrijednosti može se dobiti podatak o simetriji nakon što se izmjerene vrijednosti preračunaju na 20° C te daljnjim računskim operacijama koristeći se izrazom (2-41) izračuna vrijednost otpora pojedinog namota.

### 2.2.5. Pokus praznog hoda

Pokus praznog hoda provodi se kako bi se odredili ukupni gubici motora u praznom hodu, a koje čine:

- gubici u bakru (namotima)
- gubici trenja i ventilacije
- gubici u željezu (jezgri)

Pod pojmom prazni hod podrazumijeva se pogonsko stanje u kojemu je promatrani stroj spojen kao motor na mrežu nazivnog napona i nazivne frekvencije, a osovina njegova rotora je neopterećena.

Prema [11] prije snimanja karakteristike praznog hoda treba napraviti provjeru nazivne točke koja je predviđena projektom kako bi se ocijenile magnetske prilike stroja. To se vrši na način da se motor spaja na nazivni napon u praznom hodu te se očitavaju struje i snage koje motor uzima iz mreže. Ukoliko srednja vrijednost očitanih struja praznog hoda značajnije odstupa od predviđene, može se donijeti zaključak da je došlo do pogreške u proizvodnji, najčešće u veličini zračnog rasporeda stroja.

Pokus se provodi na način da se mijenja napon statora te se mjere struja i snaga koju motor uzima iz mreže. Također bitno je mjeriti i temperature namota i okoline. Napon se mijenja od  $1,25U_n$  i smanjuje se sve do točke u kojoj daljnje smanjenje napona uzrokuje povećanje struje



(otprilike  $0,25U_n$ ). Struja praznog hoda ima induktivnu i radnu komponentu. Induktivna je ona koja je odgovorna za magnetiziranje jezgre, dok je radna odgovorna za razvijanje momenta na osovini motora. Kada se kaže da je osovina motora neopterećena, zanemaruju se moment trenja ležajeva i ventilacije tj. strujanja zraka jer je taj moment vrlo malen u usporedbi sa nazivnim momentom. Međutim, moment na osovini opada s kvadratom napona na statoru, što za posljedicu ima da će pri dovoljno sniženom naponu, moment koji motor razvija biti niži od momenta trenja i ventilacije. Tada dolazi do porasta klizanja, a time i do rasta struja. Sva stanja od tog trenutka pa nadalje ne odgovaraju uvjetima praznog hoda pa taj dio nije nužno promatrati. Frekvencija je postavljena na nazivnu vrijednost i konstantnog je iznosa tijekom cijelog pokusa. Izmjerena ulazna snaga motora predstavlja ukupne gubitke motora u praznom hodu.

$$P_0 = P_{Cu} + P_{tr,v} + P_{fe} \quad (2-42)$$

gdje su

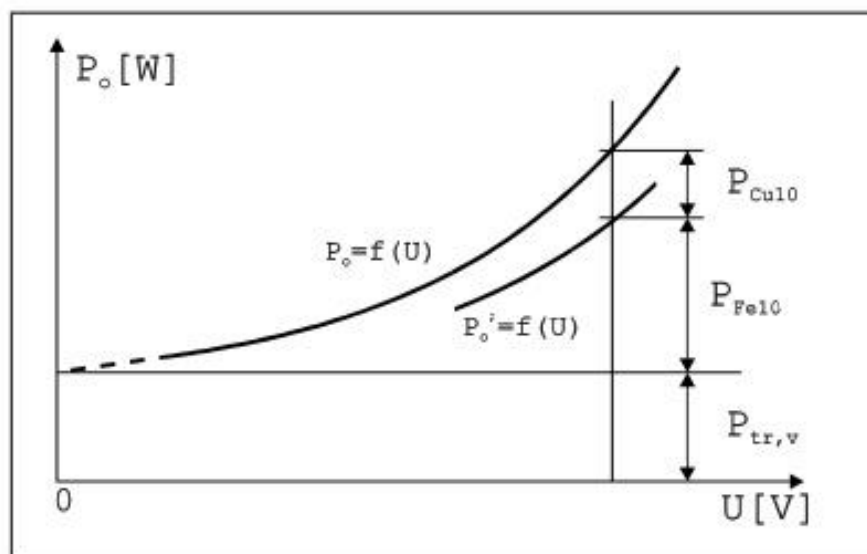
$P_0$  – ukupni gubici praznog hoda

$P_{Cu}$  – gubici u bakru

$P_{tr,v}$  – gubici trenja i ventilacije

$P_{fe}$  – gubici u željezu

Iz rezultata pokusa crta se dijagram praznog hoda koji prikazuje ovisnost gubitaka praznog hoda i napona (slika 2.8.).



Slika 2.8. Gubici praznog hoda

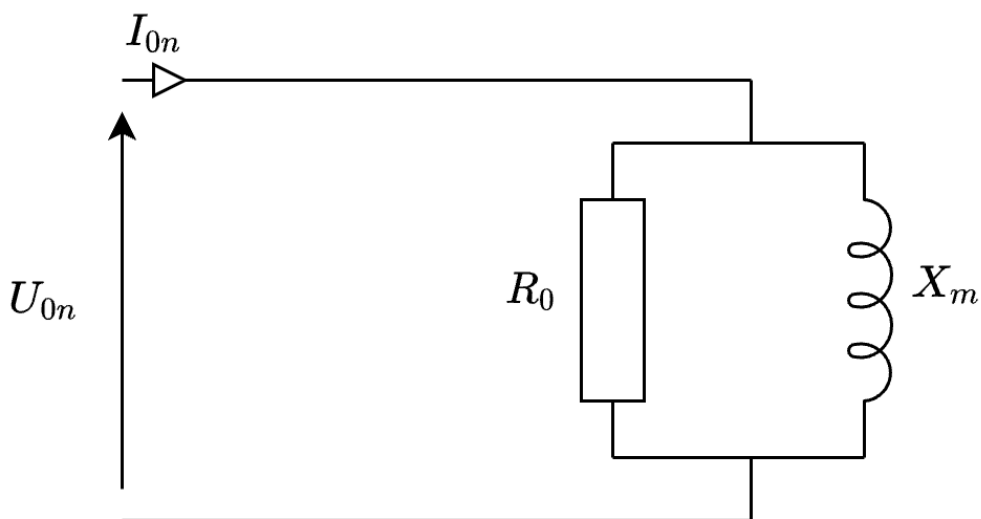
Od ukupnih gubitaka praznog hoda, potrebno je odvojiti statorske gubitke za svaku točku, a koji su poznati iz izraza (2-35). Ono što nakon odvajanja preostaje nazivaju se gubici u užem smislu  $P'_0$ , a njih čine gubici u željezu i gubici trenja i ventilacije.

$$P'_0 = P_0 - P_{Cu} = P_{fe} + P_{tr,v} \quad (2-43)$$

Gubici trenja i ventilacije ovise o brzini vrtnje te povećanjem brzine vrtnje dolazi i do porasta gubitaka, posebice trenja. Obzirom da se motor u praznom hodu vrti stalnom brzinom, ti gubici su konstantni. Da bi se odredili potrebno je nacrtati krivulju gubitaka u užem smislu u odnosu na napon te pomoću regresijske analize odrediti regresijski pravac iz kojeg se tada mogu izračunati mehanički gubici kao vrijednost  $y$  pri  $x=0$ . Oduzimanjem gubitaka trenja i ventilacije od gubitaka u užem smislu dolazi se do gubitaka u željezu. Ovi gubici su također konstantni i imaju jednak iznos pri bilo kojem naponu.

$$P_{fe} = P'_0 - P_{tr,v} \quad (2-44)$$

Iz pokusa praznog hoda također se određuju poprečni elementi nadomjesne sheme asinkronog motora. Nadomjesna shema asinkronog motora u praznom spoju vidljiva je na slici 2.9.



Slika 2.9. Nadomjesna shema asinkronog motora u praznom hodu

Elementi nadomjesne sheme sa slike 2.9 računaju se prema izrazima (2-45)-(2-48) [6].

$$Z_0 = \frac{U_{0n}}{\sqrt{3}I_{0n}} \quad (2-45)$$

$$\cos \varphi_{0n} = \frac{P_{fe}}{\sqrt{3}U_{0n}I_{0n}} \quad (2-46)$$

$$R_0 = \frac{Z_0}{\cos \varphi_{0n}} \quad (2-47)$$

$$X_m = \frac{Z_0}{\sin \varphi_{0n}} \quad (2-48)$$

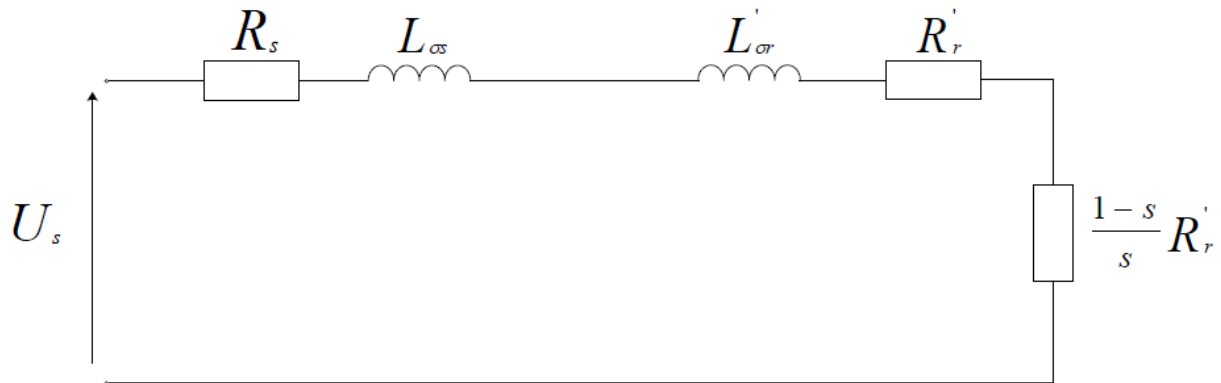
Oznaka  $Z_0$  predstavlja impedanciju poprečne grane nadomjesne sheme,  $R_0$  otpor kojim se modeliraju gubici u željezu i  $X_m$  glavnu reaktanciju.

### 2.2.6. Pokus kratkog spoja

Kratki spoj je pogonsko stanje stroja u kojemu je na stator narinut napon, a osovina stroja je mehanički zakočena. Takvo stanje događa se vrlo često, pri svakom pokretanju motora on se u početku nalazi u kratkom spoju dok se osovina ne pokrene. Zato je iznimno važno poznavati polazne karakteristike i polazne struje i moment. Pri izvođenju pokusa kratkog spoja dolazi se do nekoliko problema. Jedan od njih svakako su vrlo velike struje koje proteku kroz namote te imaju iznose višestruko puta veće od nazivnih vrijednosti. Drugi problem je posljedica upravo tih velikih struja, a to je zagrijavanje motora. Obzirom da gubici kvadratno ovise o struji koja teče kroz namot, može se zaključiti da dolazi do vrlo velikih gubitaka odnosno zagrijavanja. Kako bi se spomenuta problematika svela na minimum, pokus se često izvodi pri sniženom naponu [14]. Napon se podešava takav da struja kroz namote bude tri do četiri puta veća od nazivne, a kasnije se računskim radnjama prema izrazu (2-49) vrijednosti preračunavaju na nazivni napon. Pri tome oznakom  $kn$  označene su nazivne vrijednosti u kratkom spoju, a oznakom  $kmj$  mjerene vrijednosti pri sniženom naponu.

$$I_{kn} = I_{kmj} \frac{U_n}{U_{mj}} \quad M_{kn} = M_{kmj} \left( \frac{U_n}{U_{mj}} \right)^2 \quad (2-49)$$

Iz pokusa kratkog spoja određuju se uzdužni elementi nadomjesne sheme asinkronog motora. Nadomjesna shema za motor u kratkom spoju zanemaruje fiktivni otpor  $R_0$  te glavnu reaktanciju  $X_m$  obzirom da je struja magnetiziranja koja prolazi poprečnom granom znatno manja od nazivne struje  $I_n$  koja prolazi kroz uzdužnu granu. Kako je rotor mehanički zakočen, brzina je jednaka nuli pa je relativno klizanje jednako  $s = 1$ .



Slika 2.10. Nadomjesna shema asinkronog motora u kratkom spoju

Elementi uzdužne grane mogu se odrediti izrazima (2-50)-(2-53) [6].

$$Z_k = \frac{U_{kn}}{\sqrt{3}I_n} \quad (2-50)$$

$$\cos \varphi_{kn} = \frac{P_{kn}}{\sqrt{3}U_{kn}I_{kn}} \quad (2-51)$$

$$R_k = Z_k \cos \varphi_{kn} \quad (2-52)$$

$$X_k = Z_k \sin \varphi_{kn} \quad (2-53)$$

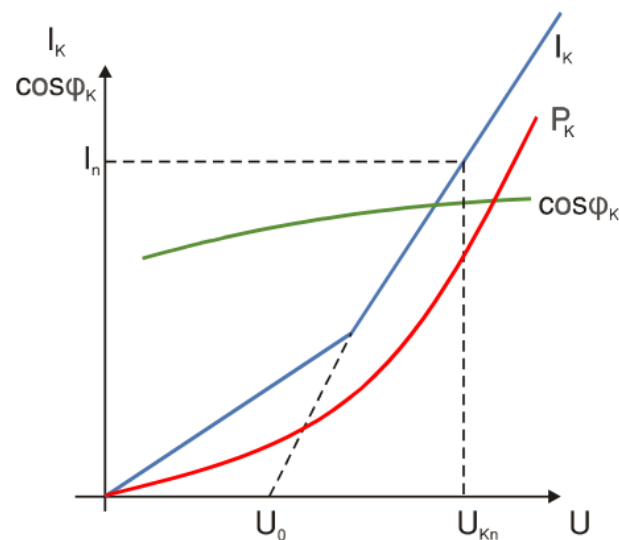
Pri tome je  $Z_k$  impedancija kratkog spoja,  $\cos \varphi_{kn}$  je faktor snage,  $R_k$  omski otpor u kratkom spoju, a  $X_k$  reaktancija kratkog spoja. Uz pretpostavku da su rasipne reaktancije statora i rotora

jednake, iz navedenih vrijednosti, a uz poznat otpor statora  $R_s$  mogu se odrediti rasipne reaktancije statora  $X_{\sigma s}$  i rotora  $X'_{\sigma r}$ , kao i otpor rotora  $R'_r$  [6].

$$R'_r = R_k - R_s \quad (2-54)$$

$$X_{\sigma s} = X'_{\sigma r} = \frac{X_k}{2} \quad (2-55)$$

Kada bi djelatni otpori bili konstantni tijekom cijelog pokusa, tada bi krivulja  $\cos\phi = f(U)$  bila konstanta, a krivulja  $I = f(U)$  bi imala linearan karakter, no zbog zagrijavanja namota, dolazi do značajne promjene otpora pa time onda i struje kratkog spoja. Da bi se taj utjecaj smanjio, pokus kreće sa najvećim naponom te se izvodi silazno i u što kraćem vremenu. Dodatno, ako je taj utjecaj i dalje prevelik, može se mjeriti temperatura namota prije i poslije svake radne točke te kasnije izvršiti korekcija. Veličine koje je važno promatrati u pokusu kratkog spoja su električna snaga, naponi, struje, ali i moment na osovini motora. Moment je moguće mjeriti na različite načine bilo uz pomoć dinamo-vage ili drugih uređaja za mjerenje momenta.



Slika 2.11. Karakteristike kratkog spoja[14]

Iz dobivenih karakteristika sa slike 2.11. iščitava se napon kratkog spoja  $U_k$  i gubici kratkog spoja  $P_k$  za nazivnu struju  $I_k$ . Napon kratkog spoja je onaj napon pri kojemu struja ima nazivnu

vrijednost dok je osovina motora zakočena. Vrlo često se izražava u postocima u odnosu na nazivni i računa se prema izrazu:

$$u_k = \frac{U_{kn}}{U_n} 100\% \quad (2-56)$$

Na slici 2.11. vidi se da krivulja  $I_k = f(U)$  ima linearan karakter, ali s dva različita nagiba pravca. Ta točka je trenutak zasićenja dijelova magnetskog kruga motora poglavito zubi statora i rotora, nakon čega dolazi do porasta struje. Dodatno kod nekih motora ta zasićenja ne nastupe istovremeno pa je moguće na krivulji imati dvije točke loma. Ukoliko se krivulja tvori od mjerenja samo pri niskom naponu te ekstrapolacijom do nazivnog napona, njezine vrijednosti bile bi i do 50% niže od stvarnih za napone nakon zasićenja. Zato je bitno izmjeriti vrijednosti za što je moguće veći napon te onda vršiti ekstrapolaciju prema izrazu (2-49). Potezni moment također je jedan od podataka koji se dobiva iz pokusa kratkog spoja, a koji je vrlo bitan za stroj. Do njega se može doći na različite načine, ovisno o opremi koja se dostupna:

- Mjerenjem pri nazivnom naponu
- Mjerenje pri sniženom naponu te korekcijom na nazivni
- Računski iz snage koja prelazi sa statora na rotor pri mjerenom naponu i struji kratkog spoja

$$M_k = \frac{P_k - 1,5R^2I_k^2}{\omega_s} \quad (2-57)$$

Koristi li se izraz (2-57) za računanje momenta, potrebno je voditi računa o mogućim pogreškama. Naime, takav izraz u obzir uzima konstantan otpor  $R_s$ , a tijekom pokusa dolazi do zagrijavanja namota te porasta otpora. Kako bi se ta pogreška umanjila, može se mjeriti temperatura namota iza svake radne točke te korekcijama doći do točnijeg rezultata. Drugi problem pri računanju momenta jest snaga kratkog spoja  $P_k$  koja osim gubitaka u namotu statora i snage u zračnom rasporu pokriva i tzv. dodatne gubitke kratkog spoja. Zato su prve dvije metode puno pouzdanije te se najtočnija vrijednost dobiva korištenjem dinamo-vage ili drugog uređaja za mjerenje momenta te korekcije momenta prema izrazu (2-49) ukoliko je moment mjeren pri sniženom naponu.

### 2.2.7. Test opterećenja

Test opterećenja se izvodi kako bi se promotriilo ponašanje motora pri različitim pogonskim stanjima. Iz karakteristika opterećenja se mogu odrediti nazivni podaci motora koji se mogu usporediti sa zadanim podacima u projektu, ukoliko se radi o ispitivanju novog motora ili sa nazivnim podacima zadanim na natpisnoj pločici. Karakteristike opterećenja sastoje se od slijedećih ovisnosti:

- Snage na vratilu o uzetoj snazi iz mreže ( $P_{meh} = f(P_{el})$ )
- Struje uzete iz mreže o snazi uzetoj iz mreže ( $I = f(P_{el})$ )
- Brzine vrtnje o snazi uzetoj iz mreže ( $n = f(P_{el})$ )
- Gubicima o snazi uzetoj iz mreže ( $P_g = f(P_{el})$ )
- Momentu na vratilu o snazi uzetoj iz mreže ( $M = f(P_{el})$ )
- Faktoru snage o snazi uzetoj iz mreže ( $\cos \varphi = f(P_{el})$ )
- Korisnosti o snazi uzetoj iz mreže ( $\eta = f(P_{el})$ )
- Klizanja o snazi uzetoj iz mreže ( $s = f(P_{el})$ )

Test se izvodi prema [15] tako da se stroj opterećuje u četiri točke jednoliko raspoređene između 25% i 100% nazivnog opterećenja te dvije opteretne točke iznad 100%, ali ne više od 150% nazivnog opterećenja. Različita opterećenja nužna su kako bi se precizno odredila efikasnost tijekom cijelog opteretnog opsega stroja. U svakoj mjernoj točki potrebno je mjeriti električnu snagu, struju, napon, frekvenciju, brzinu, moment, temperaturu/otpor namota i temperaturu okoline. Pri terećenju stroja, valja početi od najvećeg opterećenja te postupno smanjivati sve do najmanjeg. Stroj se može teretiti na slijedeća tri načina:

- Dinamometrom
- Direktnim opterećenjem bez mjerenja momenta
- Terećenje dvostrukim strojem

U ovom laboratorijskom postavu za terećenje je korišten sinkroni stroj koji se napaja iz frekvencijskog pretvarača i čija je osovina povezana sa ispitnim asinkronim motorom, dok se više o ostalim načinima terećenja stroja može se pročitati u [11].

Nakon crtanja krivulje  $P_{meh} = f(P_{el})$ , očitava se električna snaga koju motor uzima iz mreže pri nazivnom mehaničkom opterećenju na osovini. Kada je ta vrijednost poznata, pomoću preostalih karakteristika opterećenja mogu se odrediti ostali nazivni podaci motora te ih je naposljetku

dobro usporediti s podacima sa nazivne pločice kako bi se odredila odstupanja. Pri izračunu nazivnih podataka s nazivne pločice mogu se koristiti formule (2-58)-(2-62).

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} \quad (2-58)$$

$$P_{el} = \sqrt{3}U_n I_n \cos \varphi_n \quad (2-59)$$

$$\eta = \frac{P_{meh}}{P_{el}} \quad (2-60)$$

$$P_{gn} = P_{el} - P_{meh} \quad (2-61)$$

$$M_n = \frac{9,55 P_{meh}}{n_n} \quad (2-62)$$

Tolerancija odstupanja između izmjerenih podataka i podataka s pločice, dana je tablicom 2.1. prema IEC 34-1 propisima.

Tablica 2.1. Tolerancija nazivnih vrijednosti kod asinkronih motora

Veličina	Dozvoljeno odstupanje	Napomena
1.Faktor snage	-1/6 od $(1 - \cos \varphi)$	min. 0,02; max.0,07
2.Korisnost	-15% od $(1 - \eta)$	Strojevi do 50kW
3.Klizanje	$\pm 20\%$	
4.Potezna struja	$\pm 20\%$	
5.Potezni moment	$\pm 10\%$	
6.Prekretni moment	$\pm 10\%$	



### **2.2.8. Test optimalnog napona**

Test optimalnog napona jedan je od dodatnih testova koji nisu navedeni u standardima iz poglavlja 2.2.1, ali svakako daje jednu vrlo važnu informaciju. Kao rezultat ovog testa saznaje se napon pri kojemu motor ima najveću korisnost te najmanje gubitke. Test se provodi tako da se motor optereti nazivnim opterećenjem, a napon na statoru mijenja se počevši od  $70\%U_n$  pa sve do  $130\% U_n$ . Prilikom promjene napona bilježe se podaci i promatra se korisnost i gubici. Analizom zabilježenih podataka traži se trenutak kada je korisnost imala najveći iznos tijekom testa, te se očitava napon koji je u tom trenutku bio narinut na stator. Taj napon naziva se optimalni napon asinkronog motora.

