

Mjerenje neelektričnih veličina u ispitnim procedurama asinkronog stroja

Lovrić, Branimir

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:200:610517>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-06**

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 elektrotehnike

MJERENJE NEELEKTRIČNIH VELIČINA U ISPITNIM
PROCEDURAMA ASINKRONOG STROJA

Diplomski rad

Branimir Lovrić

Osijek, 2021.

Sadržaj

1.	Uvod	3
2.	Asinkroni stroj	5
2.1.	Princip rada asinkronog stroja	7
2.2.	Nadomjesna shema asinkronog motora u dvoosnom koordinatnom sustavu	9
2.3.	Nadomjesna shema ustaljenog stanja asinkronog motora	13
2.4.	Osnovni podatci asinkronog stroja	14
2.5.	Provjera kvalitete asinkronih strojeva	16
3.	Uloga neelektričnih veličina u ispitnim procedurama asinkronog stroja	
	17	
3.1.	Uloga mjerenja temperature	18
3.1.1.	Temperaturna klasa	18
3.2.	Uloga mjerenja otpora	19
3.2.1.	Otpor izolacije asinkronog stroja	19
3.2.2.	Otpor namota asinkronog stroja	20
3.3.	Uloga mjerenja brzine i momenta asinkronog stroja	21
4.	Postupci mjerenja neelektričnih veličina.	22
4.0.1.	Pokus zagrijavanja	23
4.0.2.	Snimanje momentne karakteristike	24
4.0.3.	Stres test	24
4.1.	Postupci i opis mjerenja temperature	24
4.1.1.	Položaj mjernih sondi pri izvođenju testiranja asinkronog stroja	25
4.2.	Postupci i opis mjerenja otpora	26
4.3.	Postupci i opis mjerenja brzine	28
4.4.	Postupci i opis mjerenja momenta	29
5.	Laboratorijski sustav za ispitivanje asinkronih motora	30
5.1.	Opis laboratorijskog sustava mjerenja neelektričnih veličina	32
5.2.	National Instruments Compact RIO	32
5.2.1.	Prikupljanje potataka o temperaturi	34
5.3.	Implementacija Keithley 2000 unutar LabVIEW programa	35
5.4.	Uloga OPC servera za mjerenje brzine vrtnje i momenta	37
6.	Program za obradu prikupljenih podataka.	39
6.1.	Matematička obrada mjerenih vrijednosti	41
6.1.1.	Pretvorba eksponencijalne funkcije u linearnu regresiju	41
7.	Rezultati mjerenja	44
7.1.	Obrada rezultata za pokus zagrijavanja.	44
7.2.	Obrada rezultata za pokus snimanja momentne karakteristike	48
7.3.	Obrada rezultata za stres test.	49
8.	Zaključak.	51
	Literatura.	54
	Sažetak	55

Abstract	56
Životopis	57
Prilog 1 - Matlab skripte	58

1. UVOD

U sklopu većeg projekta razvijen je sustav za automatizirano ispitivanje asinkronih strojeva, koji se može koristiti za provođenje ispitnih procedura, prikupljanje i obradu podataka. Ispitne procedure za procjenu kvalitete asinkronog stroja predstavljaju temelj određivanja kvalitete konstrukcije i podudaranja nazivnih podataka s podacima navedenim na nazivnoj pločici stroja.

Mjerni sustav neelektričnih veličina koji je razvijen u okviru ovog diplomskog rada imao je za cilj pokazati neke od prednosti koje automatizirano prikupljanje i obrada podataka pruža u radu ispitne stanice. Provođenje ispitne procedure se zasniva na automatiziranom upravljanju ispitnih procesa, kao i na računalu upravljanim procesom prikupljanja podataka, nakon čega se vrši njihova obrada i prikaz rezultata. Razvoj programa za prikupljanje podataka se odvija na sličan način kao u literaturi [1]. Program koji upravlja mjerenim sustavom je napisan pomoću programskog paketa LabVIEW te ima funkcije povezivanja i parametriranja mjernih uređaja, kao i prikupljanje podataka unutar ispitne procedure. Sve mjerene neelektrične veličine se obrađuju unutar Matlab programskog paketa gdje se vrši aproksimiranje funkcija kroz mjerene točke i izračun koeficijenata aproksimirane funkcije.