## 3. SUSTAV ZA AUTOMATIZIRANO ISPITIVANJE ASINKRONOG MOTORA

### 3.1. Mjerenja i izračuni električnih veličina

Električna mjerenja zauzimaju vrlo važno mjesto u elektrotehnici jer omogućuju točno i pravilno shvaćanje zakonitosti i pravila električnih veličina kao i njihovu međuovisnost. Koriste se za provjeru ispravnosti i kvalitete izrađenih uređaja, utvrđivanje bitnih svojstava proizvoda ili materijala, provjeru sigurnosti uređaja, ali i ekonomičnosti njegova rada. Pogreška je neizbježan dio svakog mjerenja te rezultati koji se dobiju mjerenjem nikada nisu apsolutno točni. Mjerni rezultat može biti manje ili više točan u odnosu na stvarnu vrijednost, a faktori koji utječu na točnost mjerenja su preciznost korištenih mjernih instrumenata, točnost odabrane mjerne metode te znanje i vještine osobe koja vrši mjerenje. Kako bi se rezultat mjerenja mogao pravilno interpretirati, nužno je poznavati proces i ponašanje veličina koje se mjeri te imati određena očekivanja s kojima se izmjereni rezultati mogu usporediti. Sva mjerenja i testovi rađeni su prema IEE 112 i IEC 60034 standardima što je objašnjeno u poglavlju 2.2.1. Prema IEE 112 sve vrijednosti trebaju biti izražene kao efektivne ukoliko nije naznačeno drugačije. Oprema i instrumenti koji se koriste pri mjerenju moraju biti kalibrirani i visoko precizni. Svaki linijski napon mora biti izmjeren na način da su mjerne sonde postavljene što bliže kontaktima stroja. Pri izračunu svojstava i karakteristika stroja, koristi se aritmetička sredina izmjerenih napona. Također, struja svake faze mora biti izmjerena te se pri izračunima koristi aritmetička sredina izmjerenih struja. Snaga trofaznog motora mjeri se pomoću dva jednofazna vatmetra spojenih u Aronov spoj (više u poglavlju 3.1.2.). Sva mjerenja i proračuni vezani uz snagu, izraženi su u vatima [W] ukoliko nije naznačeno drugačije.

#### 3.1.1. Izračun efektivne vrijednosti

Efektivna vrijednost ili RMS (eng. *Root Mean Square*) vrijednost definira se kao korijen iz srednje vrijednosti sume kvadrata. Također se još naziva kvadratna sredina. U elektrotehnici, efektivna vrijednost izmjeničnog signala, odgovara ekvivalentnoj istosmjernoj vrijednosti signala koji bi proizveo istu količinu toplinske energije na istom otporniku. Za niz od  $n$  vrijednosti,  $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ , efektivna vrijednost računa se po formuli:

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n}(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2)} \quad (3-1)$$

Za kontinuirani signal  $f(x)$  definiran u periodu  $T_1 \leq t \leq T_2$ , odgovara formula:

$$f_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} [f(t)]^2 dt} \quad (3-2)$$

Te za efektivnu vrijednost funkcije tijekom cijelog vremena:

$$f_{RMS} = \lim_{T \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{2T} \int_{-T}^T [f(t)]^2 dt} \quad (3-3)$$

Efektivna vrijednost periodičnog signala u cijeloj vremenskoj domeni, jednaka je efektivnoj vrijednosti jednog perioda tog signala.

Bitno je razlikovati prosječnu efektivnu od stvarne efektivne vrijednosti. Radi se o dva različita odziva, koji se koriste ovisno o tome kakav valni oblik se želi izmjeriti i s kojom točnošću. Na primjer, za napon sinusnog valnog oblika, matematički se može iz prethodnih izraza izračunati da je efektivna vrijednost napona jednaka vršnoj vrijednosti sinusnog napona podijeljenom sa korijenom iz dva. Odnosno dobije se izraz:

$$V_{RMS} = 0,707 \hat{V} \quad (3-4)$$

Vrlo je bitno primijetiti da taj izraz vrijedi isključivo za slučaj čistog sinusnog valnog oblika. Jeftinije izvedbe mjernih instrumenata koriste upravo taj način računanja efektivne vrijednosti. Prilagođeni su za određeni valni oblik, najčešće sinusni te očitavaju vršnu vrijednost koju zatim skaliraju s izračunatim koeficijentom pri čemu se dobiva prosječna efektivna vrijednost. Ukoliko se s takvim instrumentom želi izmjeriti drugačiji valni oblik (npr. pravokutni), prikazuje se pogrešna vrijednost na instrumentu. Također, greška se javlja i u slučaju kada valni oblik nije čisti sinus, što je u praksi vrlo često zbog viših harmonika te je tada vrijednost koju instrument pokazuje niža od stvarne. Kako bi se takve pogreške izbjegle, koriste se instrumenti sa odzivom na stvarnu efektivnu vrijednost, koji rade na način da prikupljaju kvadrirane trenutne vrijednosti mjerene struje ili napona, usrednjuju te vrijednosti tijekom vremena i prikazuju kvadratni korijen te srednje vrijednosti. Rezultati koje takvi instrumenti daju su vrlo precizni i ne ovise o valnom obliku koji se mjeri. Preciznost mjerenja je veća, što je veći broj  $n$  iz izraza (3-1), odnosno broj prikupljenih trenutnih vrijednosti. Sustav za mjerenje električnih veličina koji je obrađen u ovom radu, ima odziv na stvarnu efektivnu vrijednost. Kreiran je program koji je detaljnije pojašnjen u

poglavlju 3.4.

### **3.1.2. Mjerenje struje**

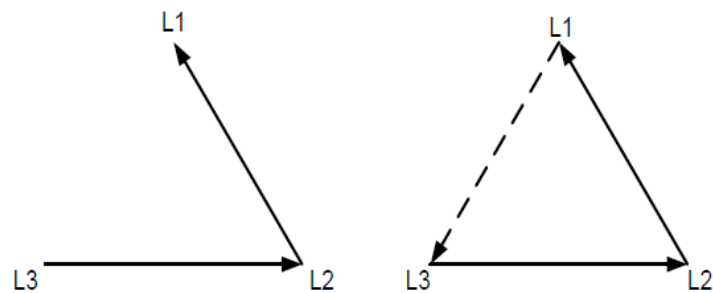
Kako bi se izmjerila vrijednost struje koja teče kroz strujni krug, potrebno je spojiti ampermetar u serijsku vezu sa strujnim krugom u kojem se želi izmjeriti struja. Da bi se oprema spojila serijski, neophodno je napraviti prekid strujnog kruga što vrlo često predstavlja problem u gotovim postrojenjima. Napredovanjem tehnologije razvile su se razne metode i različiti instrumenti za mjerenje struje, od kojih je bitno istaknuti strujna kliješta. Zbog jednostavnosti korištenja, beskontaktnom radu i relativno niske cijene, strujna kliješta su danas vrlo široko primijenjena. Omogućuju vrlo precizno mjerenje struja i većih od 50A, a da pri tome ne utječu na strujni krug koji se mjeri. Odlikuje ih također mala dimenzija i masa. Svoj rad temelje na principu magnetske indukcije te načelu strujnog transformatora ili Hallovog osjetnika. Strujnim kliještima moguće je mjeriti kako izmjeničnu tako i istosmjernu struju. U ovom radu susrećemo se isključivo s izmjeničnim veličinama te će se samo o tom principu rada i govoriti. O strujnim kliještima za mjerenje istosmjernih veličina i njihovom principu rada može se pročitati više u [16]. Strujna kliješta koriste se tako da se unutar njezinih čeljusti obuhvati vodič kroz koji teče struja koja se želi izmjeriti. Oko vodiča kojim teče izmjenična struja inducira se promjenjivo magnetsko polje koje je razmjerno jakosti izmjenične struje koja njime teče [17].

Unutar strujnih kliješta nalazi se strujni transformator koji će vrijednost jakosti struje skalirati na odgovarajuću vrijednost za očitavanje. Druga moguća izvedba je korištenje Hallovog osjetnika. Hallov osjetnik temelji se na Lorentzovom pravilu prema kojemu na naboj djeluje magnetska (Lorentzova) sila koja je okomita na smjer magnetskog polja i smjer struje. Ta sila uzrokuje nakupljanje naboja na jednoj strani pločice što rezultira mjerljivim naponom na rubovima pločice te se taj napon naziva Hallov napon [18]. Uz Hallov osjetnik, nužni su i dodatni sklopovi za pretvorbu izmjeničnih signala kako bi se mogli dalje digitalno obrađivati.

### **3.1.3. Mjerenje napona**

Za mjerenje napona koristi se voltmetar koji se spaja u paralelnu vezu sa izvorom, odnosno trošilom. Kako bi utjecaj voltmetra na mrežu bio minimalan, nužno je da je njegov unutarnji otpor što veći kako bi struja koja prolazi kroz instrument bila što manja, a time i gubici vrlo mali. Pri mjerenju niskog napona instrumenti se najčešće priključuju neposredno, dok se za visoke izmjenične napone mjerni opseg obično proširuje mjernim transformatorima.

U trofaznom sustavu gdje je dostupna neutralna točka mogu se mjeriti fazni naponi priključenjem voltmetara između pojedine faze i neutralne točke. Ukoliko nema neutralne točke, priključenjem voltmetara između faza mjerimo linijske napone. Za slučaj trožilnog trofaznog sustava, dovoljno je mjeriti samo dva napona (Aronov spoj) pri čemu se mjerni instrumenti spajaju u takozvanom  $V$  spoju. Instrumenti mjere dva linijska napona pa se tako dolazi do otvorenog naponskog trokuta vidljivo na kompleksnom dijagramu na slici 3.1.



Slika 3.1. Kompleksni  $V$  dijagram

#### 3.1.4. Izračun snage

U izmjeničnim mrežama razlikujemo nekoliko vrsta snage. Prvo se definira snaga pomoću trenutnih vrijednosti struje i napona. Ta snaga se naziva trenutnom snagom  $p(t)$  [19].

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (3-5)$$

Radi se o vremenski promjenjivoj veličini koja opisuje koliko brzo se električna energija pretvara u neki drugi oblik.

Ukoliko se pomnože efektivne vrijednosti struje i napona dobiva se prividna snaga. Ta snaga ima najveći iznos i označava se sa slovom  $S$ , a mjerna jedinica je volt-amper [VA].

$$S = UI \quad (3-6)$$

Srednja vrijednost trenutne snage izmjenične mreže, naziva se djelatna snaga i označava se slovom  $P$ . Naziva se djelatna jer se radi o snazi koja se troši na koristan rad odnosno trošilo je nepovratno uzima iz izvora.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (3-7)$$

Za slučaj kada između struje i napona nema faznog pomaka, odnosno kada kažemo da su struja i napon u fazi, tada su djelatna i prividna snaga jednake te se sva električna energija troši na koristan rad.

$$P = S = UI \quad (3-8)$$

Za sve ostale slučajeve, djelatna snaga manja je od prividne i njena veličina ovisi o faznom pomaku između struje i napona te se tada ona izračunava prema slijedećem izrazu:

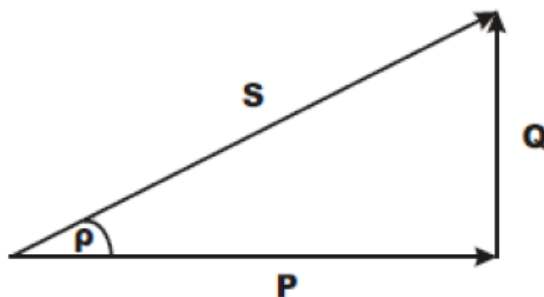
$$P = UI \cos \varphi \quad (3-9)$$

Pri tome  $\cos \varphi$  predstavlja mjeru koja se naziva faktor snage, a o kojoj se više može saznati u poglavlju 3.1.5.

Jalova ili reaktivna snaga je ona snaga koja ne sudjeluje u korisnom radu, a potrebna je za stvaranje promjenjivog magnetskog polja. Označava se slovom  $Q$ , mjerna jedinica je VAR, a može se izračunati prema izrazu 3-10.

$$Q = UI \sin \varphi \quad (3-10)$$

Iako ne sudjeluje u korisnom radu, jalova snaga opterećuje mrežu pri prijenosu električne energije, pa je cilj održavati ju na najnižim mogućim vrijednostima.



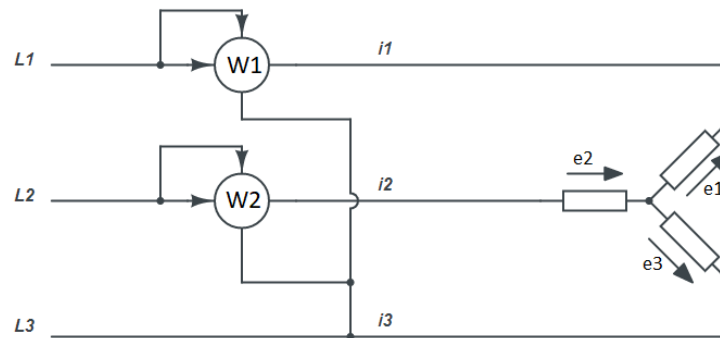
Slika 3.2. Trokut električne snage

Slikom 3.2. prikazan je tzv. trokut snage koji grafički prikazuje vezu između djelatne, jalove i prividne snage, a iz kojeg slijedi izraz:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3-11)$$

Kako bi se izmjerila snaga trofaznog sustava motora bez nulvodiča može se koristiti metoda dvaju vatmetra. Ovakva vrsta spoja poznata je još pod nazivom Aronov spoj (slika 3.3). Strujne

grane vatmetra priključene su u dvije faze na strani izvora, a ulazna stezaljka naponske grane svakog vatmetra priključena je na istu fazu u kojoj je i njegova strujna grana. Izlazne stezaljke oba vatmetra priključene su na preostalu fazu u kojoj nema strujnih grana.



Slika 3.3. Aronov spoj za mjerenje snage u trofaznom sustav

Ukupna vrijednost snage trofaznog sustava jednaka je sumi trenutnih vrijednosti snaga u svakoj fazi.

$$p(t) = e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3 \quad (3-12)$$

Kako je riječ o trofaznom sustavu bez nulvodiča, zbroj svih faznih struja u svakom trenutku mora biti jednak nuli.

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad (3-13)$$

Preoblikovanjem jednadžbe (3-13) dobije se izraz:

$$-i_3 = i_1 + i_2 \quad (3-14)$$

Uvrsti li se jedan izraz (3-14) u (3-12) dobije se da je:

$$p(t) = e_1 i_1 + e_2 i_2 - e_3 (i_1 + i_2) \quad (3-15)$$

$$p(t) = i_1 (e_1 - e_3) + i_2 (e_2 - e_3) \quad (3-16)$$

Za spoj na slici 3.3. vatmetar W1 pokazivat će srednju vrijednost snage P1, a vatmetar W2 srednju vrijednost snage P2. Prema tome, srednja vrijednost snage trofaznog sustava jednaka je sumi vrijednosti koje pokazuju vatmetri.

$$P = P_1 + P_2 \quad (3-17)$$

### 3.1.5. Izračun faktora snage

Faktor snage je bezdimenzionalni broj u intervalu od 0 do 1 koji se definira kao omjer radne i prividne snage stroja. On je mjera učinkovitosti stroja i govori koliki je udio korisno iskorištene snage u ukupnoj snazi. Općenito vrijedi:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (3-18)$$

Pri čemu  $\varphi$  predstavlja fazni pomak između struje i napona (izraz 3-19).

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i \quad (3-19)$$

gdje je

$\varphi_u$  – fazni pomak napona

$\varphi_i$  – fazni pomak struje

U ovom laboratorijskom postavu koristi se direktna metoda određivanja faktora snage. Koristeći se metodom dva vatmetra za mjerenje ulazne snage, faktor snage računa se prema izrazu (3-20).

$$\cos \varphi = \frac{100}{\sqrt{1 + 3\left(\frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}\right)^2}} \quad (3-20)$$

gdje je

$P_1$  – očitana snaga veće vrijednosti

$P_2$  – očitana snaga manje vrijednosti

Također, faktor snage se može odrediti indirektnom metodom te proračunom iz ekvivalentne sheme stroja o čemu se više može pročitati u [11].



### 3.1.6. Određivanje učinkovitosti

Učinkovitost stroja definira se kao omjer izlazne snage  $P_{meh}$  i ukupne ulazne snage  $P_{el}$ . Ukupna izlazna snaga sastoji se od ulazne snage i gubitaka u stroju  $P_g$ . Shodno tome učinkovitost stroja može se izračunati prema formulama (3-21) i (3-22).

$$\eta = \frac{P_{meh}}{P_{el}} \quad (3-21)$$

Vrlo često se za motore koristi i formula:

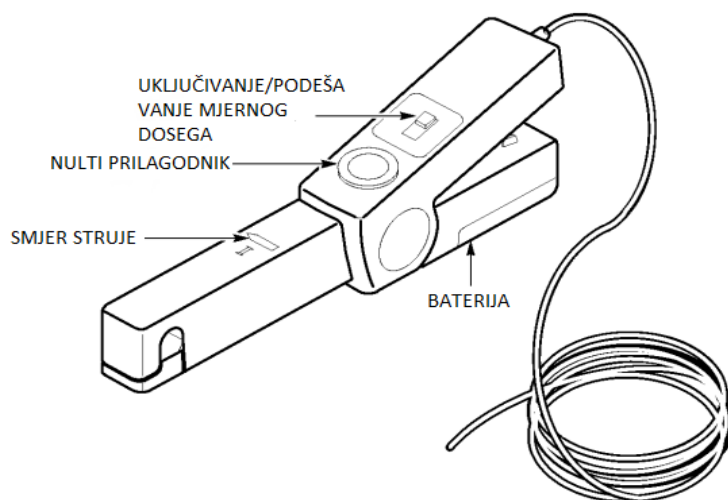
$$\eta = \frac{P_{el} - P_g}{P_{el}} \quad (3-22)$$

Ukoliko drugačije nije navedeno, učinkovitost se treba odrediti za nazivne vrijednosti napona i frekvencije. U ovom laboratorijskom postavu korištena je metoda C prema IEEE 112 standardu [11]. Za terećenje ispitivanog motora korišten je sinkroni motor čije su osovine mehanički spojene. Svaki motor električki je napajan iz zasebnog izvora. Radi lakšeg razumijevanja koristit će se oznaka M1 za stroj spojen na izvor konstante frekvencije, odnosno za asinkroni motor koji se ispituje, a oznaka M2 koristit će se za stroj napajan iz frekvencijskog pretvarača, odnosno za sinkroni stroj korišten za terećenje.

## 3.2. Laboratorijska oprema za mjerenje električnih veličina

### 3.2.1. Strujna kliješta Tektronix A622

Za mjerenje faznih struja korištena su strujna kliješta *Tektronix A622*. Kao i većina strujnih kliješta, rade na principu Hallovog efekta. Ova kliješta ne utječu na strujni krug koji se mjeri, jednostavno se koriste, malih su dimenzija i mase te imaju relativno nisku cijenu. Strujna kliješta *Tektronix A622* omogućuju mjerenje istosmjernih i izmjeničnih vrijednosti do 100 A vršne, odnosno 70 A efektivne vrijednosti.



Slika 3.4. Mjerni član A622 sa osnovnim funkcijama[20]

Pomoću BNC kontakta, mogu se povezati sa osciloskopom, ili u našem slučaju sa DAQ karticom. Pri postavljanju oko vodiča, bitno je voditi računa o smjeru struje kroz vodič kako bi se taj smjer poklopio sa smjerom naznačenim na kliještima. Nulti prilagodnik služi za kalibraciju, odnosno za podešavanje izlaznog signala na nulu kada nikakva struja ne teče. Moguće je odabrati mjerni doseg između 10 mV/A i 100 mV/100 [20]. Dodatno ukoliko je fizički moguće, osjetljivost se može povećati tako da se kroz čeljusti strujnih kliješta namota nekoliko namota ispitnog vodiča. Koliko puta se vodič obuhvati, toliko puta se osjetljivost strujnih kliješta povećava. Korištena su ukupno troja kliješta, za svaku faznu struju po jedna.

### 3.2.2. Diferencijalna naponska sonda GW-Instek GDP-025

Za mjerenje linijskih napona korištene su diferencijalne naponske sonde *GW – Instek GDP – 025*. Osiguravaju vrlo veliku preciznost te minimalno utječu na mjereni strujni krug. Diferencijalne sonde su optimizirane na način da dobivaju diferencijalni signal između dvije ispitne točke, od kojih niti jedna nije uzemljena. Unutar sonde nalazi se pojačalo koje mjerene vrijednosti skalira na odgovarajuće vrijednosti za prikaz na osciloskopu ili u našem slučaju za prosljeđivanje podataka preko DAQ kartice do računala.



Slika 3.5. Diferencijalna naponska sonda GW-Instek GDP-025[21]

Mogu mjeriti diferencijalne napone između dvije točke ili između jedne točke i nultog potencijala. Između dvije točke doseg je 1400 V vršne vrijednosti ili 450 V efektivne vrijednosti. Između određene točke i nultog potencijala doseg im je do 600 V efektivne vrijednosti. Na izlazu daju napon  $\leq \pm 7$  V u odnosu na nulti potencijal. Za njihov rad potreban je vanjski izvor napajanja, 230 V AC adapter koji na izlazu daje 9 V. Na ulazu sonda ima impedanciju  $4 \text{ M}\Omega/1,2 \text{ pF}$  između diferencijalnih točki te  $2 \text{ M}\Omega/2,3 \text{ pF}$  između nule i jedne točke.

Izlazna impedancija je  $50 \Omega$ . Na središnjem preklopniku može se odrediti skaliranje gdje postoje tri dostupna odabira (x20, x50 i x200) [21]. Kao i strujna kliješta, ova vrsta naponskih diferencijalnih sonda spaja se na DAQ karticu pomoću BNC kontakta. Korišteno je ukupno tri sonde kako bi se mjerili svi naponi trofaznog sustava.

### 3.2.3. DAQ kartica

DAQ (eng. *Data Acquisition*) kartica je uređaj koji omogućuje povezivanje senzora i sonda sa računalom pomoću analogno-digitalnog (A/D) pretvornika. DAQ kartica pretvara analogne signale koje prima od senzora i sonda u diskretne signale pogodne za obradu pri čemu se ostvaruju rezultati vrlo velike preciznosti. Jedan cjeloviti DAQ sustav sastoji se od senzora/sondi koji prikupljaju podatke iz okoline, DAQ kartice koja te podatke preuzima, prilagođava i prosljeđuje na računalo na kojem se ti podaci obrađuju, analiziraju i prezentiraju. Osnovni dijelovi DAQ kartice mogu se podijeliti na tri veće cjeline, a to su sklopovlje za

prikupljanje signala, A/D pretvarač te računalna sabirnica [22]. Sklopovlje za prikupljanje signala sastoji se od mjernih pretvornika koji služe za mjerenje fizikalnih veličina i njihovo pretvaranje u električni signal koji DAQ kartica može primiti. Također vrši kontrolu i prilagođavanje signala iz vanjskog svijeta jer se neki signali ne bi trebali direktno usmjeravati na A/D pretvarač. Prilagođavanje podrazumijeva pojačavanje, smanjivanje ili filtriranje dolaznih signala. A/D pretvornik uzorkuje prikupljene analogne signale u određenim vremenskim intervalima nakon čega se uzorkovane vrijednosti kvantiziraju čime se vrši digitaliziranje analognog signala u oblik koji računalno može čitati. Pri uzorkovanju uzima uzorke ulazne veličine po unaprijed određenoj stopi uzoraka (eng. *sample rate*). Stopa uzoraka je mjera koja govori koliki je broj digitalnih uzoraka snimljen u jednoj sekundi, a mjerna jedinica je Hz. Prema [23] [24] pri odabiru frekvencije uzorkovanja, bitno je obratiti pažnju na Nyquistov teorem (3-23) prema kojem frekvencija uzorkovanja mora biti barem dvostruko veća od najveće frekvencije sinusnog signala kako bi se signal mogao u potpunosti rekonstruirati [1]. Ukoliko se Nyquistov teorem ne poštuje, može se pojaviti alias-efekt, odnosno pojava lažnog nisko-frekvencijskog signala.

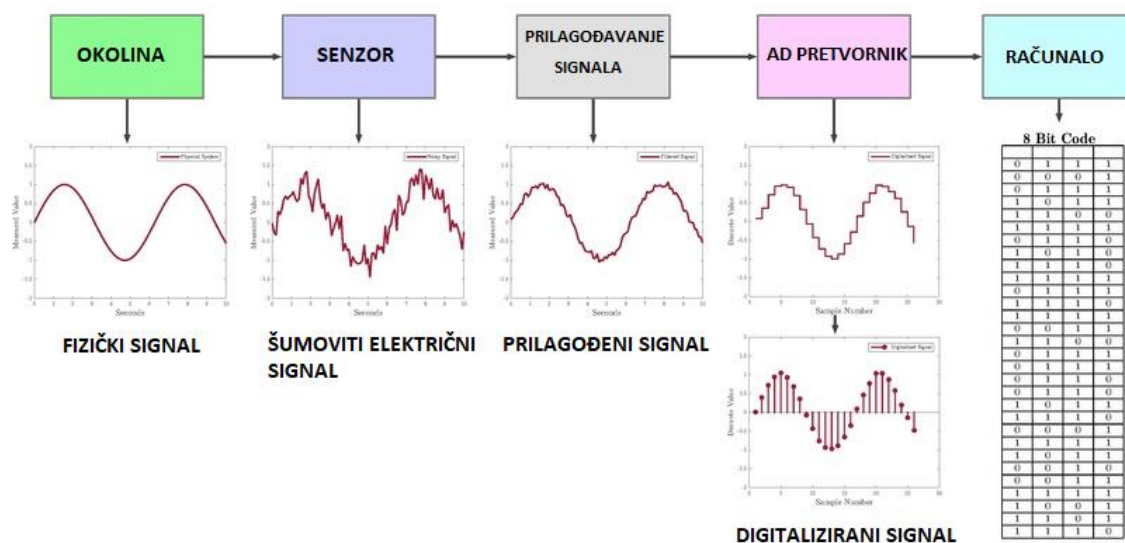
$$f_N \geq 2f_{max} \quad (3-23)$$

DAQ kartice mogu se povezati s računalom preko serijskih i paralelnih protokola spajanja. Kod serijskih sustava, kao što su RS232, RS485 i USB, podatak se prenosi bit po bit kroz jedan komunikacijski kanal, dok se kod paralelnog sustava svi bitovi jednog podatka prenose istovremeno kroz odgovarajući broj kanala. Preko računalne sabirnice digitalizirani signali šalju se na računalno koje uz pomoć računalnog softvera rekonstruira prvobitni signal. U ovom laboratorijskom postavu korišten je model USB-6218 i serijski protokol spajanja. Glavne prednosti ovog modela su niži troškovi, neovisnost o korištenoj platformi, minimalni zahtjevi za upravljačkim programima i nepostojanje potrebe za vanjskim napajanjem jer se koristi USB priključak za povezivanje s računalom koji je ujedno i napajanje. NI DAQ kartica "USB-6218" ima jedan analogno-digitalni pretvarač (ADC) zadužen za pretvaranje analognog signala iz okoline u digitalni oblik.



Slika 3.6. NI DAQ kartica "USB-6218"[24]

NI USB 6218 kartica ima 16 analognih ulaza, 8 digitalnih ulaza, dva BNC analogna izlaza, 8 digitalnih izlaza i 12 ulazno/izlaznih linija kao i dva 32-bitna brojača. Kartica može primiti i do 250 000 uzoraka u sekundi s jednog ulaza. Ukoliko se koristi više ulaza, svaki ulaz ima ograničen broj uzoraka koji može uzeti, a granica se dobije tako da se maksimalna vrijednost podijeli sa brojem ulaza koji se koristi. Kartica ima rezoluciju od 16 bita, što znači da A/D pretvornik može podijeliti amplitudu ulaznog signala na 65536 razina ( $2^{16}$ ). Digitalni ulazno/izlazni priključci mogu dati digitalno stanje 1 ili stanje 0 i vrlo često se koriste za upravljanje digitalnim uređajima. Brojači se mogu koristiti za mjerenje frekvencije i perioda, brojanje događaja, generiranje različitih pulsova i sl. Pokraj svakog priključka za analogni ulaz može se primijetiti sklopka kojom se odabire jedno od dva moguća stanja, FS (eng. *Floating Source*) i FG (eng. *Ground Referenced Source*). Ovisno o vrsti signala koju mjerimo, odabire se jedna od dvije opcije. Ukoliko je izvor signala koji se želi mjeriti „plutajući“, odnosno postoje dostupne priključnice oba pola (npr. baterija), tada se odabire FS opcija. Ako se signal koji se mjeri želi promatrati u odnosu na nulu, onda se koristi opcija GS. Ovaj model DAQ kartice ima ugrađeni NI-PGIA čip koji je predviđen za pojačavanje ili smanjivanje naponskih razina kako bi se A/D pretvorba iskoristila u punom opsegu. A/D pretvorba može potpuno iskoristiti dostupne digitalne bitove samo kada je napon blizu maksimalnog odabranog dosega, a PGIA omogućuje da je rezolucija maksimizirana za svaki ulazni signal.



Slika 3.7. Postupak digitalizacije analognog signala

Kako sama DAQ kartica ne čini cijeli sustav te ona ne može obrađivati i prikazivati rezultate, nužno je korištenje računala i računalnog softvera. U ovom laboratorijskom postavu koristi se programsko okruženje LABVIEW, također proizvod tvrtke National Instruments kao i korištena DAQ kartica. LABVIEW sadrži alat pod nazivom *DAQ Assistant* koji uvelike pojednostavljuje konfiguraciju i postavljanje kartice kao i programiranje te kontroliranje rada same kartice.

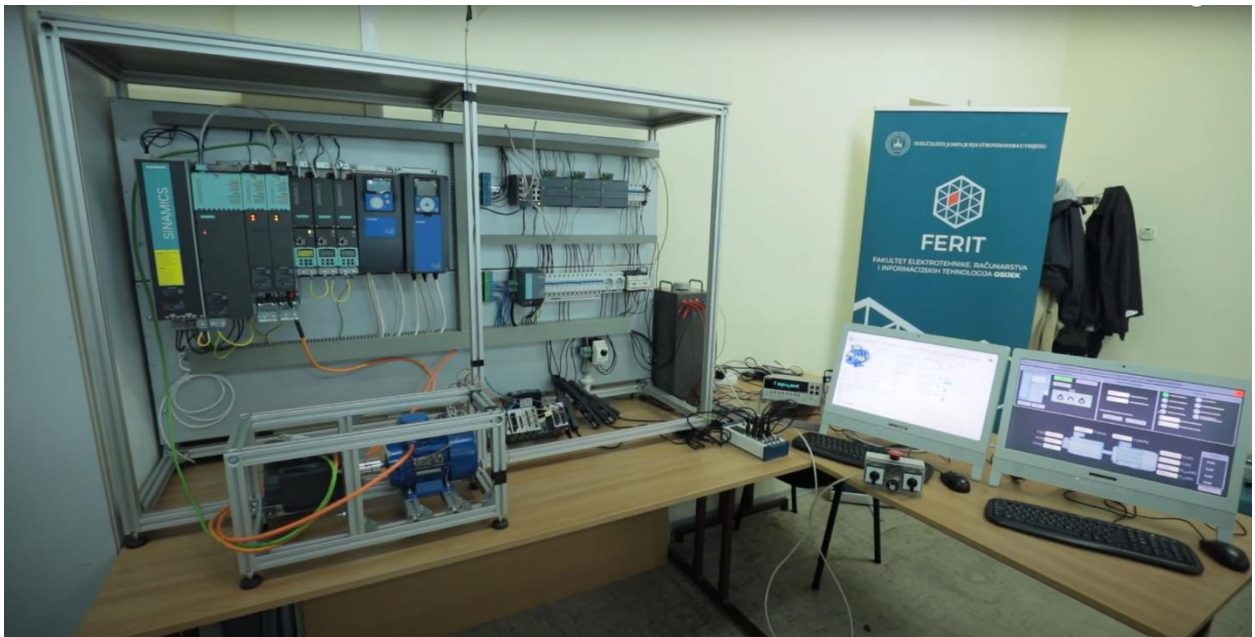
### 3.2.4. Programski paket LabVIEW

LabVIEW je grafički programski jezik koji se koristi u cijelom svijetu u područjima industrije, kao i istraživačkim i akademskim laboratorijima za prikupljanje podataka, ali i kao softver za upravljanje instrumentima. LabVIEW je kompatibilan sa sustavima Windows, Mac OS X i Linux. Programski paket LabVIEW proizvod je tvrtke National Instruments, a naziv LabVIEW skraćenica je od engleskog naziva *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*. Nastao je s ciljem da se omogući inženjerima da razvijaju svoje specifične programe uz osnovno poznavanje programiranja. LabVIEW se karakterizira izradom programa u obliku blokovskih dijagrama uz korištenje grafičkih simbola. U ovom programskom paketu programira se u grafičkom sučelju povezivanjem grafičkih simbola u jednu cjelinu. Svaki od tih grafičkih simbola ima iza sebe određenu funkciju koja je predprogramirana. Obično se koristi za prikupljanje i obradu podataka, upravljanje instrumentima, ali i za industrijsku automatizaciju.

Jedan LabVIEW program može imati više potprograma koji se nazivaju virtualni instrumenti (VI). Svaki VI sastoji se od tri dijela: blok dijagrama, prednje ploče i ikone VI-a. Ikona služi za predstavljanje pojedinog VI-a u blok dijagramima drugih potprograma i omogućava njihovo međusobno povezivanje. Prednja ploča sastoji se od kontrola i indikatora, pri čemu kontrole predstavljaju ulazne varijable koje omogućuju korisniku slanje informacija u VI, a indikatori izlazne varijable koji prikazuju rezultate na temelju zadanih ulaznih varijabli. Prednja ploča također služi kao korisničko sučelje. Blok dijagram sadrži grafički kod, odnosno logiku napisanog programa. Svaki element s prednje ploče imat će svoj terminal u blok dijagramu. Programski paket LabVIEW uključuje podršku za povezivanje s različitim uređajima kao što su instrumenti, sonde, kamere i sl. te također uključuje podršku za hardverske platforme National Instruments-a kao što su CompactDAQ i CompactRIO. Velika prednost za potrebe automatizacije jest mogućnost programiranja više zadataka koji se izvode paralelno. Cijela logika za mjerenje električnih veličina te svi proračuni programirani su u programskom paketu LabVIEW, a o kojima će više biti rečeno u poglavlju 3.4.

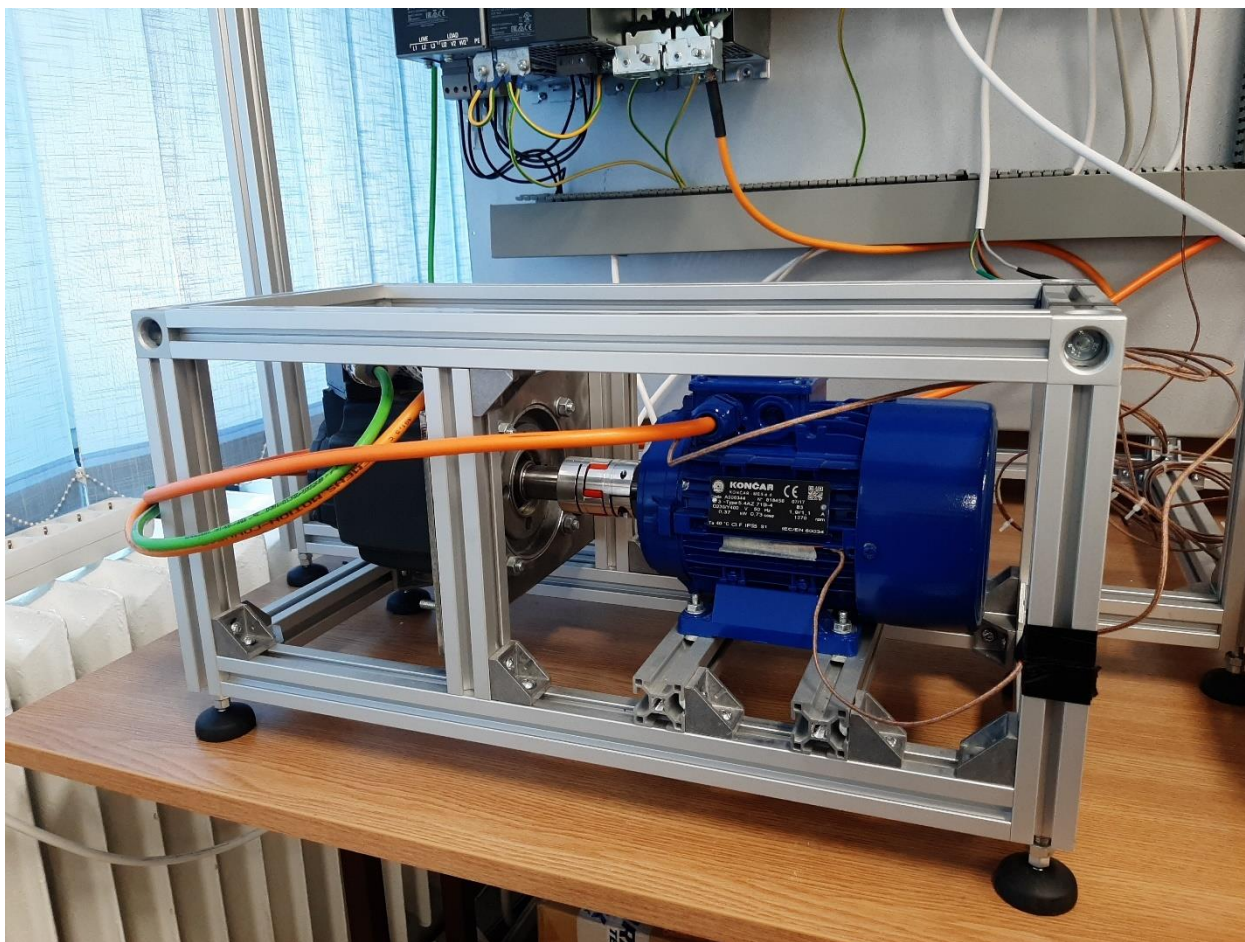
### 3.3. Laboratorijski postav za ispitivanje asinkronog motora

Sustav za mjerenje električnih veličina koji je izrađen u sklopu ovog diplomskog rada, dio je većeg projekta koji se sastoji od tri osnovna dijela. Na postojeći laboratorijski postav koji se sastoji od industrijske opreme za upravljanje procesima i automatizaciju, dodan je sustav za mjerenje električnih te sustav za mjerenje neelektričnih veličina. Kombinacijom ta tri sustava stvorena je kompletna stanica za automatizirano ispitivanje asinkronih motora.



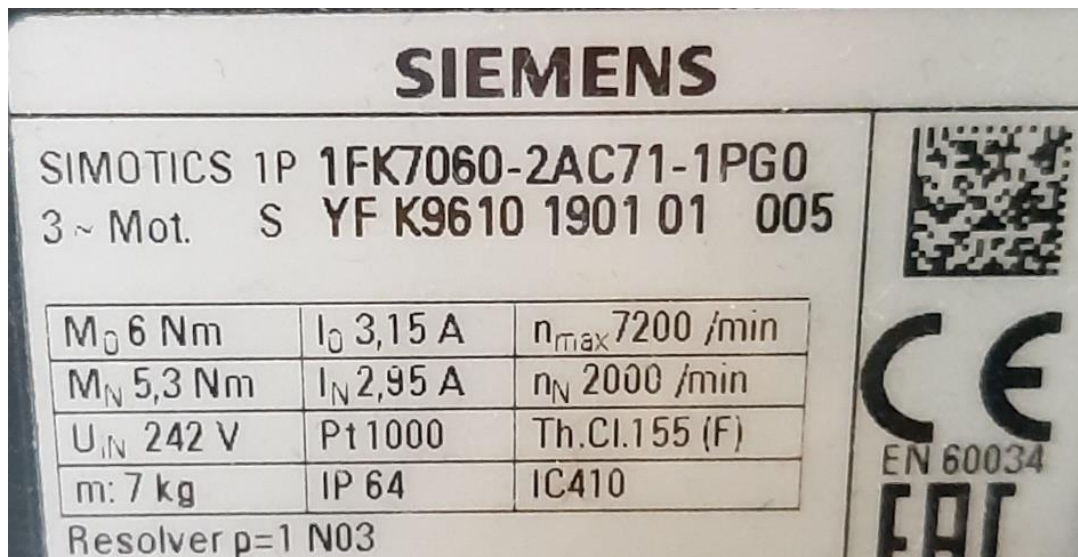
Slika 3.8. Stanica za automatizirano ispitivanje asinkronih motora





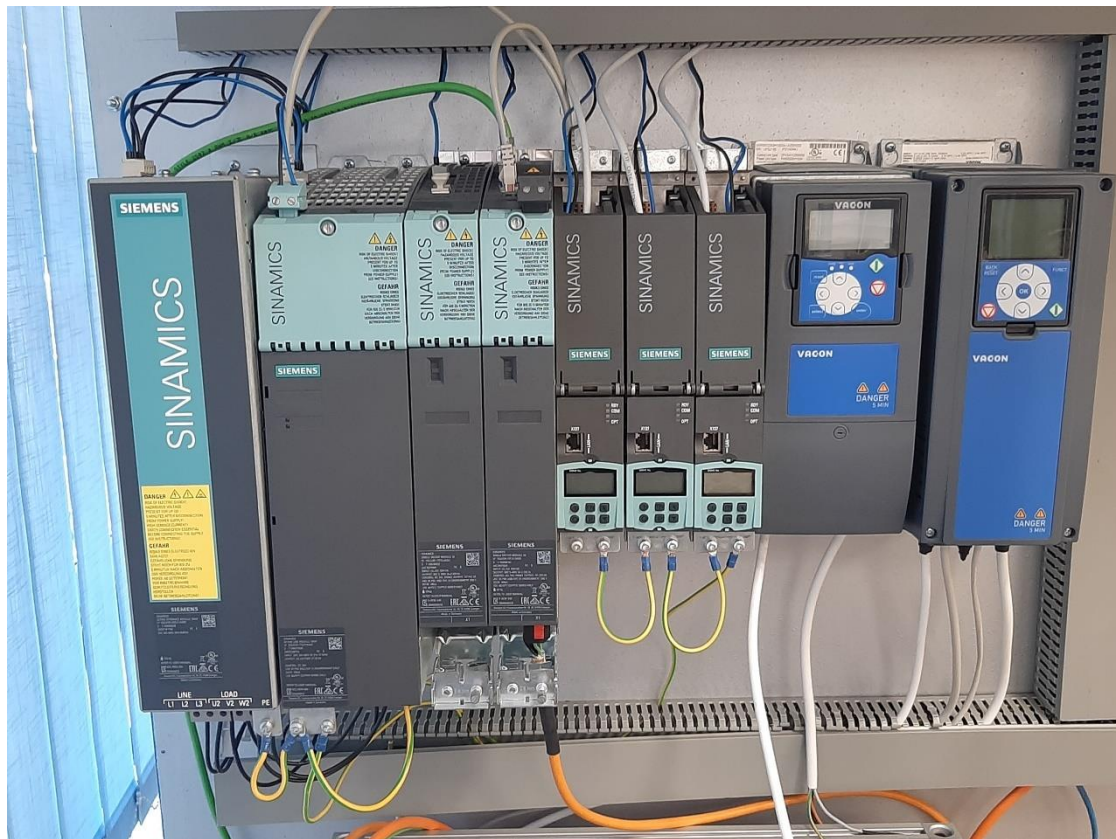
Slika 3.9. Postolje ispitivanog motora

Središnji dio postojećeg laboratorijskog postava sastoji se od dva motora čije su osovine mehanički povezane (slika 3.9.). Jedan motor je asinkroni, odnosno motor koji se ispituje, dok je drugi motor sinkroni s permanentnim magnetima koji se koristi za terećenje ispitivanog motora. Radi se o motoru proizvođača Siemens, model *1FK7060-2AC71-1PG0*. Motor nema poseban sustav za hlađenje, odnosno hlađenje je prirodno. U sebi ima ugrađenu temperaturnu sondu *PT1000* za praćenje temperature motora te pravovremeno sprječavanje pregrijavanja. Također na motoru je postavljen 14-bitni rezolver *R14DQ* koji daje informaciju o brzini i položaju rotora. Nazivni podaci motora mogu se iščitati sa nazivne pločice motora prikazane na slici 3.10.