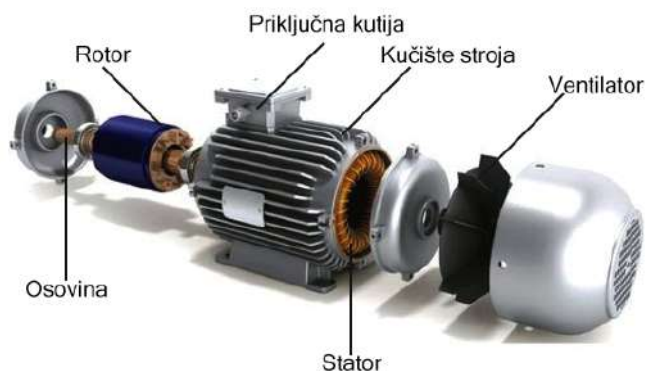
Prema literaturi [2], autor definira ulogu mjerenja temperature tokom provođenja ispitne procedure. Mjerene vrijednosti temperature daju prikaz termičkih svojstava ispitivanog stroja. Funkcije prema kojima se odvija rast i pad temperature, opisane u literaturi [3], unutar ovoga rada se primjenjuju sa svrhom utvrđivanja maksimalne temperature stacionarnog stanja i određivanjem maksimalne nad temperature tokom ispitne procedure. Prema literaturi [4] se definira uloga mjerenja otpora statora u aproksimaciji temperature. Unutar ovog diplomskog rada se primjenjuje metoda proračuna temperature iz otpora kako bi se odredila aproksimativna vrijednost temperature namota od bakra. Autori literature [5] navode utjecaje gubitaka tokom rada asinkronog stroja i stavlja naglasak na važnost testiranja asinkronih strojeva korištenjem IEEE 112 standarda. Za potrebe provođenja ispitne procedure unutar ovog rada se koriste IEEE 112 standard, kojim se definira ispitivanje višefaznih asinkronih strojeva i generatora i IEC 6034-1 za ocjenu termičke izolacijske klase stroja. Matematička analiza metode identifikacija parametara asinkronog motora s onima koji su navedeni na ekvivalentnoj shemi motora se nalazi u literaturi [6]. Autori opisuju određivanje parametara iz niza mjerenih vrijednosti pomoću Matlab programskog paketa koji daje izravnu povezanost između mjerenih i preračunatih vrijednosti. Upravo na takav način se dolazi do korelacije i utvrđivanja kvalitete ispitivanog asinkronog stroja.

U drugom poglavlju će biti sadržani osnovni konstrukcijski i fizikalni opisi asinkronog stroja. Na osnovu postavljenog matematičkog modela će se tražiti parametri funkcije tokom provođenja ispitne procedure koji će ocijeniti ispravnost onih navedenih na natpisnoj pločici stroja. Treće poglavlje sadržava opis mjerenih neelektričnih veličina tokom ispitne procedure izvođenja pokusa za testiranje asinkronog stroja, njihovo fizikalno značenje, kao i njihovu ulogu u danjoj analizi podataka. Opis postupka mjerenja neelektričnih veličina je dan u poglavlju četiri. Opisuje se na konkretnom primjeru koji je implementiran unutar realizacije mjerenja neelektričnih veličina za postizanje mjerenja unutar ovog diplomskog rada. Peto poglavlje daje opis laboratorijskog sustava za ispitivanje asinkronih motora, definira se generalne komponente od kojih je načinjena ispitna stanica, te se opisuje način implementacije opreme za mjerenje neelektričnih veličina unutar samog sustava. Šesto poglavlje daje opis programa za obradu prikupljenih podataka unutar Matlab programskog paketa, definiraju se matematička rješenja pomoću kojih se dolazi do traženog rezultata i daje se objašnjenje rada programa za obradu rezultata. Sedmo

poglavlje daje uvid u rezultate mjerenja, sadržano je od grafičkih prikaza i koeficijenata aproksimiranih funkcija. Sadrži opis svakog pojedinog pokusa unutar kojeg se mjere neelektrične veličine i karakterističnih pojava tokom izvođenja ispitne procedure.