Slika 3.10. Natpisna pločica sinkronog motora

Motori se napajaju iz različitih izvora napajanja. Asinkroni motor napaja se iz trofaznog auto transformatora koji omogućava ručno podešavanje željene naponske razine te je to jedini dio u cijeloj stanici koji nije u potpunosti automatiziran i zahtjeva rad operatera. Za napajanje sinkronog motora zadužen je motorski modul (eng. *Single Motor Module*) koji generiraju točno određene napone i frekvencije za pravilno upravljanje opterećenim motorom. Motorski modul samo je jedan modularnog sustava frekvencijskog pretvarača SINAMICS S120. Radi se o modularnom sustavu za upravljanje motorima u industrijskim pogonima gdje se zahtjeva velika preciznost i pouzdanost. Glavni naglasak ovog sustava je fleksibilnost i modularnost čime je omogućeno ispunjavanje gotovo svih zahtjeva nekog procesa. U ovom laboratorijskom postavu modularni frekvencijski pretvarač sastoji se od četiri dijela. Upravljačka jedinica (eng. *Control Unit*) centralni je dio sustava. Omogućuje komunikaciju između pojedinih dijelova sustava i s krajnjim korisnikom koristeći DRIVE-CLiQ sučelje. Aktivni linijski modul (eng. *Infeed*) zadužen je za napajanje modularnog sustava električnom energijom. Sastoji se od ispravljačkog sklopa koji na izlazu daje konstantni istosmjerni napon koji napaja motorske module. Također omogućuje i regenerativno kočenje u generatorskom režimu rada kada energija teče iz motora prema mreži. Da bi napajanje sustava bilo neometano i zaštićeno od vanjskih smetnji i utjecaja, na ulazu je postavljen mrežni filter (eng. *Active Interface Module*) koji sadrži filtre energetske elektronike.



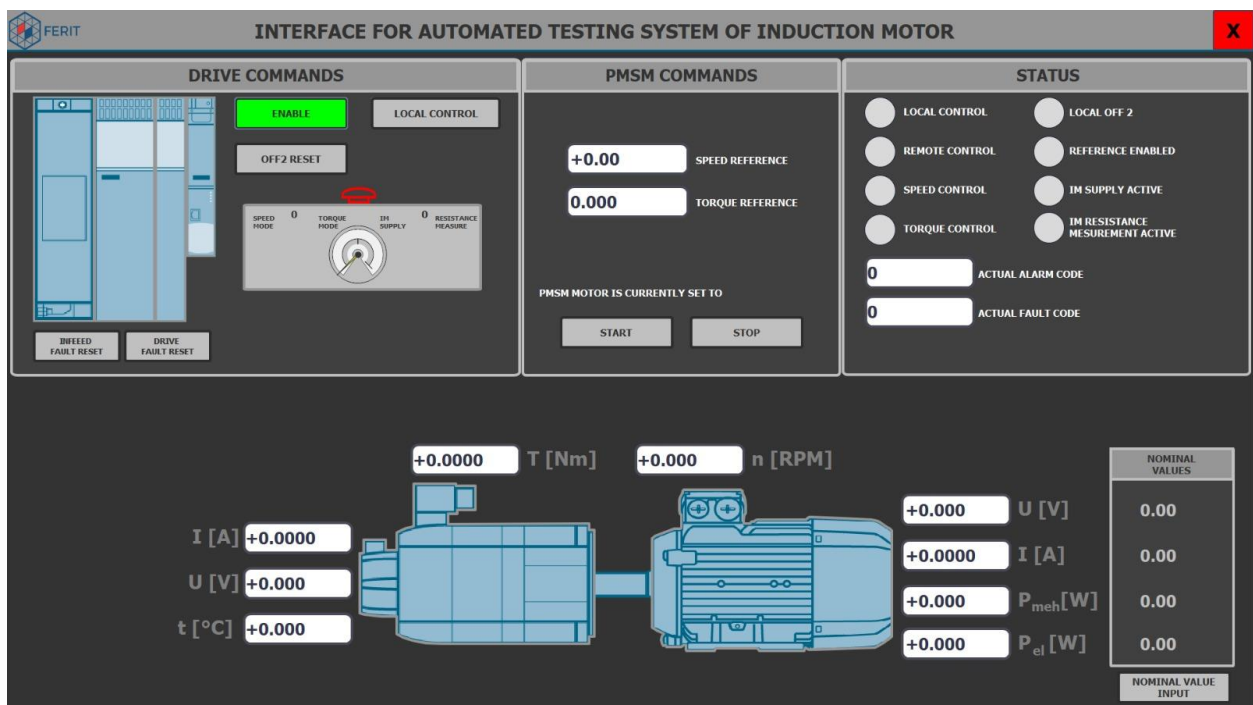
Slika 3.11. SINAMICS S120 sustav

Programibilni logički upravljač (PLC) upravlja cijelim navedenim sustavom. Korišten je PLC proizvođača Siemens, model *S7-1200*. Ovaj model PLC-a namijenjen je za zadaće upravljanja do srednje složenosti upravljačkih sustava. Optimalno je rješenje za ovaj laboratorijski postav zbog svojih zadovoljavajućih performansi i fleksibilnosti koju nudi u smislu komunikacijskih mogućnosti. Komunikacija s ostalim dijelovima sustava i računalom odvija se preko PROFINET (Ethernet) veze. Dodatne informacije o ovom modelu PLC-a može se pročitati u [25]. PLC također prikuplja podatke o brzini sa rezolvera te ih zajedno s podacima o momentu prosljeđuje na osobno računalo na daljnju obradu pomoću otvorene komunikacijske platforme, OPC (eng. *Open Platform Communications*). Radi se o nizu standarda koji omogućuju komunikaciju i razmjenu podataka u stvarnom vremenu između upravljačkih uređaja različitih proizvođača. Vrlo široku primjenu nalazi u industrijskoj telekomunikaciji, automatizaciji zgrada, diskretnoj proizvodnji, kontroli procesa i mnogim drugima.

Za ispravan rad PLC-a, isti je potrebno konfigurirati za što je potrebna programska podrška koja također omogućava i programiranje PLC-a u nekom od programskih jezika, ali i nadzor njihovog rada i dijagnostiku te brzo otklanjanje pogrešaka u radu. Programska podrška izvodi se na

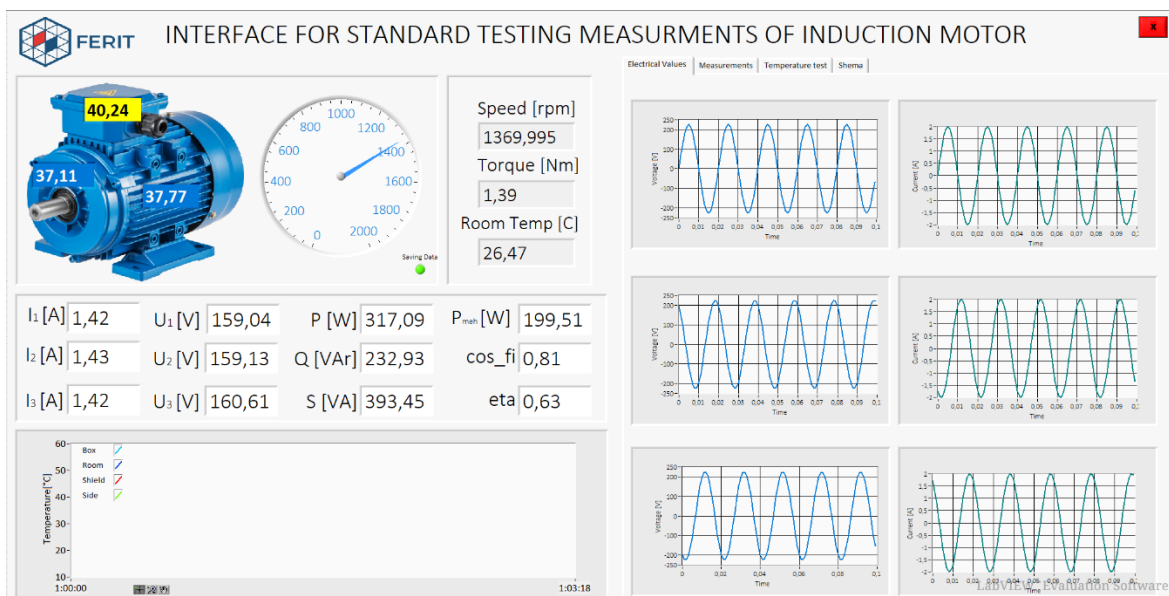


osobnim računalima koji se serijski povezuju na komunikacijsku mrežu sustava automatizacije. Za sve Siemens uređaje za automatizaciju i nadzorno upravljanje koristi se razvojni programski alat TIA portal (eng. *Totally Integrated Automation Portal*). Sastoji se od programskog alata STEP 7 Basic koji služi za izradu i razvoj upravljačkih aplikacija PLC-a te alata WinCC za izradu SCADA sučelja. Postojeći laboratorijski postav sastoji se od dva korisnička sučelja. Jedno sučelje operateru omogućava upravljanje industrijskom opremom i motorima. Izrađeno je pomoću WinCC programskog paketa. Također je izrađena maketa za tzv. *remote control* ili upravljanje na daljinu. Odabirom odgovarajućih stanja grebenastih sklopki, te zadavanjem analognih vrijednosti uz pomoć potenciometra, na maketi se mogu zadati svi zahtjevi kao i na samom korisničkom sučelju.



Slika 3.12. Kontrolno korisničko sučelje

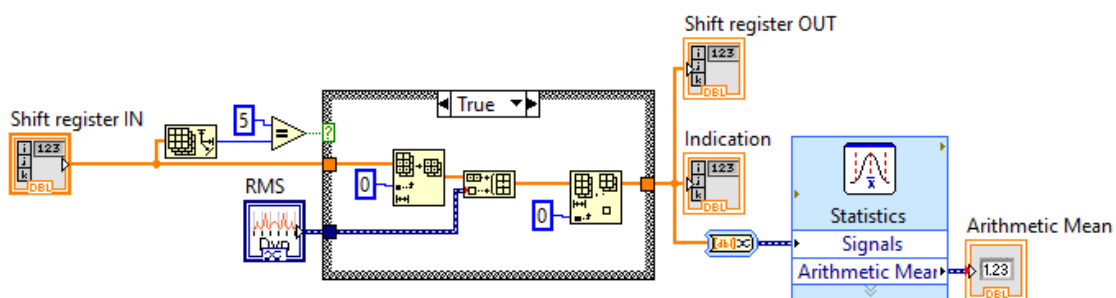
Drugo korisničko sučelje odnosi se na sustav mjerenja kojim je postojeći laboratorijski postav proširen. Sučelje je u potpunosti izrađeno u programskom paketu LabVIEW te su na njemu prikazani svi bitni podaci ispitivanog motora, uključujući električne i neelektrične veličine kao što su temperature pojedinih dijelova motora. Osim prikaza stanja motora, ovo sučelje prikuplja sve mjerene podatke i obrađuje ih na točno određen način.



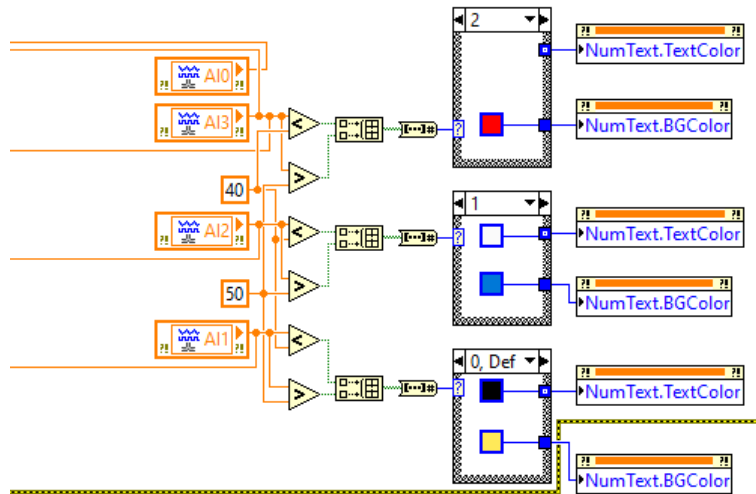
Slika 3.13. Mjerno korisničko sučelje

### 3.4. Programaska podrška

Koristeći strujna kliješta te naponske diferencijalne sonde, sustav prikuplja sa svakog člana 1000 trenutnih vrijednosti iz kojih izračuna jednu stvarnu efektivnu vrijednost te je napravljen program koji pravi niz od 10 takvih vrijednosti i iz njih računa prosječnu vrijednost koju onda prikazuje na korisničkom zaslonu. Svaka nova izračunata RMS vrijednost zamjenjuje najstariju u nizu i prikaz na zaslonu kontinuirano pokazuje rezultate vrlo velike preciznosti.

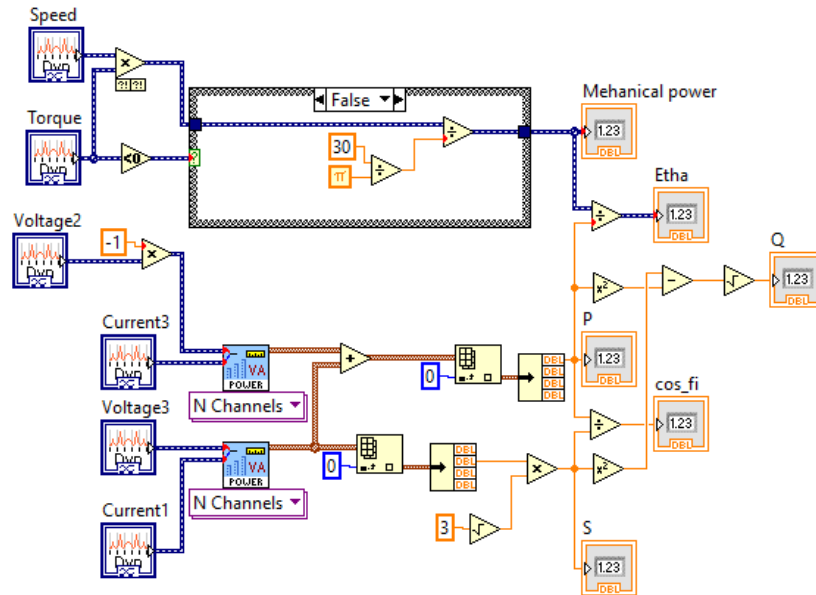


Slika 3.14. Dio koda koji računa efektivnu vrijednost po tzv. *moving average* principu

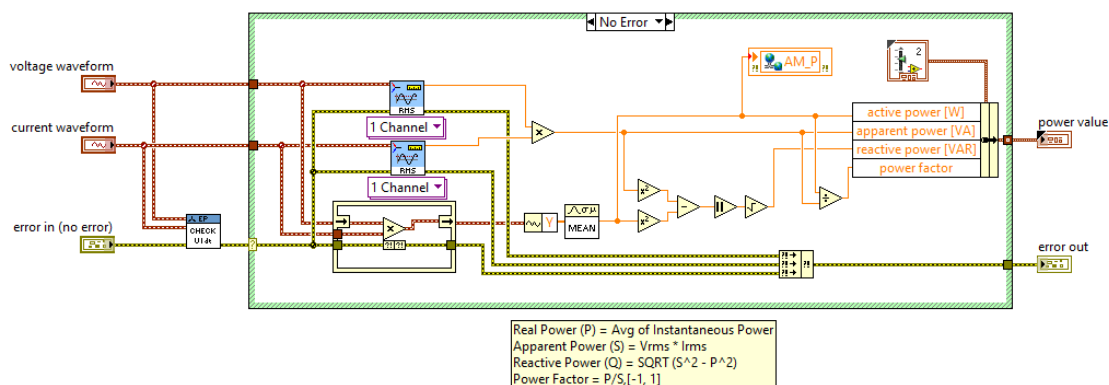


Slika 3.15. Monitoring temperatura motora

Izrađeno je HMI sučelje (slika 3.13.) sa prikazom ispitivanog asinkronog motora i temperaturama određenih dijelova motora. Povećavanjem temperature dolazi do promjene boje na način da je žutom bojom označeno područje radne temperature motora, a crvenom temperatura motora iznad radne.

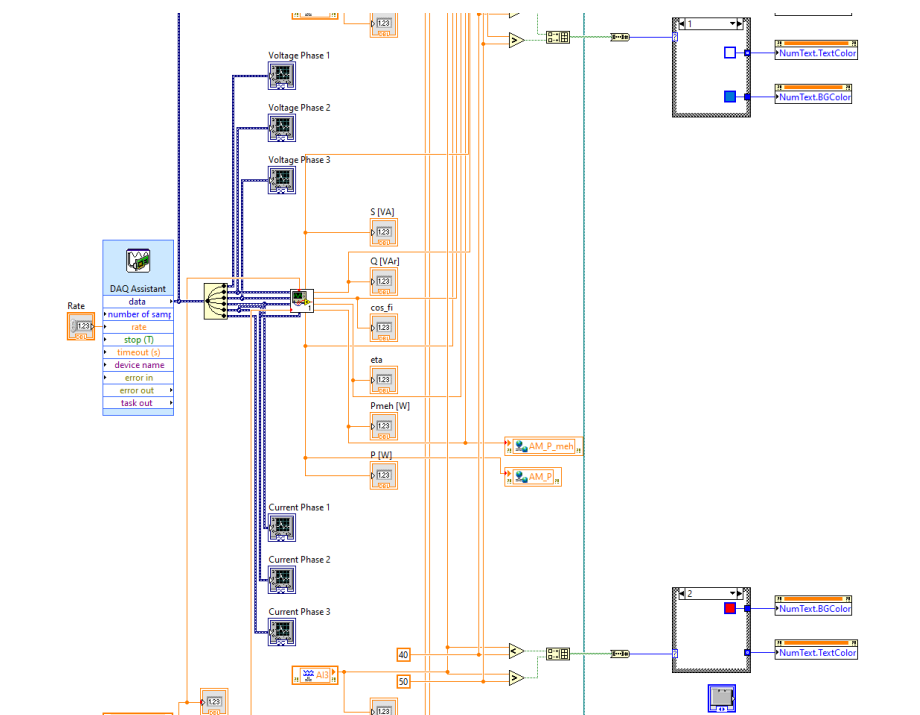


Slika 3.16. Izračun snaga, korisnosti i faktora snage



Slika 3.17. Izračun snaga

Prema matematičkim relacijama iz poglavlja 3.1.4, napravljen je poseban VI u koji su se uvodile mjerene električne vrijednosti te izračunavale sve snage, korisnost i faktor snage. Sve izračunate vrijednosti prosljeđene su i prikazane na korisničkom sučelju.



Slika 3.18. LabVIEW blok dijagram

## 4. PRIKAZ, OBRADA I ANALIZA REZULTATA MJERENJA

Tijekom ispitivanja asinkronog motora u sklopu automatizirane stanice, prikupljaju se podaci električnih veličina u točno određenim vremenskim intervalima. Ovisno o pokusu koji se provodi, mijenja se i vremenski interval uzorkovanja podataka. Kao rezultat mjerenja dobivaju se parovi mjerenih vrijednosti  $(x_i, y_i)$  koji kada se unesu u koordinatni sustav tvore mjerene točke. Ukoliko između izmjerenih fizikalnih veličina postoji linearna ovisnost, tada se u koordinatnom sustavu može nacrtati pravac takav da „od oka“ najbolje odgovara mjernim točkama. Pri tome sve točke neće ležati na nacrtanom pravcu, nego bi broj točaka iznad i ispod pravca trebao biti podjednak. Iz grafičkog prikaza može se interpolacijskim i ekstrapolacijskim postupcima procijeniti vrijednosti fizikalne veličine  $y$  i za one vrijednosti veličine  $x$  koje nisu izmjerene. Interpolacijski postupak daje vrijednost točke koja se nalazi između dvije mjerene točke, dok ekstrapolacijski postupak kao rezultat daje procjenu vrijednosti veličine  $y$  u području izvan mjerenih točaka. Pri tome uvijek treba biti vrlo pažljiv jer je moguće da u tom području pojava koja se promatra odstupa od ponašanja koje je uočeno i izmjereno [26].

Problem koji se javlja kod grafičkih metoda jest određivanje pravca koji predstavlja najbolju prilagodbu (tzv. *best-fit*) na mjerene podatke. Za linearnu ovisnost mjernih podataka, najbolje prilagođen pravac (*best-fit*) trebao bi optimizirati parametre pravca tako da se minimizira ukupno odstupanje mjernih podataka od pravca. Da bi se odredili optimizirani parametri, primjenjuje se statistički postupak linearne regresije i metoda najmanjih kvadrata.

### 4.1. Linearna regresija

Rješavanje problema i zadataka u inženjerstvu i znanosti često uključuje istraživanje međuovisnosti između dvije ili više varijabli. Regresijska analiza je statistička metoda vrlo korisna pri rješavanju ovakvih zadataka te omogućava izradu modela za predviđanje određenih parametara. Model se također može koristiti u svrhu kontrole procesa, ali i za optimizaciju, kao što je pronalazak najpovoljnijih trenutaka i parametara nekog procesa. Podaci nad kojim se vrši regresijska analiza većinom su dani u obliku tablice kao skup parova mjerenih vrijednosti  $(x_i, y_i)$ . Taj skup u dvodimenzionalnom koordinatnom sustavu predstavlja točke koje će na karakteristikama u izvještaju biti nazvane „mjerene točke“. Stupanj polinomne aproksimacije nad zadanim podacima može se odrediti iz fizikalnih znanja o veličinama koje se mjere, no ukoliko nam to nije poznato, tada se iz rasipanja mjerenih točaka može se donijeti zaključak o vrsti polinoma koji opisuje krivulju kroz te točke. Tada se regresijski model promatra kao empirijski model.