2. ASINKRONI STROJ

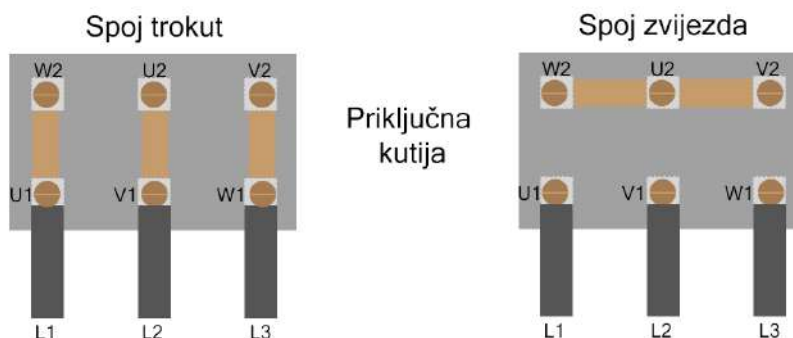
Asinkroni stroj je izumljen 1880. godine od strane velikog izumitelja Nikole Tesle. Princip rada asinkronog motora temelji se na teoriji okretnog magnetskog polja. Priklučkom statorskog namota na vanjski izvor napona u rotorskom namotu se inducira napon putem elektromagnetske indukcije koji potjera struju kroz rotorski namot, iz te pojave proizlazi i drugi naziv za asinkroni stroj, a to je indukcijski stroj. Slika 2.1 prikazuje konstrukciju asinkronog stroja.



SL. 2.1: Konstrukcija asinkronog stroja [11]

Kućište stroja služi kao nosač i zaštita željeznog paketa i namota stroja. Izrađuje se od lijevanog željeza, valjanog čelika ili silumina (legura aluminija) [7]. Ovisno o vrsti zaštite i hlađenja kućište može biti otvoreno (zaštićeno) ili zatvoreno, što je definirano standardima [10]. S vanjske strane kućište ima rebra za povećanje površine hlađenja. Bočne strane kućišta su napravljene kao poklopci koji se nazivaju ležajnim štitovima. U srednjem dijelu ležajnih štitova su ležaji za osovinu na kojoj se nalazi rotor. Na kućištu motora se nalazi priključna kutija na kojoj su stezaljke vezane s krajevima statorskog namota.

U priključnoj kutiji koja se nalazi na kućištu motora nalaze se stezaljke na koje je izveden statorski namot (W2, U2, V2). Stezaljke služe za napajanje motora priključkom trofaznog izvora napona na stezaljke (W1, U1, V1)[12]. Shema spoja namota za spoj trokut i spoj zvijezdu je prikazana na slici 2.2. Kod spajanja vodiča unutar priključne kutije potrebno je pripaziti na kvalitetu spoja kako ne bi došlo do oslobađanja vodiča prilikom vibracija i uzrokovanja kratkog spoja. Vodič za uzemljenje (GND) se spaja na samom dnu priključne kutije.



SL. 2.2: Shema spoja namota u priključnoj kutiji za spoj trokut i spoj zvijezda

Postoje dva načina spajanja statorskog trofaznog namota, u spoj zvijezda ili spoj trokut, načini spajanja su prikazani na slici 2.3.



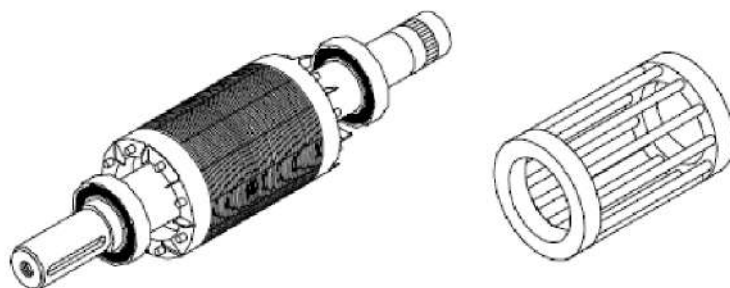
SL. 2.3: Shema spoja za spoj trokut i spoj zvijezda

Rotor se sastoji od rotorskog namota, paketa i osovine te ima slične konstrukcijske dijelove kao i stator. Rotor je oblika valjka i izrađen je od dinamo limova. S vanjske strane uzduž samog rotora nalaze se utori za smještaj rotorskog namota. Ukoliko je rotorski namot izveden od materijala kao što su bakar, mjed, aluminij, bronca i ukoliko su s obje strane prstena kratko spojeni te poprimaju oblik kaveza tada se govori o kaveznom asinkronom motoru.[7] Asinkroni motori se dijele prema izvedbi (konstrukciji) rotora i to na:

- kolutne i
- kavezne.

Za potrebe ispitivanja unutar ovoga diplomskog rada se koristio asinkroni stroj s kaveznim rotorom pa će se detaljnije opisati njegov rad.

Kavezni tip asinkronog stroja je osnovna izvedba asinkronog motora. U svakom utoru rotora je po jedan vodič u obliku štapa. Štapovi su sa svake strane rotora spojeni kratko spojnim prstenovima i čine višefazni rotorski namot. Kratko spojni prsteni sadrže na sebi krilca koja služe kao ventilator za hlađenje. Kada se odstrani željezna jezgra, takav namot izgleda poput kaveza, pa je po tome i ova izvedba motora dobila ime kavezni motor. Rotor i kavez asinkronog motora su prikazani na slici 2.4.



SL. 2.4: Kavezni rotor (lijevo) i kavez asinkronog stroja (desno)

Svaki štap predstavlja jednu fazu, pa je broj faza rotora m_r jednak broju rotorskih utora Q_r :

$$m_r = Q_r \quad (2-1)$$

Jedan štap iznosi pola zavoja, pa je broj zavoja u namotu svake faze rotora N_r jednak:

$$N_r = \frac{1}{2} \quad (2-2)$$

U slučaju kada su utori jednoliko raspoređeni po rubu stroja i ako su štapovi međusobno jednaki, ovakav namot je simetričan. Sve dok je namot simetričan može imati proizvoljan broj faza. Ovako konstruiran namot će u okretnom polju stvoriti simetričan višefazni sustav induciranih napona i struja koje su nužan uvjet za stvaranje momenta.

Postoje razni pristupi za izradu kaveznog namota. Sama izrada je jednostavna jer nema namatanja i ne treba izolirati namot. Dvije najčešće izvedbe kaveznog namota su:

- Uložni namot-radi se od bakrenih štapova. Štapovi se provuku kroz utore i sa svake strane zavare na bakreni prsten. Ova se izvedba koristi kod motora većih i srednjih snaga.
- lijevani kavezni namot-izrađuje se od aluminijske ili siluminne. Rotorski paket se zajedno s osovino stavi u kalup za lijevanje. Potom se lije pod tlakom ubrizga u taj kalup tako da ispuni utore rotora i prostor za kratko spojne prstene.

Stator asinkronog stroja se sastoji od statorskog namota, statorskog paketa i kućišta. Statorski paket stroja je napravljen u obliku šupljeg valjka. Sastavljen je od prstenastih, međusobno izoliranih magnetskih limova debljine 0,5 ili 0,6 mm. Uzduž statorskog paketa, u provrtu su utori u koje se stavlja armaturni namot, jednako kao kod sinkronog stroja. Statorski je namot simetrični više-fazan, najčešće trofazni, spojen u zvijezdu ili trokut. Kod manjih strojeva je napravljen od okrugle bakrene žice (usipni namot) s velikim brojem zavoja. Kod strojeva većih snaga, statorski namot je napravljen od profilnih vodiča ima mali broj zavoja. Postoje izvedbe s jednim ili više statorskih namota. Više namota se ugrađuje u slučaju kada je potrebno više različitih brzina vrtnje. Namoti za svaku brzinu (polaritet) mogu biti smješteni u iste utore ili svaki u zasebne utore.

2.1. Princip rada asinkronog stroja

Kada se stator asinkronog stroja priključi na trofazni izvor električne energije dolazi do protjecanja trofazne struje čije su faze fazno pomaknute za 120° :

$$i_{sa} = I_{sa} \cos(\omega t) \quad (2-3)$$

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

$$i_{sc} = I_{sc} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2-5)$$

Trofazna struja protječe statorskim namotima i stvara okretno magnetsko polje statora Θ_s koje rotira brzinom ω_{el} i čija gustoća ovisi o iznosu protjecanja $\theta(t, x)$ koje ovisi o frekvenciji mreže i položaju rotora. Stvoreno okretno magnetsko polje statora presijeca i ulančava vodiče rotorskog namota te se zatvara u statorskom namotu. U rotorskom namotu, prema Faradayevom zakonu 2-6 dolazi do indukcije napona koji ima iznos brzine promjene ulančanog magnetskog toka statora, koji prema Lenzovom pravilu ima negativan predznak. Razlog negativnog predznaka je taj što inducirana struja u rotoru proizvodi magnetsko polje koje nastoji poništiti svoj uzrok. [8]