Najjednostavniji primjer regresijskog modela je linearni model prvog stupnja (4-1), koji u dvodimenzionalnom koordinatnom sustavu predstavlja pravac.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon \quad (4-1)$$

Model sadrži jednu regresijsku varijablu  $x$  o kojoj ovisi zavisna varijabla  $Y$ , a nepoznati regresijski koeficijenti su  $\beta_0$  i  $\beta_1$  te se njih želi estimirati. Oznaka  $\epsilon$  predstavlja odstupanje između stvarne mjerene točke i aproksimirane točke na pravcu, a koje nastaje kao posljedica svih utjecajnih varijabli koje nisu uključene u model, a djeluju na zavisnu varijablu  $Y$ .

Složenije polinomne funkcije, također se mogu analizirati koristeći linearnu regresiju.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \epsilon \quad (4-2)$$

Ukoliko se u kubni polinom opisan izrazom (4-2) uvede supstitucija  $x_1 = x, x_2 = x^2, x_3 = x^3$ , tada se dobiva izraz (4-3) koji je linearni regresijski model s tri regresora.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \epsilon \quad (4-3)$$

Vrlo često se regresijski model koristi kao funkcija aproksimacije, pri čemu je stvarna ovisnost između zavisne varijable i regresora nepoznata, ali u određenom rasponu nezavisnih varijabli, linearni regresijski model predstavlja zadovoljavajuću aproksimaciju. Postupak aproksimacije započinje jednadžbom koja određuje estimaciju zavisne varijable.

$$\hat{y}_k = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x + \hat{\epsilon}_k \quad (4-4)$$

Pri tome su  $\hat{\beta}_0$  i  $\hat{\beta}_1$  aproksimacije parametara  $\beta_0$  i  $\beta_1$ , a  $\hat{y}_k$  je procjena zavisne varijable  $y$ . Razlika između stvarne vrijednosti zavisne varijable i aproksimirane vrijednosti zavisne varijable naziva se odstupanje i jednako je estimiranoj vrijednosti pogreške.

$$\hat{\epsilon}_k = y_k - \hat{y}_k \quad (4-5)$$

Estimacija koeficijenata treba rezultirati pravcem koji je predstavlja najbolje prilagođen pravac, tzv. *best-fit*, takav da se minimizira ukupno odstupanje mjerenih podataka od pravca.

## 4.2. Metoda najmanjih kvadrata

Prema [27] metoda najmanjih kvadrata može se koristiti za procjenu regresijskih koeficijenata linearnog regresijskog modela, pri kojima će zbroj kvadrata odstupanja biti najmanji.

Pretpostavimo  $n$  parova mjerenih vrijednosti  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ . Ti parovi mjerenih vrijednosti mogu se izraziti kao:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \epsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4-6)$$

Suma kvadrata odstupanja dana je izrazom (4-7).

$$L = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2 \quad (4-7)$$

Procjena najmanjih kvadrata  $\beta_0$  i  $\beta_1$ , odnosno  $\hat{\beta}_0$  i  $\hat{\beta}_1$  moraju zadovoljiti izraze:

$$\frac{\partial L}{\partial \beta_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i) = 0 \quad (4-8)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \beta_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i) x_i = 0 \quad (4-9)$$

Pojednostavljenjem izraza (4-8) i (4-9) dobiva se:

$$n\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i \quad (4-10)$$

$$\hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n x_i + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i x_i \quad (4-11)$$

Jednadžbe (4-10) i (4-11) nazivaju se normalne jednadžbe najmanjih kvadrata. Rješenje tih jednadžbi su najbolje procjene koeficijenata  $\hat{\beta}_0$  i  $\hat{\beta}_1$ .

### 4.3. Matlab

Matlab ima unaprijed implementirane funkcije koje omogućuju obavljanje različitih operacija nad polinomima, kao što je integriranje, deriviranje, množenje, dijeljenje i sl.

Općeniti zapis polinoma  $n$ -tog reda:

$$y(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0 \quad (4-12)$$

može se u Matlab zapisati kao vektor dimenzija  $[n \times 1]$ , pri čemu svaki element predstavlja koeficijente polinoma počevši od najvišeg ( $n$ -tog) pa sve do koeficijenta uz potenciju nula. Jedna od implementiranih funkcija je *polyval* funkcija koja procjenjuje vrijednosti nezavisne varijable  $y$  prema zadanoj zavisnoj varijabli  $x$  i koeficijentima polinoma.

$$y = polyval(p, x) \quad (4-13)$$

Pri tome  $p$  predstavlja vektor koeficijenata polinoma, a  $y$  je rezultat polinoma za vrijednost  $x$ .

Funkcija *polyfit* još jedna je funkcija Matlab-a koja provodi metodu najmanjih kvadrata nad polinomom za zadane podatke. Funkcija kao rezultat daje koeficijente polinoma  $n$ -tog reda, koji se mogu koristiti za crtanje krivulje koja najbolje odgovara danim podacima  $x$  i  $y$  (tzv. *best-fit*).

$$p = polyfit(x, y, n) \quad (4-14)$$

## 4.4. Primjer ispitne procedure asinkronog motora

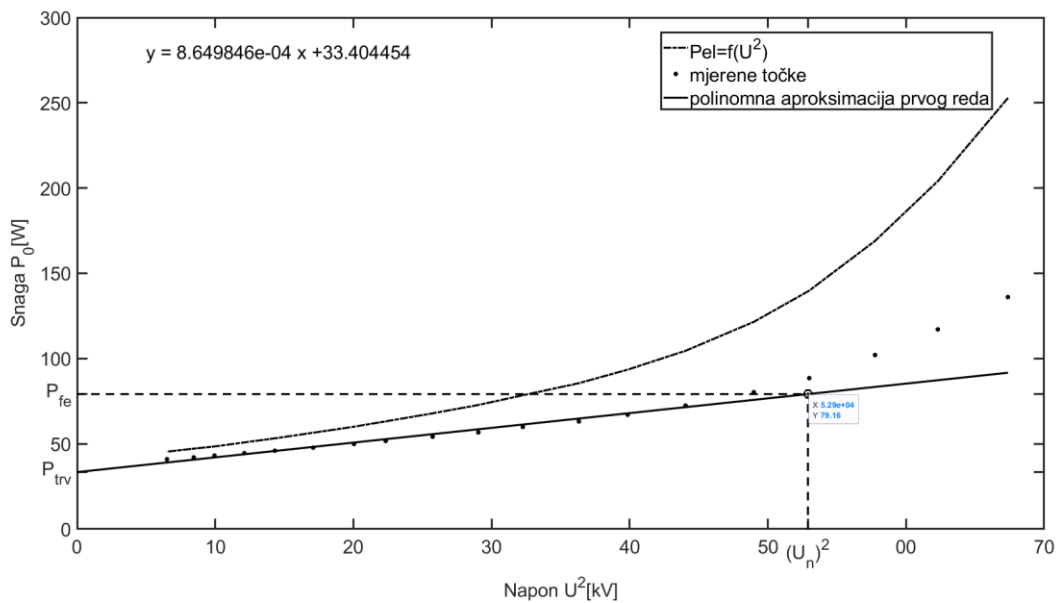
Na primjeru asinkronog motora proizvođača Končar, nazivnih podataka prikazanih slikom 2.4. provedeno je automatizirano ispitivanje opisano u ovom radu. U sklopu programskog okruženja Matlab izračunati su svi nazivni podaci motora kao i elementi nadomjesne sheme. Također prikazane su sve karakteristike iz kojih se može promotriti rad motora u svim područjima rada. Na svakom grafu, prikazana je jednadžba polinomne aproksimacije krivulje sa točno određenim stupnjem.

### 4.4.1. Pokus praznog hoda:

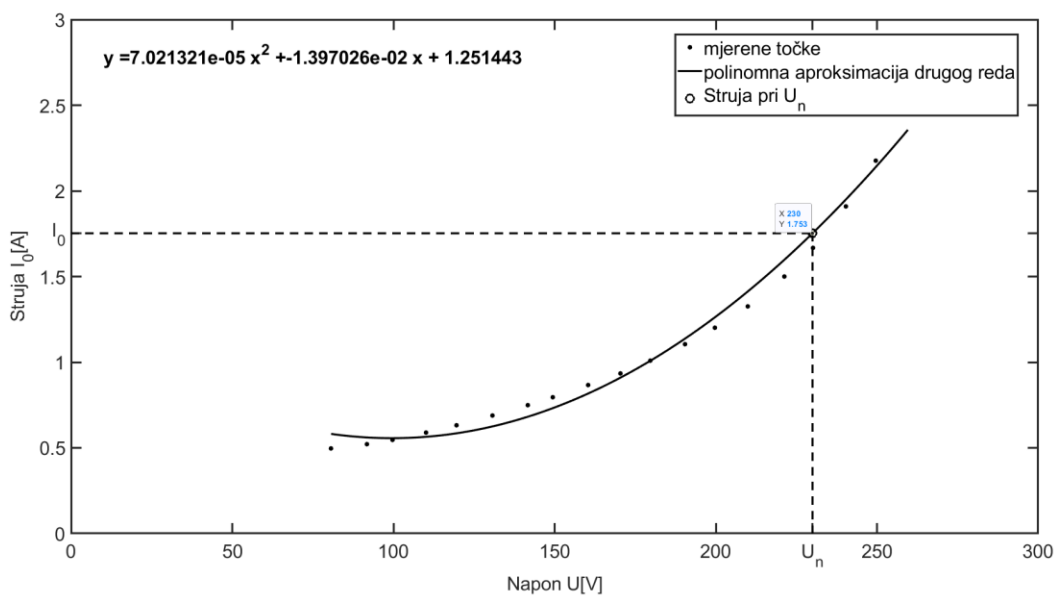
Kao rezultat pokusa praznog hoda određeni su gubici u željezu, gubici u bakru, gubici trenja i ventilacije, određena je nazivna struja magnetiziranja kao i poprečni elementi nadomjesne sheme asinkronog motora. Svi rezultati pokusa praznog hoda prikazani su u tablici 4.1. Kako je ispitivani motor manje snage, struja statora u praznom hodu nije mala kao što je to slučaj kod velikih asinkronih motora, pa gubici u bakru i nisu toliko zanemarivi u odnosu na nazivne gubitke.

Tablica 4.1. Rezultati pokusa praznog hoda asinkronog motora

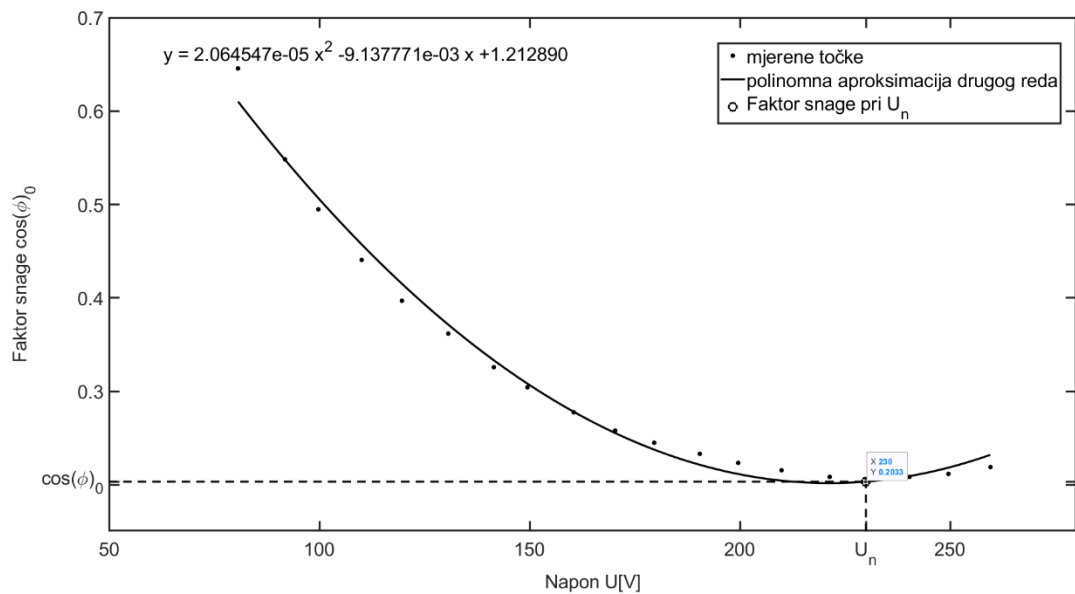
Veličina	Vrijednost
$P_{tr,v}$ [W]	33,404
$P_{fe}$ [W]	79,162
$P_{Cu}$ [W]	51,151
$I_0$ [A]	1,753
$\cos \varphi_0$	0,203
$R_0$ [ $\Omega$ ]	6,686
$L_m$ [H]	0,296



Slika 4.1 Ovisnost snage praznog hoda o kvadratu napona



Slika 4.2 Ovisnost struje praznog hoda o naponu



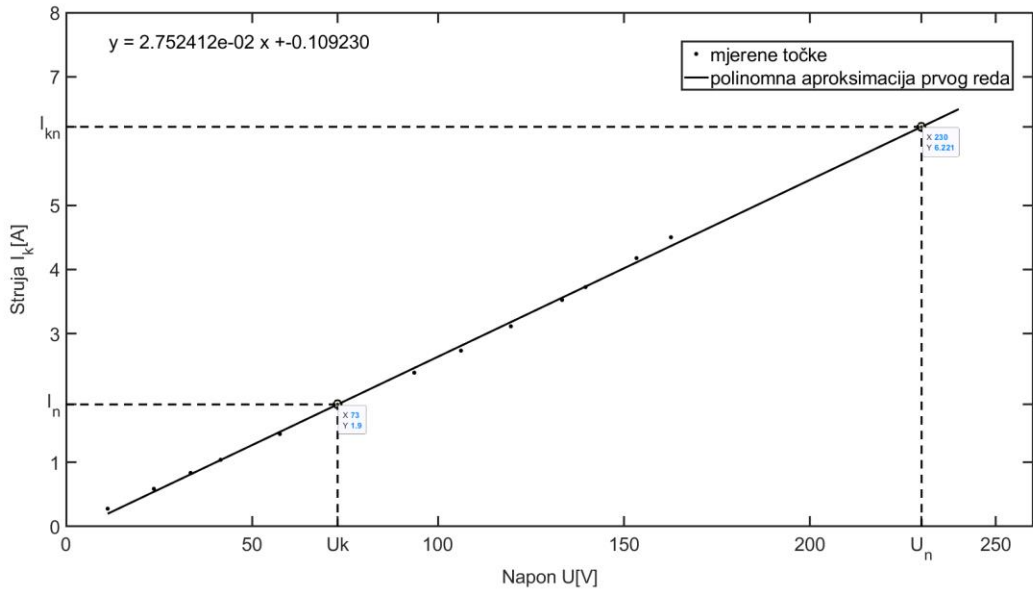
Slika 4.3 Ovisnost faktora snage o naponu

#### 4.4.2. Pokus kratkog spoja:

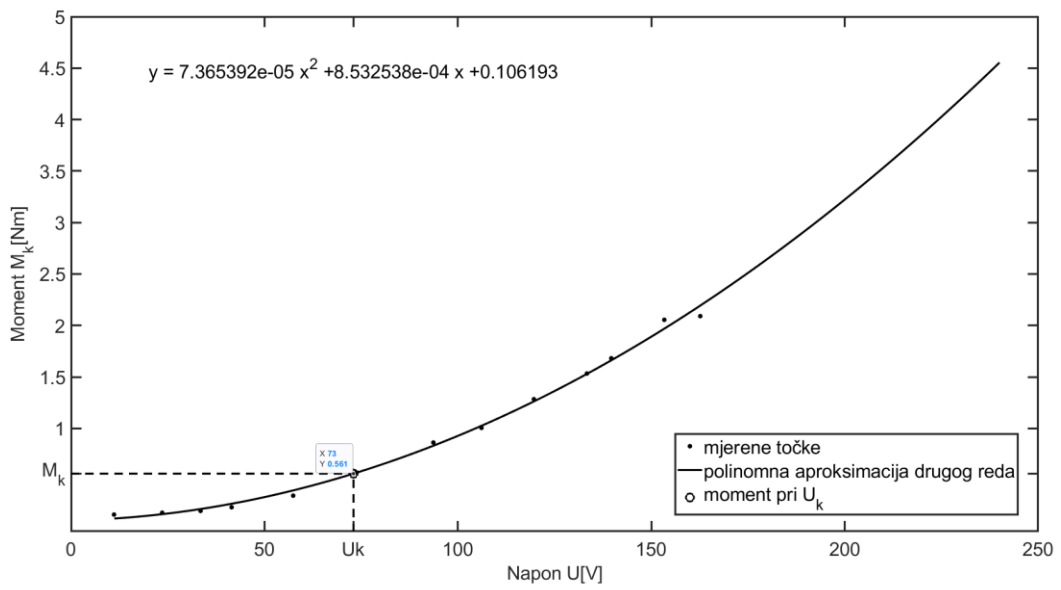
Iz pokusa kratkog spoja izračunavaju se vrijednosti uzdužnih elemenata nadomjesne sheme asinkronog motora, određuje se potezni moment motora te se dobivaju karakteristike  $I_k = f(U)$ ,  $M_k = f(U)$ ,  $P_k = f(U)$ ,  $\cos \varphi_k = f(U)$ . Rezultati pokusa prikazani su tablicom 4.2. Značajnu ulogu na izgled karakteristika ima promjena otpora kao posljedica zagrijavanja. Zato se mjerenje provodi što brže kako bi se namoti što manje zagrijali i imali konstantan iznos onoliko koliko je to moguće.

Tablica 4.2. Rezultati pokusa kratkog spoja asinkronog motora

Veličina	Vrijednost
$U_k$ [V]	72,999
$I_{kn}$ [A]	6,221
$M_k$ [Nm]	4,199
$P_k$ [W]	178,68
$\cos \varphi_k$	0,769
$R_r$ [ $\Omega$ ]	6,801
$R_s$ [ $\Omega$ ]	7,647
$L_{\sigma s}$ [H]	0,036
$L'_{\sigma r}$ [H]	0,036

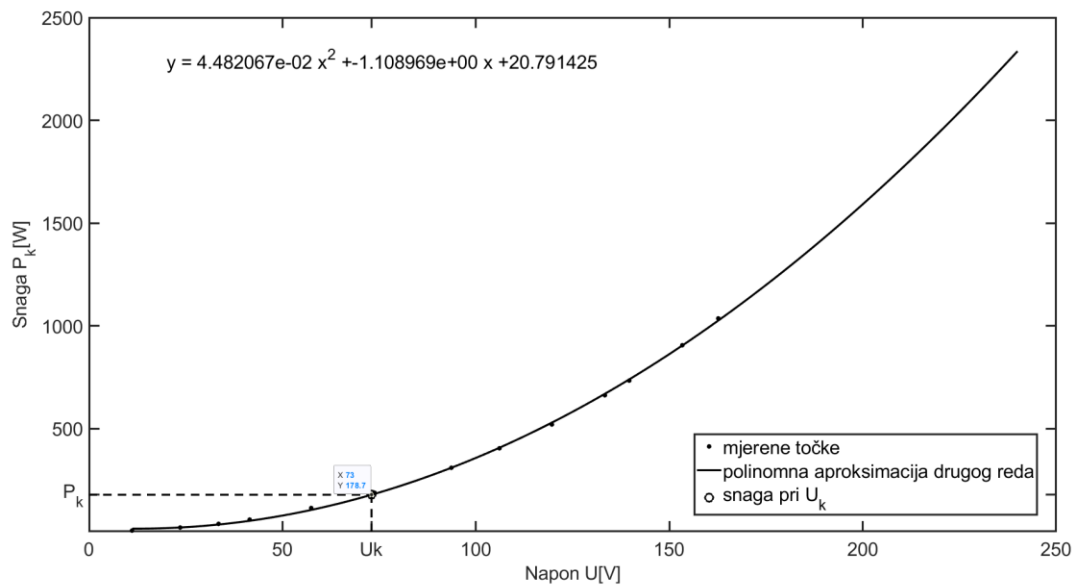


Slika 4.4 Ovisnost struje kratkog spoja o naponu

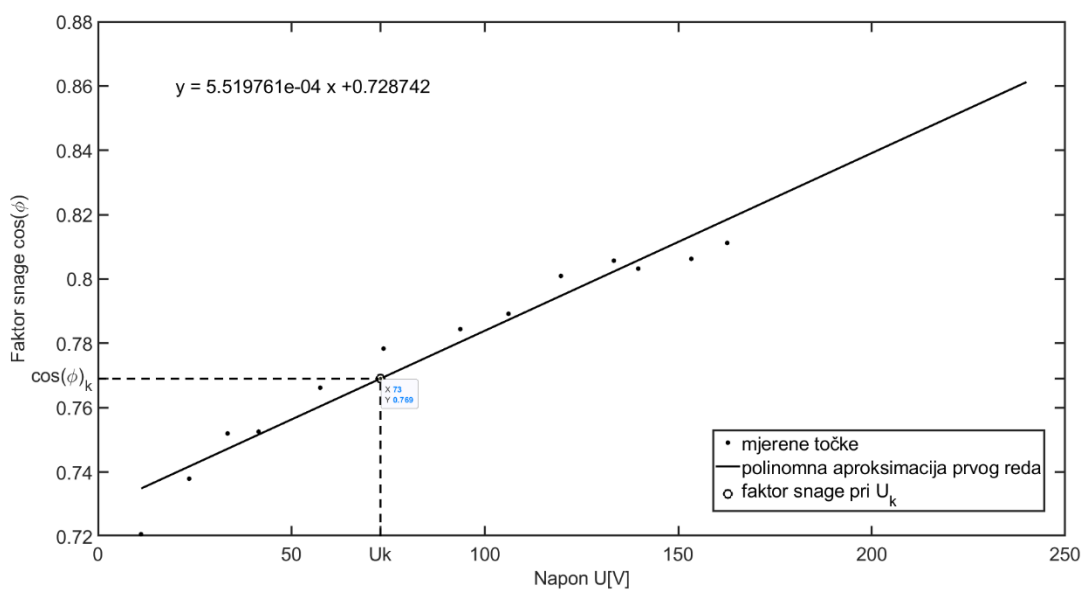


Slika 4.5 Ovisnost momenta kratkog spoja o naponu





Slika 4.6 Ovisnost snage o naponu



Slika 4.7 Ovisnost faktora snage o naponu

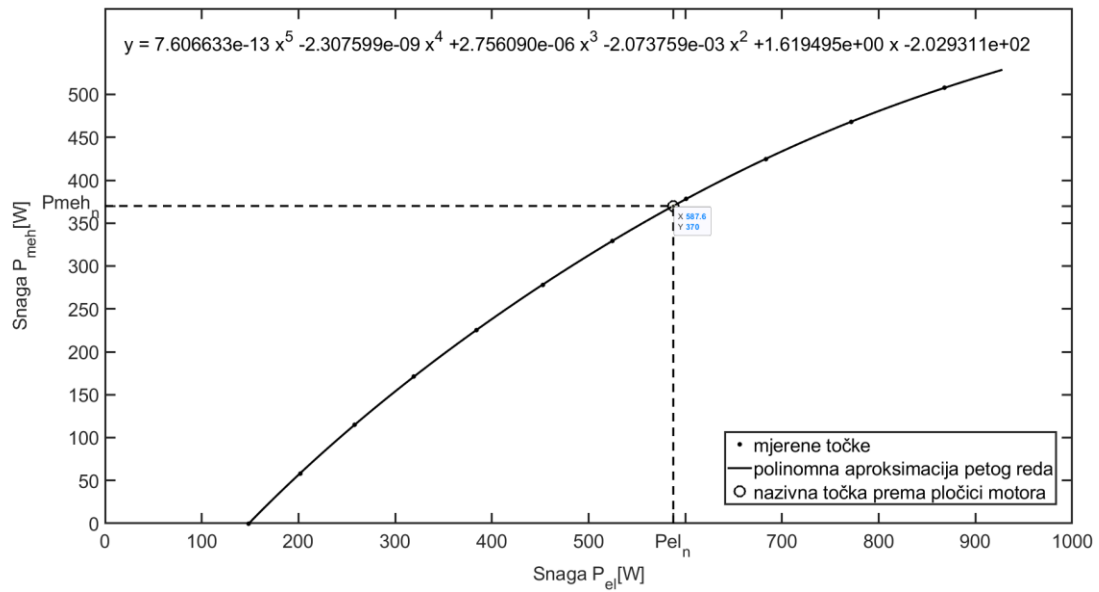
#### 4.4.3. Pokus opterećenja:

Pokus opterećenja proveden je na nazivnom naponu  $U_n = 230$  V, ali i također na naponima 215 V i 245 V. Kao rezultat pokusa dobivene su nazivne vrijednosti motora, koje su prikazane u tablici 4.3. gdje su uspoređene sa vrijednostima sa nazivne pločice. Zbog rasipanja karakteristika motora svakako dolazi do odstupanja od podataka izmjerenih na motoru, no prema IEC 34-1 propisima, sva dobivena odstupanja značajno su ispod dozvoljenih granica. Zaključuje se kako se ovim automatiziranim postavom dobivaju vrlo precizni rezultati s minimalnom pogreškom. Ističe se podatak o klizanju pri kojemu izmjereno nazivno klizanje odstupa samo 8,1% od klizanja prema nazivnoj pločici što u usporedbi sa klasičnim načinom provođenja pokusa predstavlja velik napredak. Naime klizanje je kao veličina vrlo osjetljivo na pogreške pri računanju te mala pogreška pri izračunu brzine, rezultira velikim odstupanjem klizanja i do 30%.

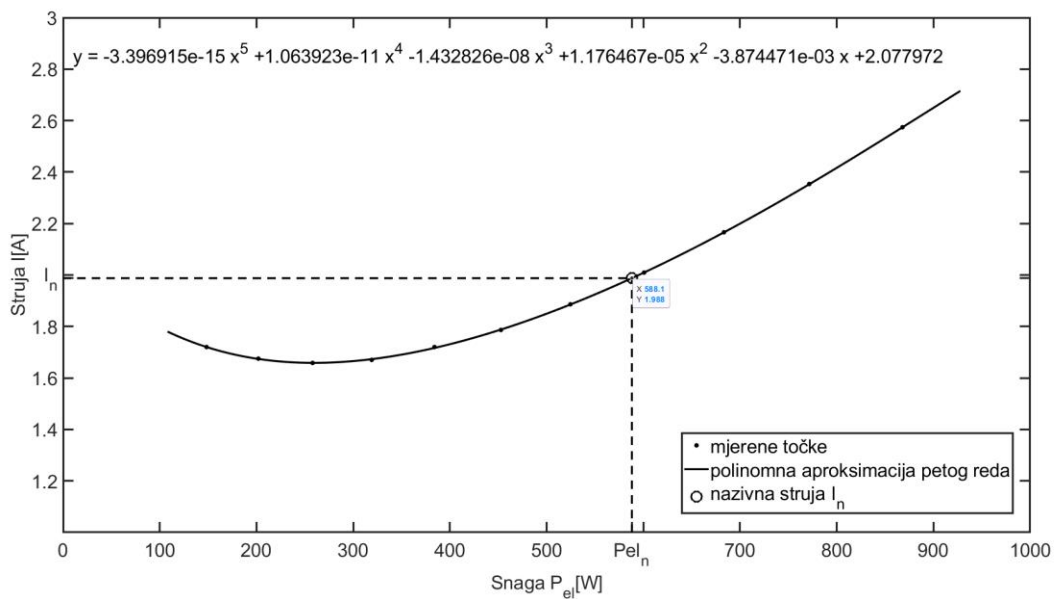
Tablica 4.3. Usporedba izmjerenih nazivnih vrijednosti s vrijednostima na natpisnoj pločici

Veličina	Nazivni podaci prema natpisnoj pločici	Nazivni podaci prema pokusu opterećenja	Odstupanje [%]
$P_{el}$ [W]	552,5	588,1	6,05
$M_n$ [Nm]	2,579	2,563	0,62
$I_n$ [A]	1,9	1,988	4,43
$n_n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	1370	1379,67	0,7
$\cos \varphi_n$	0,73	0,7311	0,15
$\eta_n$	0,6696	0,6314	6,05
$s$	0,0867	0,0802	8,1
$P_g$	182,5	222,8665	18,11

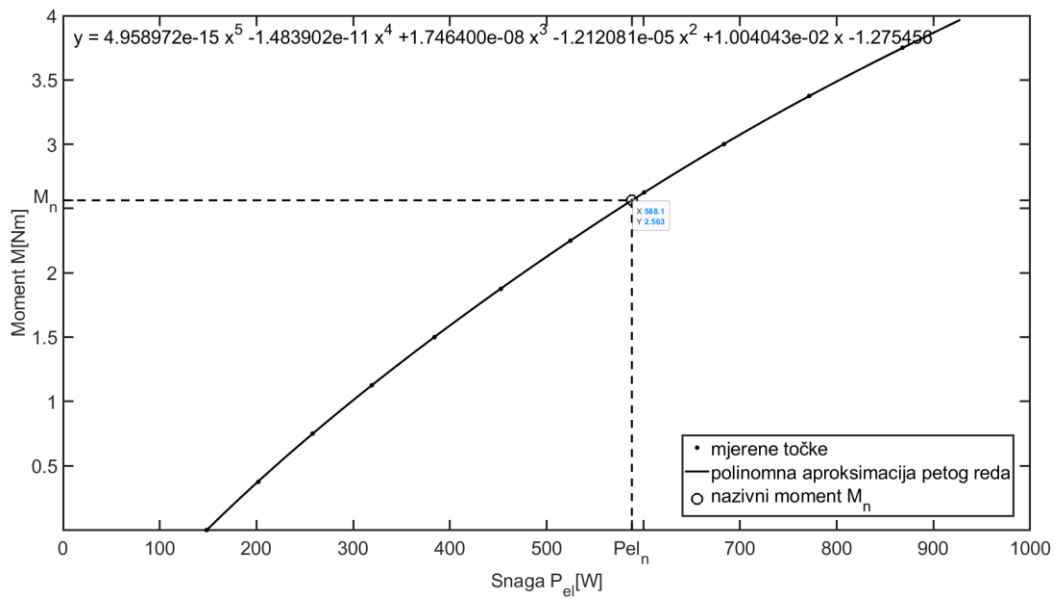
### Karakteristike opterećenja za napon 230 V:



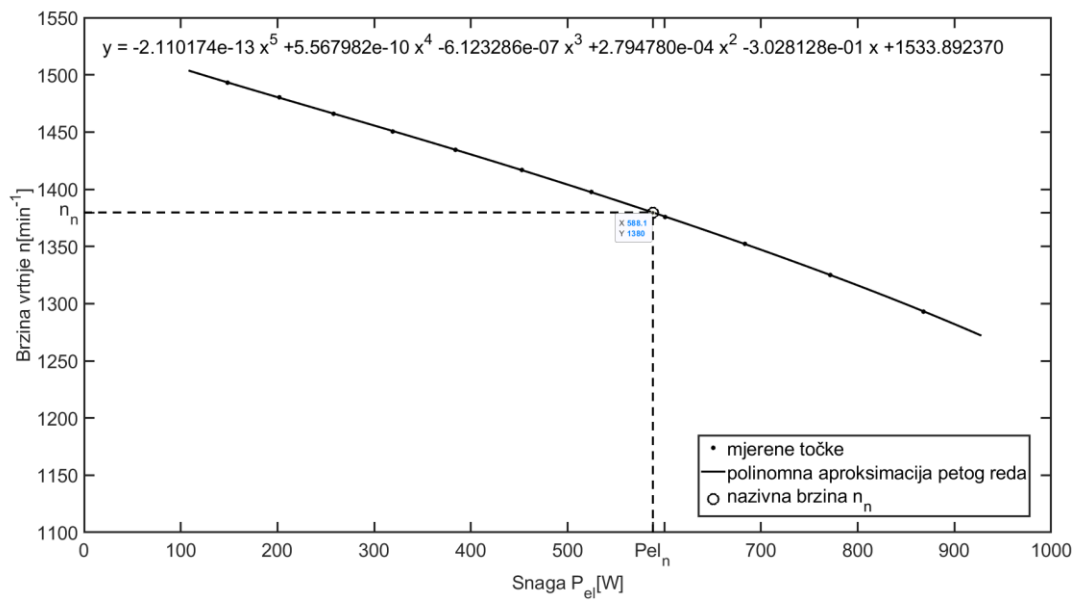
Slika 4.8 Ovisnost mehaničke i električne snage



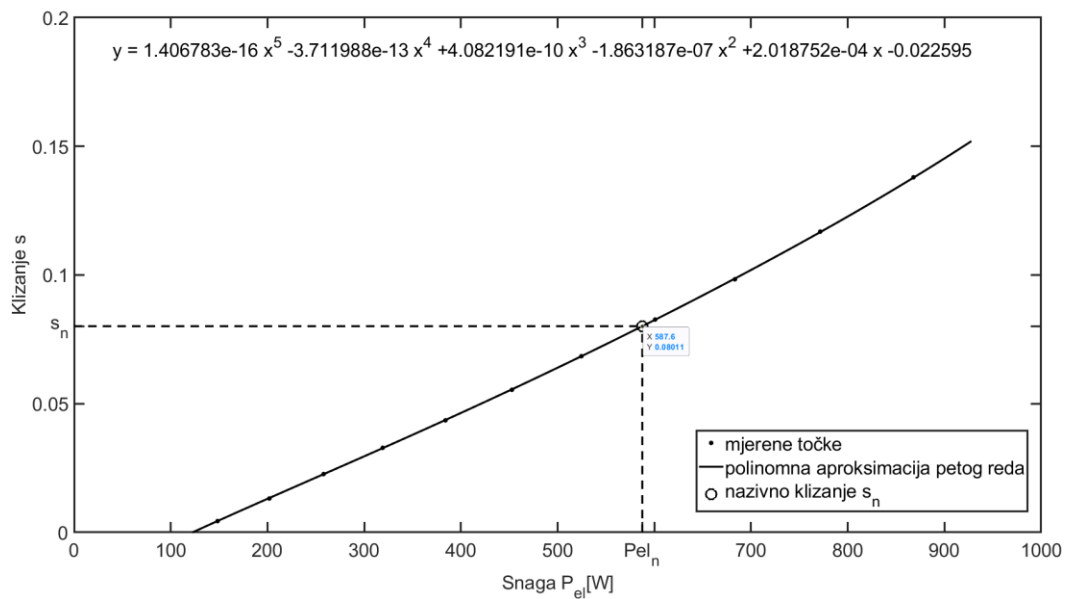
Slika 4.9 Ovisnost struje o snazi uzetoj iz mreže



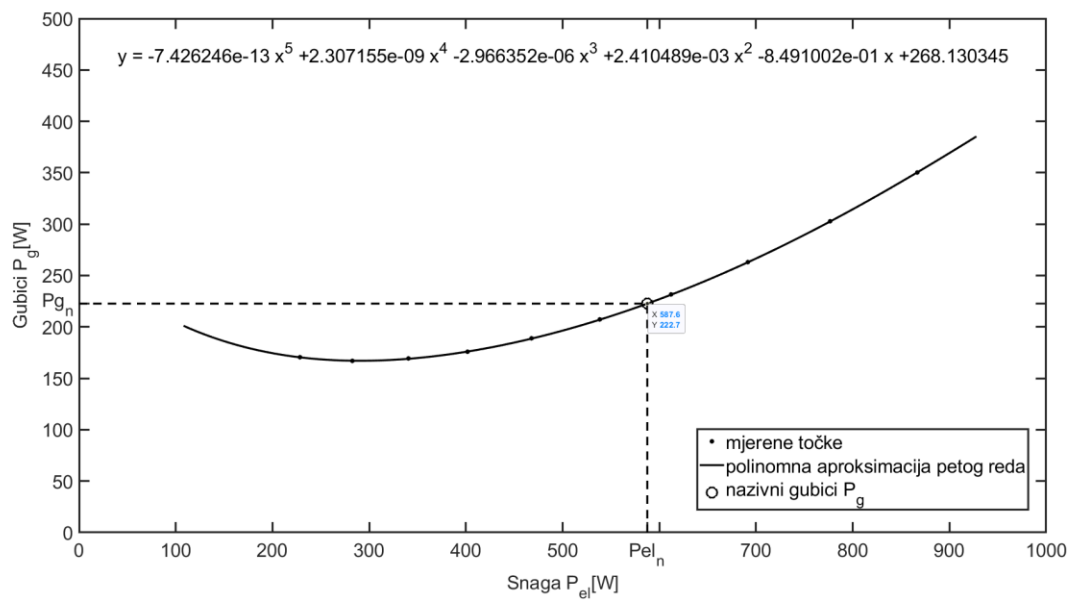
Slika 4.10 Ovisnost momenta o snazi uzetoj iz mreže



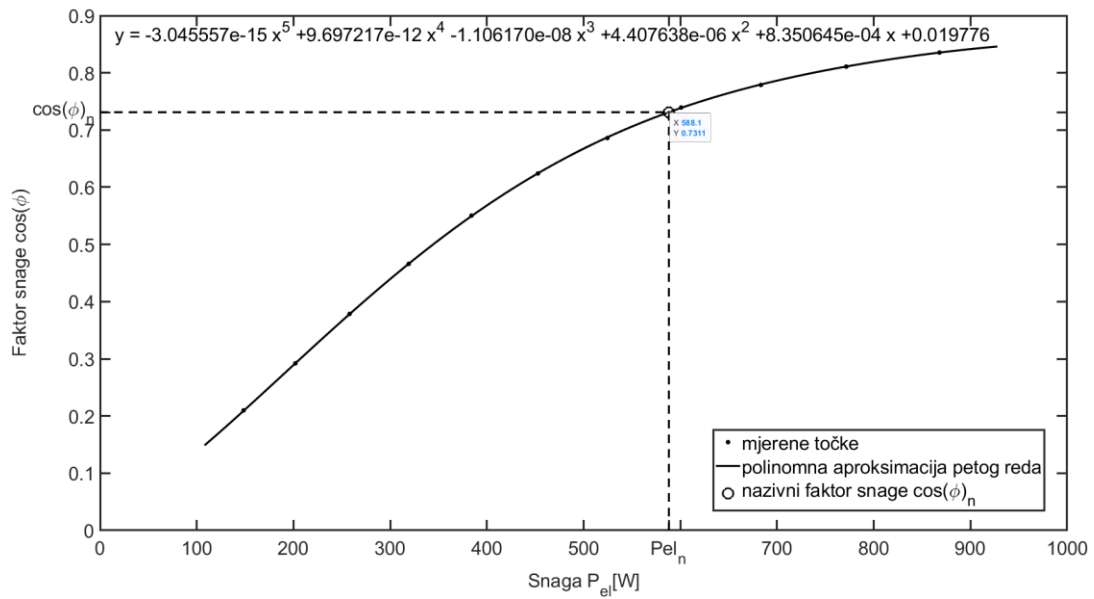
Slika 4.11 Ovisnost brzine vrtnje o snazi uzetoj iz mreže



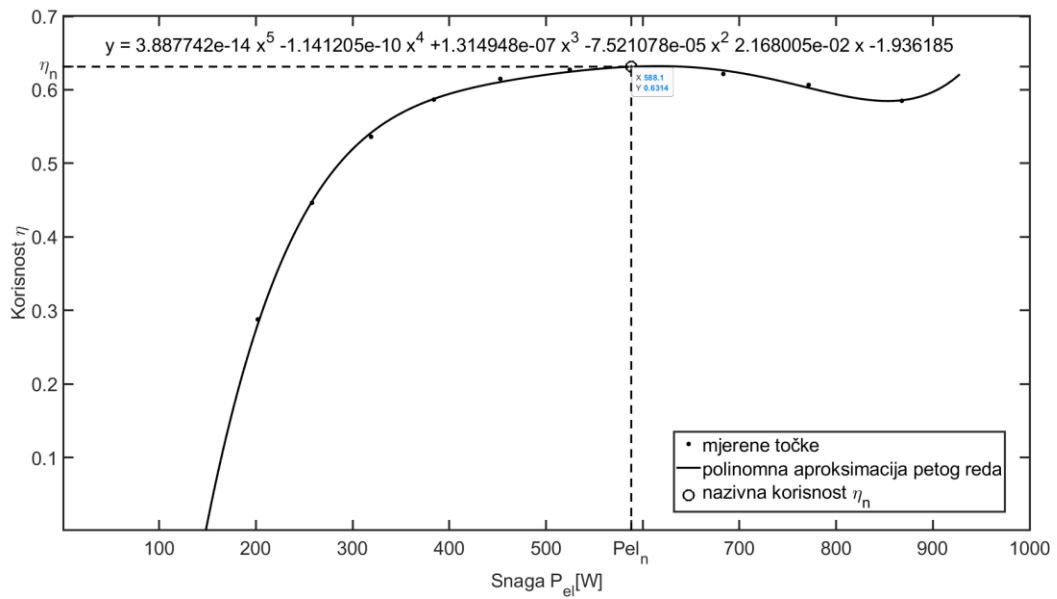
Slika 4.12 Ovisnost klizanja o snazi uzetoj iz mreže