$$E = -\frac{d(\Psi)}{d(t)} \quad (2-6)$$

Amperov zakon (2-7) govori kako linijski integral magnetskog polja \vec{B} po proizvoljnoj zatvorenoj krivulji L razmjeran je ukupnoj električnoj struji koju obuhvaća ta krivulja. U primjeru asinkronog motora nam govori kako inducirana struja rotora stvara okretno magnetsko polje.

$$\oint_L \vec{B} d\vec{L} = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k \quad (2-7)$$

Struja inducirana u rotoru i tok okretnog magnetskog polja, prema Biot-Savartovu zakonu 2-8 stvaraju silu u pojedinim vodičima rotora (2-9), odnosno stvara zakretni moment asinkronog stroja (2-10) u smjeru rotacije polja.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 NI}{4\pi} \int_l \left(\frac{d\vec{l} \times \vec{r}_0}{r^2} \right) \quad (2-8)$$

$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B}) \quad (2-9)$$

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (2-10)$$

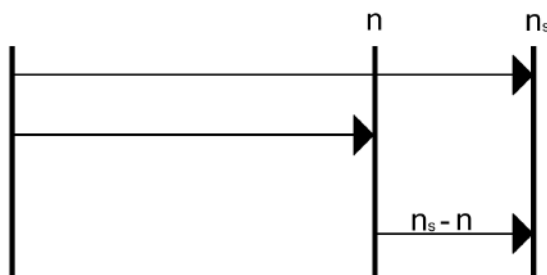
U slučaju kada rotor asinkronog motora nije zakočen i uslijed djelovanja okretnog magnetskog polja, rotor se počinje okretati. Brzina vrtnje rotora zaostaje za brzinom vrtnje okretnog magnetskog polja, a odnos ovih dvaju brzina izražen je preko parametra nazvanog klizanje (2-11). Klizanje kao veličina nema dimenziju i obično se izražava u postocima.

$$s = \frac{n_s - n}{n} 100 \quad (2-11)$$

gdje je:

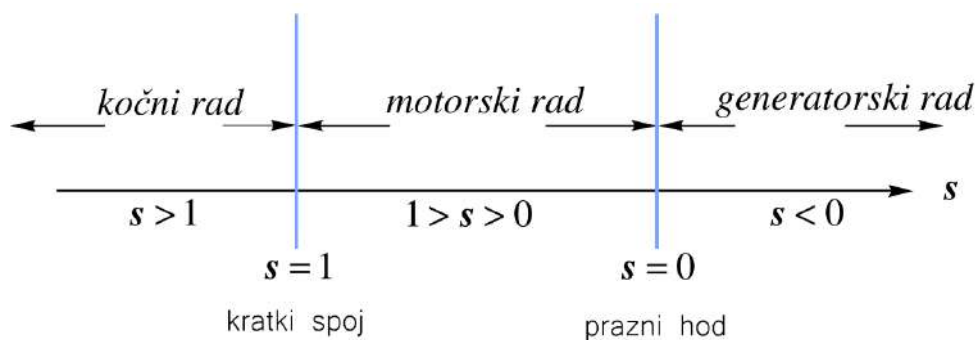
n_s - brzina vrtnje okretnog magnetskog polja

n - brzina vrtnje rotora asinkronog stroja.



SL. 2.5: Grafički prikaz odnosa brzine vrtnje i brzine okretnog magnetskog polja

U trenutku pokretanja motora kada je iznos klizanja maksimalan, inducirani napon rotora postiže najveću vrijednost. Ta pojava uzrokuje veliku struju pokretanja. Ta struja se nastoji smanjiti raznim postupcima zbog svojih mogućih štetnih učinaka. Kako se povećava brzina vrtnje smanjuje se klizanje, inducirani napon i struja. U stacionarnom pogonu ove veličine ovise o iznosu mehaničkog opterećenja motora. Iznos elektromotorne sile i frekvencija inducirane elektromotorne sile u fazi rotora većinski ovise o klizanju, kao i druge značajne veličine stroja poput rotorske impedancije, struje. Stoga se moment i struje mogu također prikazati u ovisnosti o klizanju. Na slici 2.6 je prikazano područje rada asinkronog motora u ovisnosti o klizanju. Za motor u kratkom spoju klizanje ima iznos $s = 1$. Rotor u praznom hodu ima klizanje $s = 0$, pa je i inducirana elektromotorna sila $E_r = 0$.



SL. 2.6: Područje rada asinkronog motora u ovisnosti o klizanju

U području između vrijednosti klizanja $1 > s > 0$ asinkroni stroj se nalazi u motornom režimu rada. Ako se vanjskim pogonskim momentom rotor vrti brže od sinkronizma, klizanje postane negativno odnosno ($s < 0$) i tada stroj prijeđe u generatorski režim rada. Ako se vrti u suprotnu stranu od smjera okretnog polja, tada klizanje poprima vrijednosti veće od 1 ($s > 1$), i stroj radi u kočnom režimu koji se još naziva i protustrujno kočenje.

2.2. Nadomjesna shema asinkronog motora u dvoosnom koordinatnom sustavu

Primjena dvoosnog koordinatnog sustava je bolja za razumijevanje i analizu asinkronog stroja iz razloga što se bez obzira na broj faza, jednadžbe svode na dvoosni sustav na statoru i rotoru. Fizikalna svojstva asinkronog stroja pri transformaciji ostaju nepromijenjena. Uzimajući u obzir promjenu induktiviteta asinkronog stroja kroz vrijeme, dvoosni sustav pojednostavljuje model iz razloga što je njegova primjena aproksimacija koja fiksira položaj rotora u odnosu na namotaje statora preslikavanjem namotaja na istu os [9]. Kako bi transformacija iz trofaznog bila provedena u dvoosni sustav potrebno je abc varijable statora i rotora trofaznog modela transformirati u dvoosni $dq0$, tako da se svi namoti stroja smjeste u dvije okomite osi $dq0$ dvoosnog sustava.

Za potrebe ovoga diplomskog rada objasniti će se model asinkronog motora u dvoosnom sustavu koji rotira sinkronom brzinom. Prijelaz iz trofaznog koordinatnog sustava se odvija u dva koraka:

1. Clarkova transformacija pomoću koje se trofazni vektor \vec{i} transformira u stacionarni dvoosni koordinatni sustav $\alpha\beta$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

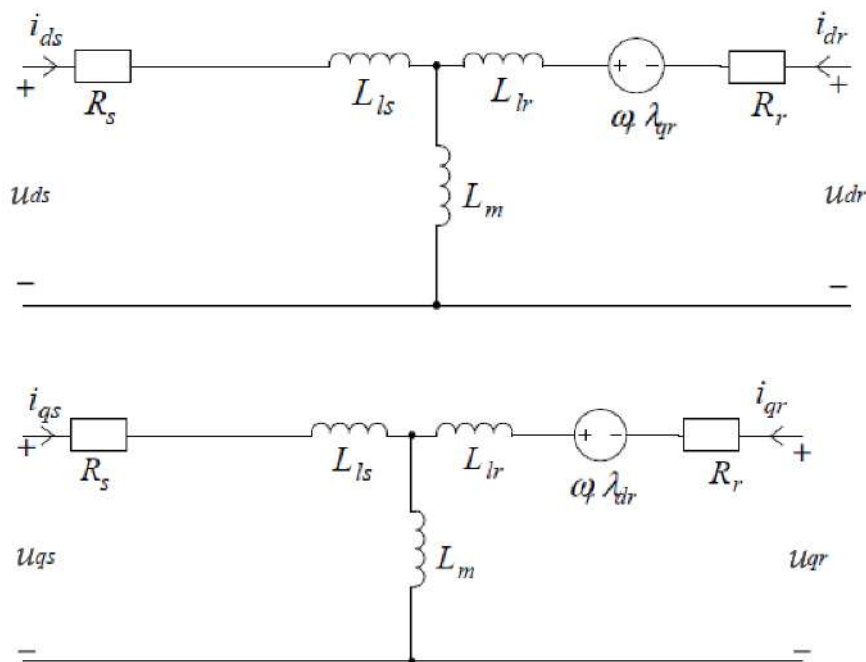
2. Parkova transformacija koja omogućava prijelaz iz stacionarnog $\alpha\beta$ dvoosnog sustava u rotirajući dq sustav.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