Slika 4.13 Ovisnost gubitaka snage o snazi uzetoj iz mreže

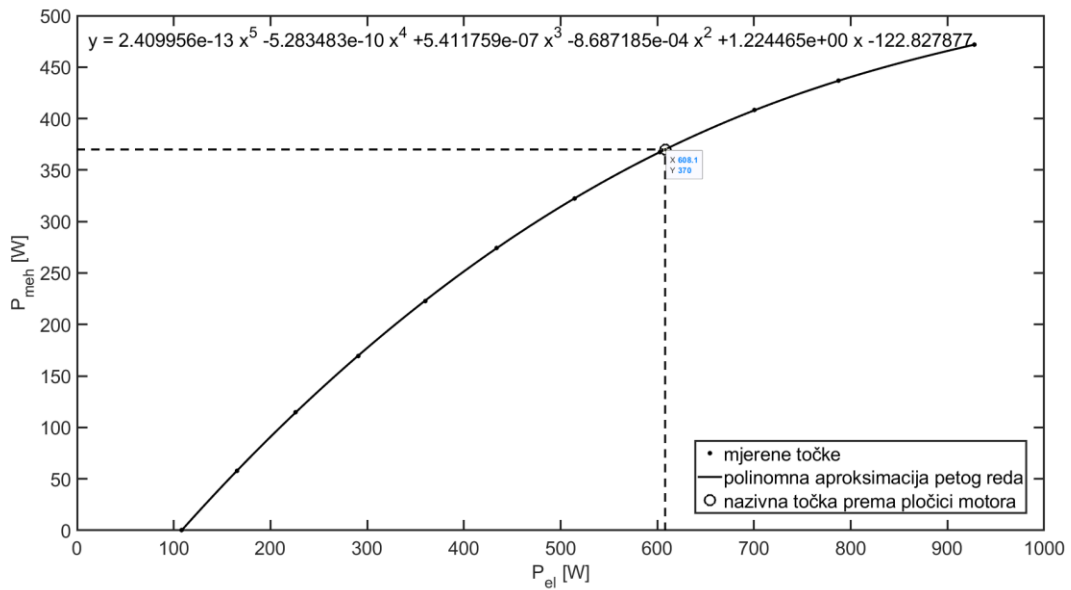


Slika 4.14 Ovisnost faktora snage o snazi uzetoj iz mreže

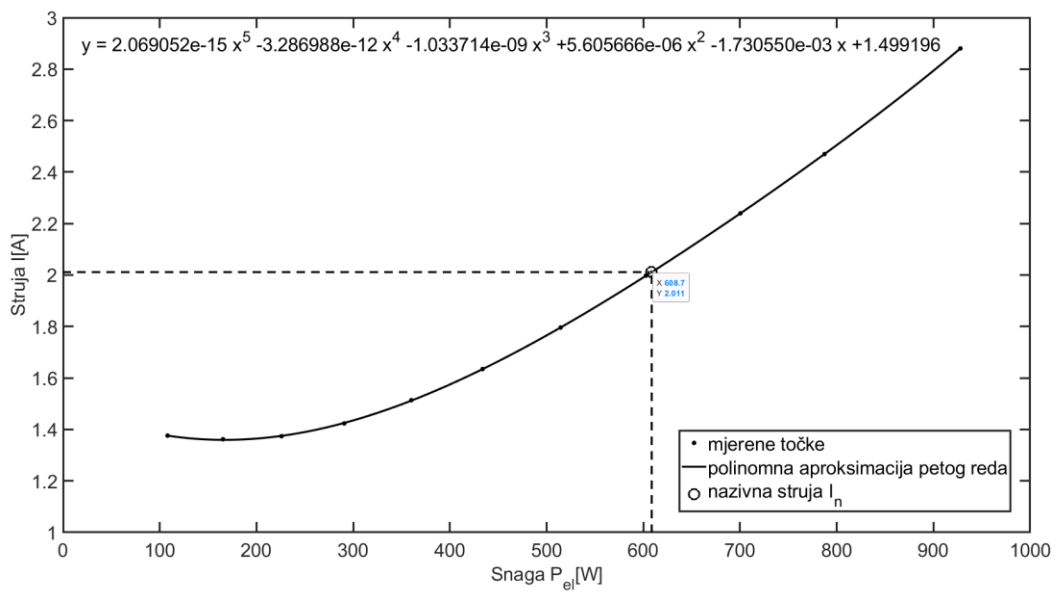


Slika 4.15 Ovisnost korisnosti o snazi uzetoj iz mreže

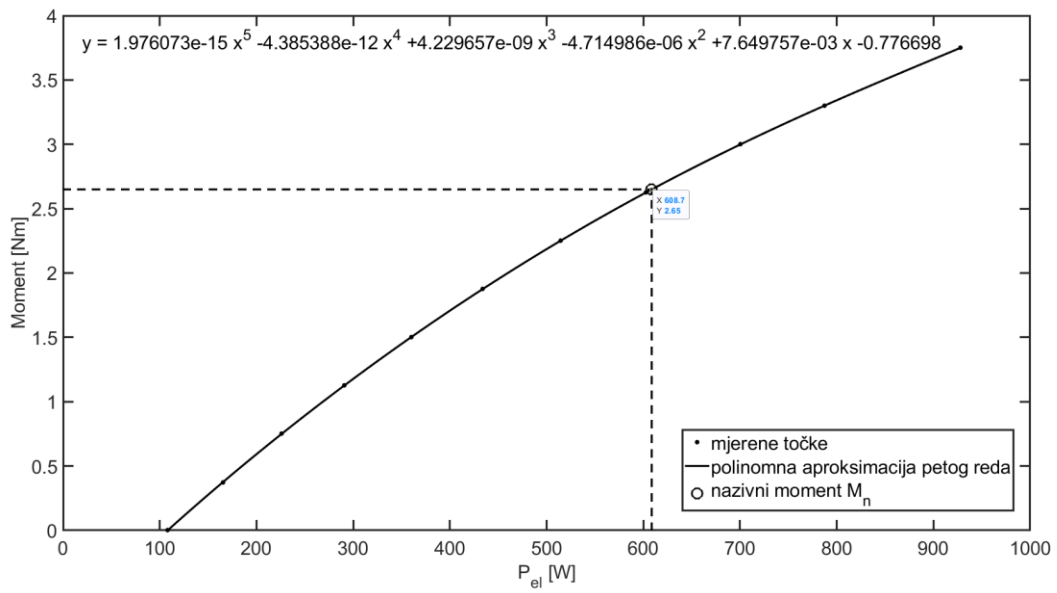
### Karakteristike opterećenja za napon 215 V:



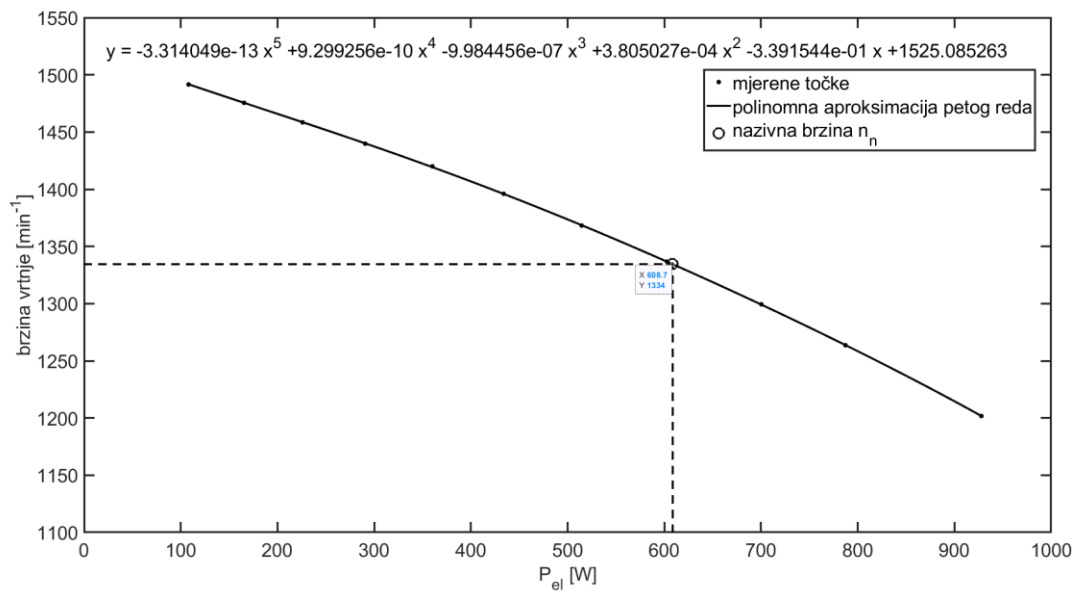
Slika 4.16 Ovisnost mehaničke snage o električnoj snazi



Slika 4.17 Ovisnost struje o električnoj snazi

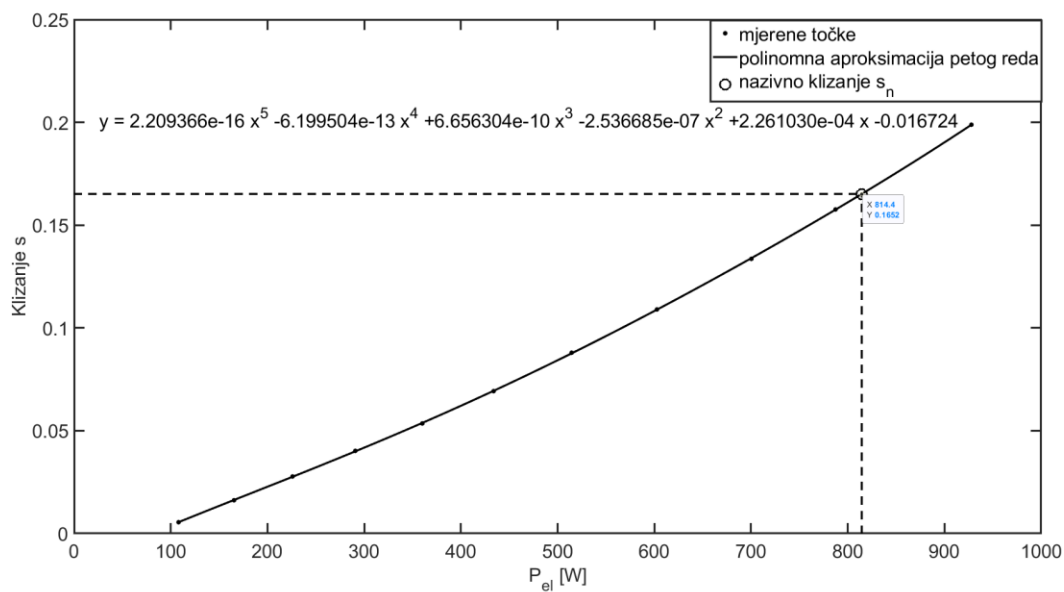


Slika 4.18 Ovisnost momenta o električnoj snazi

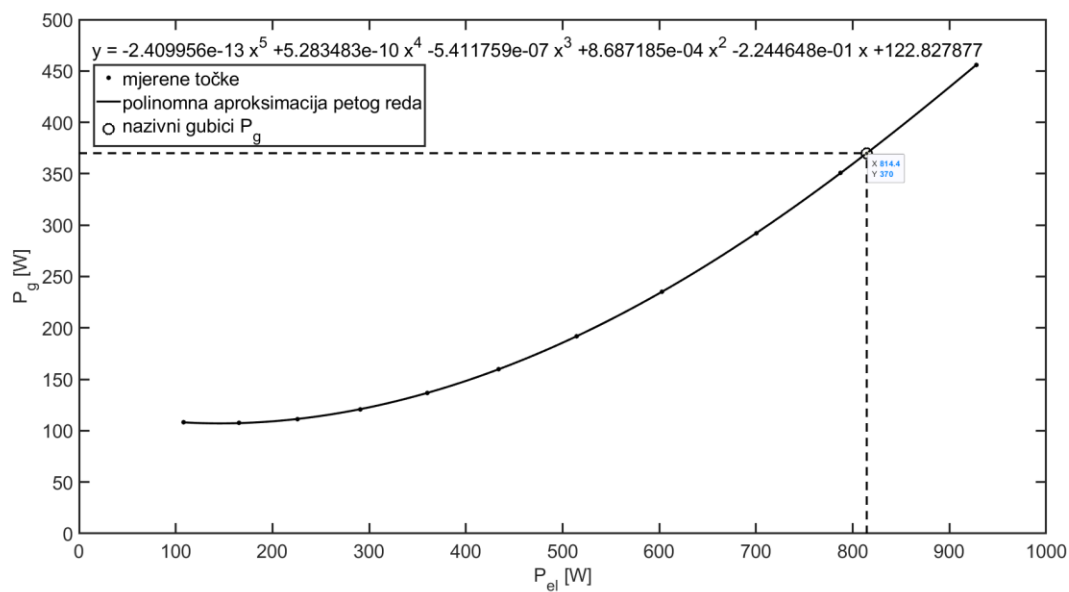


Slika 4.19 Ovisnost brzine vrtnje o električnoj snazi

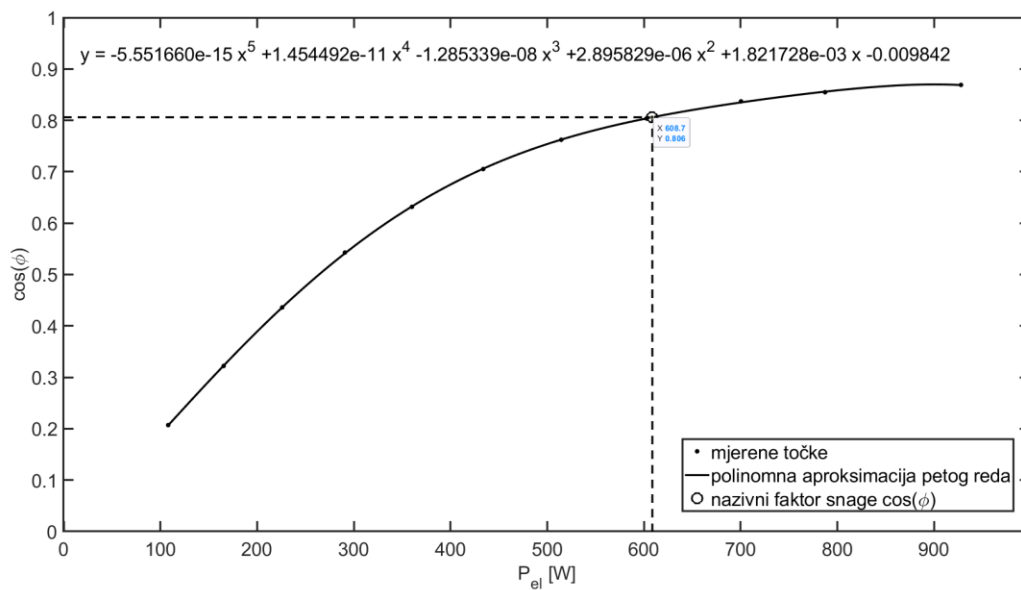




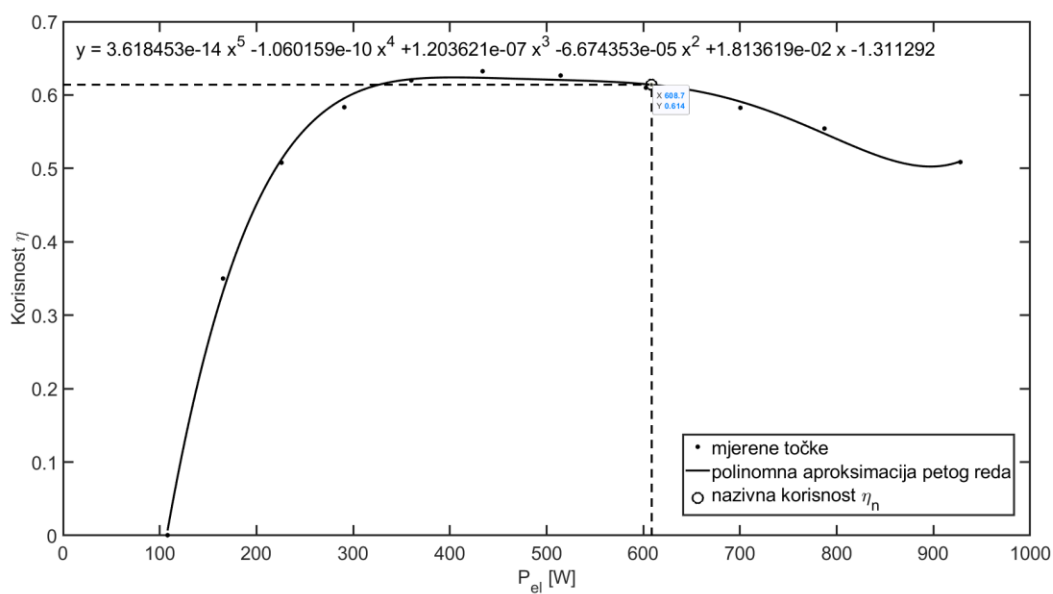
Slika 4.20 Ovisnost klizanja o električnoj snazi



Slika 4.21 Ovisnost gubitaka o električnoj snazi

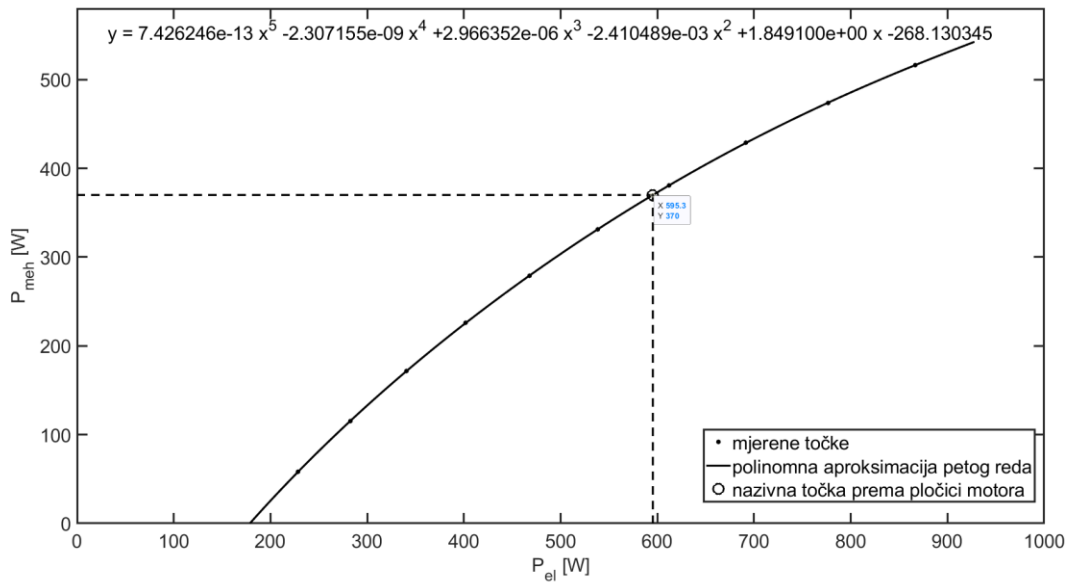


Slika 4.22 Ovisnost faktora snage o električnoj snazi

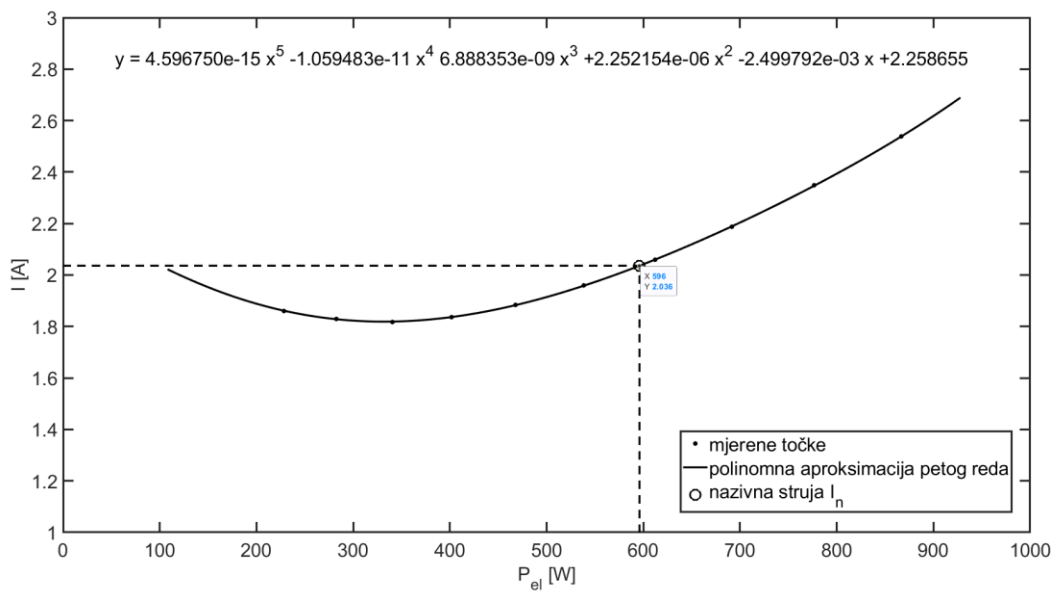


Slika 4.23 Ovisnost korisnosti o električnoj snazi

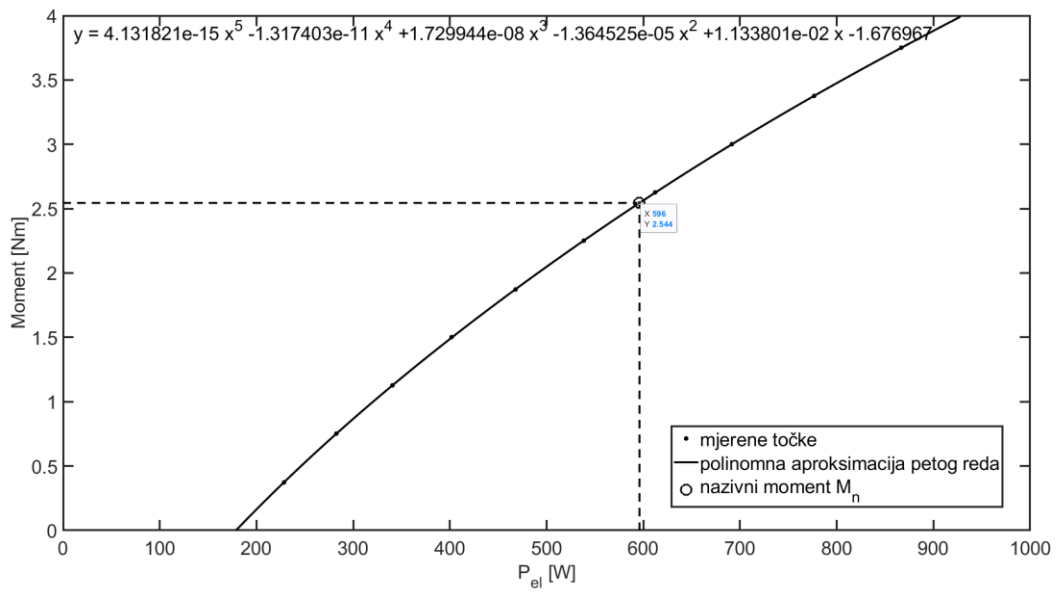
### Karakteristike opterećenja za napon 245 V:



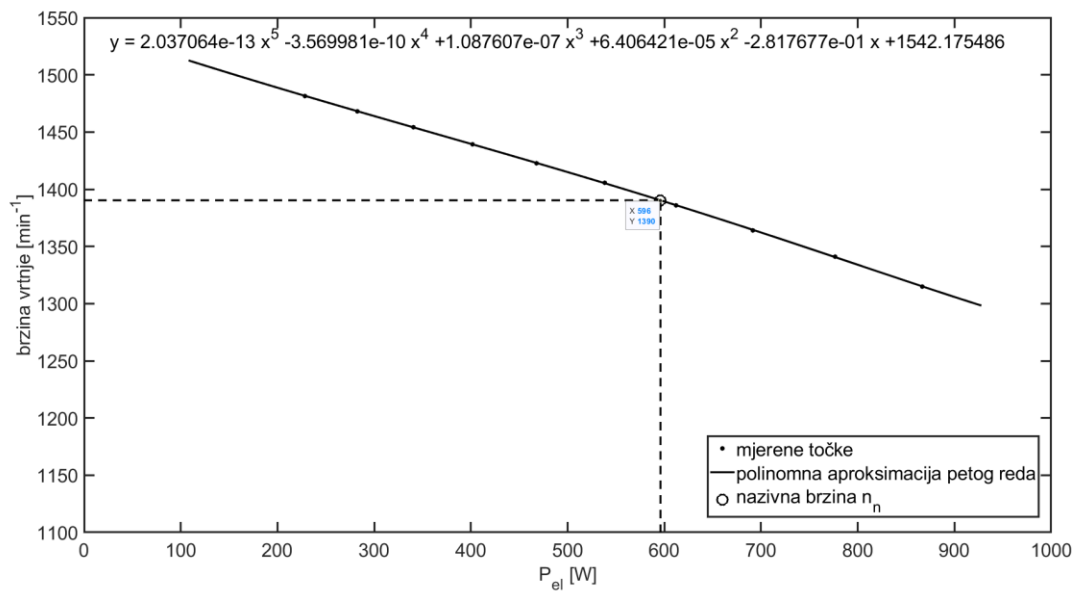
Slika 4.24 Ovisnost mehaničke snage o električnoj snazi



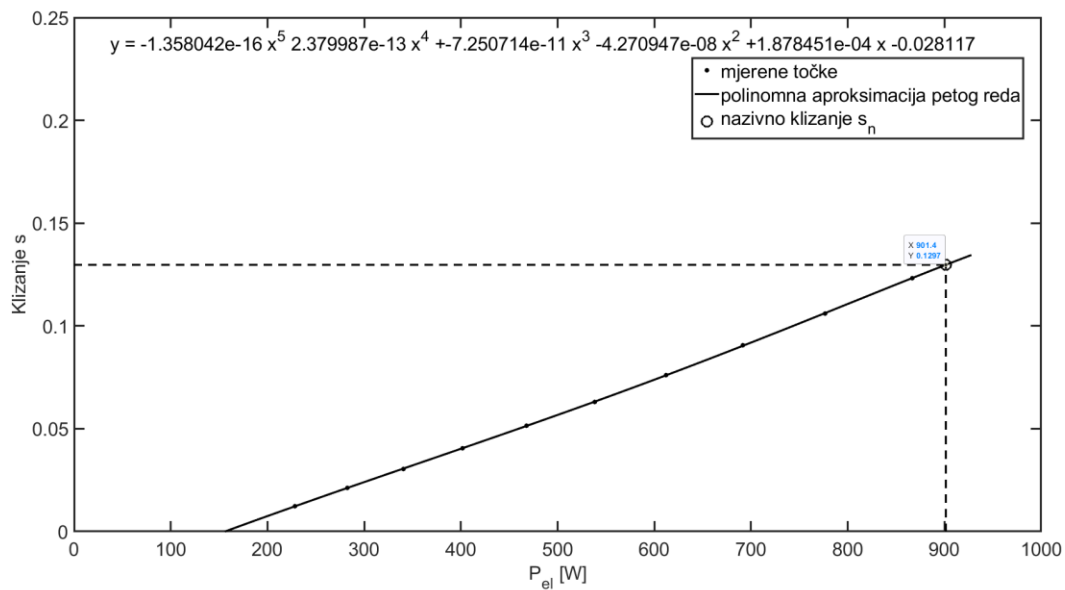
Slika 4.25 Ovisnost struje o električnoj snazi



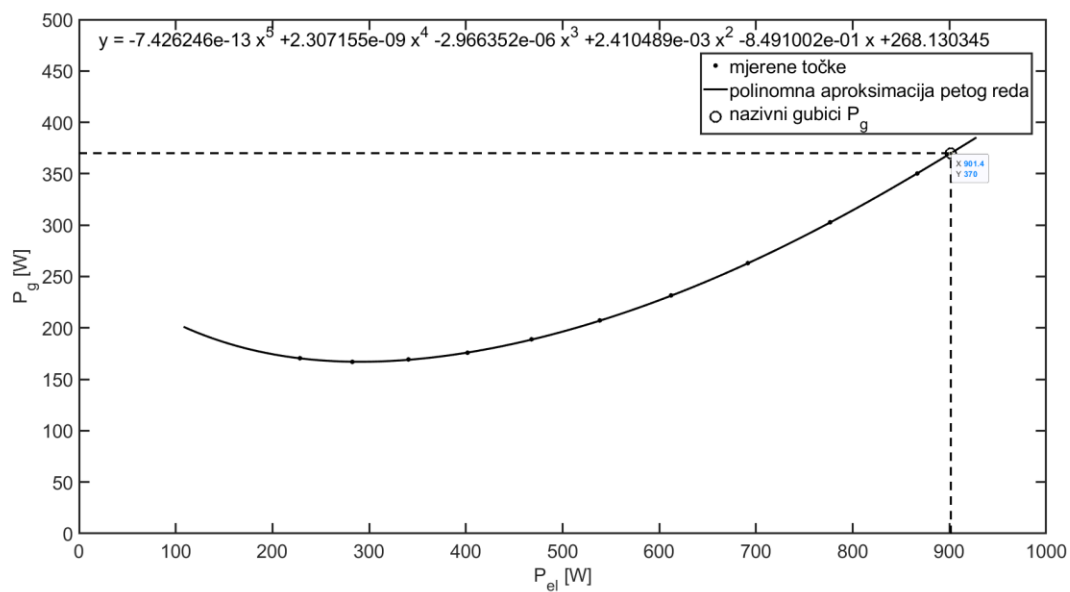
Slika 4.26 Ovisnost momenta o električnoj snazi



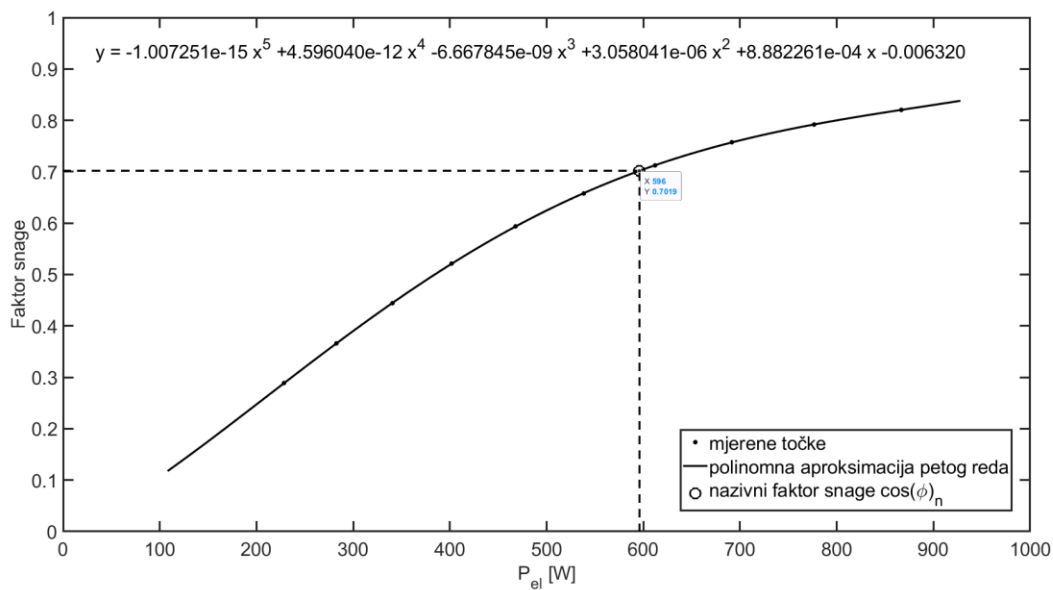
Slika 4.27 Ovisnost brzine vrtnje o električnoj snazi



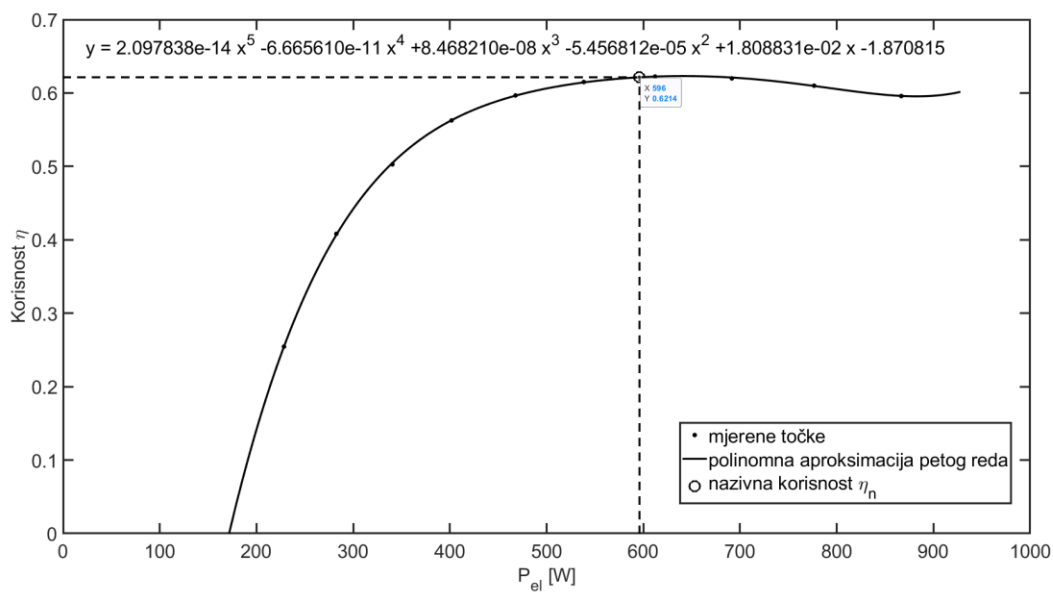
Slika 4.28 Ovisnost klizanja o električnoj snazi



Slika 4.29 Ovisnost gubitaka o električnoj snazi



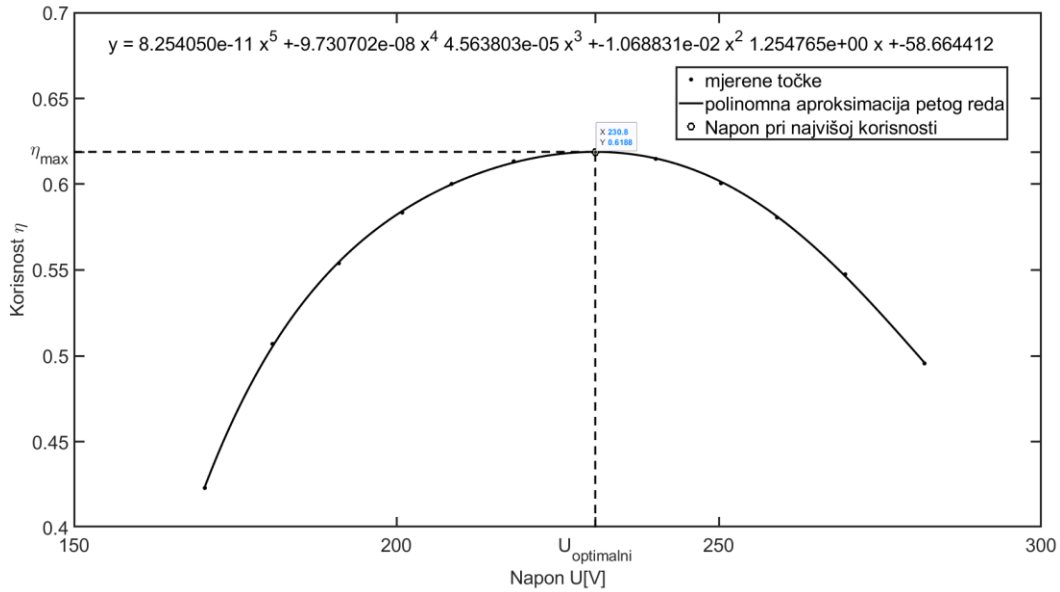
Slika 4.30 Ovisnost faktora snage o električnoj snazi



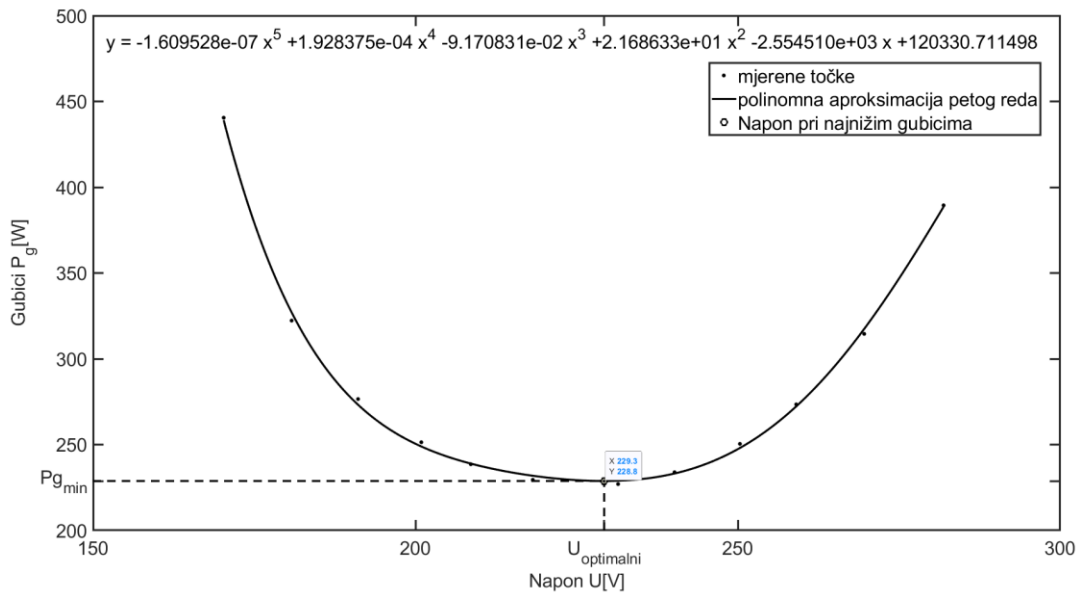
Slika 4.31 Ovisnost korisnosti vrtnje o električnoj snazi

#### 4.4.4. Pokus optimalnog napona:

Iz izvješća se može iščitati da je najveći iznos korisnosti  $\eta_{max} = 0,6188$  pri naponu  $U = 230,8357 \text{ V}$ . Također najniži gubici iznose  $P_g = 228,7808 \text{ W}$  pri naponu  $U = 229,2710 \text{ V}$ . Kako je nazivni napon motora  $U_n = 230 \text{ V}$ , optimalni napon pri kojemu je korisnost najveća, a gubici najmanji, odgovara nazivnom naponu te se zaključuje kako je motor magnetski dobro dizajniran za rad na nazivnim podacima.



Slika 4.32 Ovisnost korisnosti o naponu



Slika 4.33 Ovisnost gubitaka o naponu

## 5. ZAKLJUČAK

Asinkroni motori najčešće se primjenjuju u industriji zbog svojih mnogobrojnih prednosti. Glavni nedostatak koji se odnosi na mogućnost upravljanja riješen je razvojem energetske elektronike i primjenom frekvencijskih pretvarača čime su elektromotorni pogoni s asinkronim motorima postali pogoni velikih upravljačkih mogućnosti. Kako bi se uspješno moglo upravljati asinkronim motorom, od presudne važnosti je poznavati električne parametre nadomjesne sheme motora. U ovom radu predstavljeno je automatizirano prikupljanje podataka električnih veličina i određivanje parametara motora iz pokusa praznog hoda, pokusa kratkog spoja te pokusa opterećenja. Ova metoda ima određena odstupanja od stvarnih vrijednosti koja nastaju zbog različitih zanemarivanja, kao što je izjednačavanje rasipnih induktiviteta statora i rotora, no sva odstupanja su unutar granica određenim praćenim standardima.

Ispitivanje motora na klasičan način vrlo je spor i neprecizan način. Automatizacijom procesa znatno se skraćuje vrijeme trajanja ispitivanja, smanjuje se broj ljudi potreban za provođenje ispitivanja jer je dovoljan jedan operator koji će se koristiti dostupnim korisničkim sučeljima te će sustav odrađivati ostali dio ispitivanja. Također povećava se preciznost svih mjerenja jer se eliminiraju grube pogreške pri mjerenju te se uzorkovanje višestruko povećava.

Daljnje unaprjeđenje ovog postava moguće je korištenjem preciznijih metoda za određivanje parametara motora, ali to i danas predstavlja dodatan izazov. Također moguće je dodatno automatizirati jedini element cijele stanice koji je upravljan ručnim načinom, a to je napajanje ispitivanog motora koje je u ovom postavu izvedeno pomoću autotransformatora koji na izlazu daje različite naponske razine.



## LITERATURA

- [1] K. B. Chavhan i R. T. Ugale, "Automated test bench for an induction motor using LabVIEW," *1st IEEE Int. Conf. Power Electron. Intell. Control Energy Syst. ICPEICES 2016*, Feb. 2017.
- [2] R. McElveen, M. Melfi, i J. McFarland, "Improved characterization of polyphase induction motor losses: Test standards must be modified to improve efficiency optimization," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 25, no. 6, pp. 61–68, Nov. 2019.
- [3] T. Suntio, "Design and implementation of an induction motor drive test bench," Tampere University of Technology, 2015.
- [4] A. Rajendrarao Helonde i M. M. Mankar, "Identifying Three Phase Induction Motor Equivalent Circuit Parameters from Nameplate Data by Different Analytical Methods," *Publ. Int. J. Trend Sci. Res. Dev.*, no. 3, pp. 642–645, 2019, Accessed: Sep. 30, 2021. [Online]. Available: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>.
- [5] Z. Anthony, B. Busran, i E. Erhaneli, "A new equivalent circuit of the three-phase induction motor" vol. 12, no. 23, 2017, Pristupio: 30.09.2021. Dostupno na: [www.arpnjournals.com](http://www.arpnjournals.com).
- [6] T. Bariša, "Metode za identifikaciju parametara asinkronog motora", rad za rektorovu nagradu, 2014.
- [7] "Indukcijski motor – Wikipedija." [https://hr.wikipedia.org/wiki/Indukcijski\\_motor#cite\\_ref-3](https://hr.wikipedia.org/wiki/Indukcijski_motor#cite_ref-3) (accessed Aug. 16, 2021).
- [8] V. Kruz, "*Tehnička-fizika*", Školska knjiga, 1969.
- [9] I. Mandić, V. Tomljenović, M. Pužar, "*Sinkroni i asinkroni električni strojevi*", Tehničko Veleučilište Zagreb, 2012.
- [10] M. Jadrić i B. Frančić, "Dinamika električnih strojeva." Dotisak, Zagreb.
- [11] *IEEE Std 112 - 2004, Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*, standard, November. 2004.
- [12] *INTERNATIONAL STANDARD IEC 60034-1*. 2017., standard
- [13] T. Čorak, "Sustav automatiziranog ispitivanja asinkronog stroja u tvornici", magistarski

- rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, sveučilište u Zagrebu, 2001.
- [14] Ž. Špoljarić, V. Jerković, i K. Miklošević, “Laboratorijske vježbe: asinkroni motor: natpisna pločica, mjerenje otpora namota, prazni hod i kratki spoj”, Elektrotehnički fakultet Osijek, Sveučilište u Osijeku, 2010.
- [15] Z. Valter i Ž. Špoljarić, “Laboratorijske vježbe iz Osnova električnih pogona-pokus opterećenja asinkronog motora”, Elektrotehnički fakultet Osijek, Sveučilište u Osijeku, 2008.
- [16] I. Šubarić, “Mjerenje struje bez prekidanja strujnog kruga”, završni rad, Sveučilište u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, 2016.
- [17] P. Krčum, “Električna mjerenja”, skripta, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, 2012.
- [18] K. Bičanić, I. Kuzle i T. Tomiša, “Nekonvencionalni Mjerni Pretvarači”, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu
- [19] T. Benšić, “Osnove elektrotehnike 2-Auditorne vježbe 3-Teorijski uvod - SNAGA U ELEKTRIČNIM MREŽAMA,”, Sveučilište u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, 2020.
- [20] “A622 100 Amp AC/DC Current Probe Instructions.”, upute za korištenje
- [21] “Differential Probe -GDP-025/050/100 Series-User Manual.”, upute za korištenje
- [22] I. Bašić, “Automatizirano ispitivanje asinkronog stroja u laboratorijskim uvjetima” , magistarski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 1996.
- [23] National Instruments, “DAQ M Series User Manual”, upute za korištenje, 2009.
- [24] National Instruments, *Specifications USB-6218*, upute za korištenje
- [25] Siemens, “S7-1200 Programmable controller System Manual”, upute za korištenje
- [26] Ž. Mioković, “Fizika 1 - Priručnik za laboratorijske vježbe,” Elektrotehnički fakultet Osijek, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, 2013.
- [27] D. C. Montgomery i G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, vol. 19, no. 3. 1994.

## SAŽETAK

U ovom radu objašnjena je automatizirana stanica za ispitivanje asinkronih motora s naglaskom na prikupljanje i obradu električnih mjernih veličina. Veličine su mjerene korištenjem strujnih kliješta i diferencijalnih naponskih sondi, a rezultati mjerenja obrađeni i prilagođeni u sklopu LabVIEW-a. Konačna analiza podataka kao i izvješće realizirano je u sklopu Matlab-a. Sve je prikazano na praktičnom primjeru asinkronog motora.

**Ključne riječi:** asinkroni motor, električne veličine, Matlab, LabVIEW, ispitna stanica

## **ABSTRACT**

This master thesis describes an automated station for testing induction motors with an emphasis on the collection and processing of electrical measured values. Electrical values were measured using current clamps and differential voltage probes, and measurement results were processed and adjusted within LabVIEW. The final analysis of the data as well as the report was realized within Matlab. A practical example is shown on an induction motor.

**Keywords:** induction motor, electrical values, Matlab, LabVIEW, testing bench

## **ŽIVOTOPIS**

Autor ovog diplomskog rada, Mario Ivanković rođen je 06.10.1997. godine u Vinkovcima. Osnovnu školu završio je 2012. godine nakon čega upisuje opći smjer u Gimnaziji Matije Antuna Reljkovića u Vinkovcima. Nakon završene srednje škole upisuje preddiplomski studij, smjer elektrotehnika na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku koji završava 2019. godine. Iste godine upisuje diplomski studij elektrotehnike na smjeru Industrijska elektroenergetika.

---

Potpis autora

## **PRILOZI**

Na CD-u:

- Ivankovic\_Mario\_diplomski\_rad.pdf
- Karakteristike.zip
- MATLAB.zip
- Rezultati mjerenja.zip