Transformacijska matrica iz trofaznog abc u dq dvoosni sustav oblikovana uvijetom da su osi a, α i d poravnate u $t = 0$ glasi:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

Model asinkronog motora u stacionarnom stanju u dq sustavu je prikazan na slici 2.7. Model sadrži dvije nadomjesne sheme koje se sastoje od statorskog i rotorskog kruga.



SL. 2.7: Nadomjesna shema dq sustava asinkronog motora

Nadomjesna shema se sastoji od:

- Električni dio koji definira odnose ulaznog napona ($u_{ds}, u_{qs}, u_{dr}, u_{qr}$) i struje rotora i statora ($i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$)
- Magnetski dio koji je definiran magnetskim tokovima, te predstavlja vezu između ulaznih i izlaznih električnih varijabli.
- Poveznicu između mehaničkog i električnog dijela asinkronog motora čini struje statora i rotora, te zakretni moment motora (T_e)
- Mehanički dio asinkronog motora je definiran odnosom brzine vrtnje i zakretnog momenta.

Matematički model asinkronog motora definiran u literaturi [9], čine jednačbe prethodno spomenutih dijelova nadomjesne sheme. Prvi dio pri konstrukciji matematičkog djela je definiranje električnog djela i magnetskih tokova. Jednačbe (2-15) i (2-16) definiraju naponske ravnoteže statora i rotora za d os dvoosnog sustava.

$$u_{ds} = i_{ds}R_s + (L_m + L_{ls})\frac{di_{ds}}{dt} + L_m\frac{di_{dr}}{dt} - \omega_e\lambda_{qs} \quad (2-15)$$

$$u_{dr} = 0 = i_{dr}R_r + (L_m + L_{ls})\frac{di_{dr}}{dt} + L_m\frac{di_{ds}}{dt} - (\omega_e - \omega_r)\lambda_{qr} \quad (2-16)$$

Napon napajanja U_{ds} se raspodjeljuje na induktivitet L_s koji se definira izrazom 2-17, i pad napona na statorskom otporu R_s . Napon koji se inducira na rotoru se raspoređuje na induktivitet L_r definiran izrazom 2-18, i pad napona na rotorskom namotu R_r .

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (2-17)$$

$$L_{sr} = L_{lr} + L_m \quad (2-18)$$

Naponske jednadžbe statora i rotora za q os sustava su definirane izrazima 2-19 i 2-20.

$$u_{qs} = i_{qs}R_s + (L_m + L_{ls})\frac{di_{qs}}{dt} + L_m\frac{di_{qr}}{dt} + \omega_e\lambda_{ds} \quad (2-19)$$

$$0 = i_{qr}R_r + (L_m + L_{ls})\frac{di_{qr}}{dt} + L_m\frac{di_{qs}}{dt} + (\omega_e - \omega_r)\lambda_{dr} \quad (2-20)$$

Napon u q fazi sustava se inducira s različitim predznakom u odnosu na d fazu zbog čega se napon u q fazi suprotstavlja narinutom naponu, dok napon u d fazi podupire protjecanje struje narinutog izvora [9].

Proračun magnetskih tokova se temelji na izrazu (2-21). A vrijednost magnetskog toka d faze statora, definiran izrazom (2-22) je posljedica struje i_{ds} kroz ukupni induktivitet koji se dobije zbrojem L_{ls} i L_m . Struja rotora i_{dr} također doprinosi ukupnom magnetskom toku uz prisustvo međuinduktiviteta L_m . Definiranje ostalih magnetskih tokova se također određuje po istom principu i definirani su izrazima (2-23), (2-24) i (2-25).

$$\lambda = Li \quad (2-21)$$

$$\lambda_{ds} = (L_{ls} + L_m)i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (2-22)$$

$$\lambda_{qs} = (L_{ls} + L_m)i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (2-23)$$

$$\lambda_{dr} = (L_{ls} + L_m)i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (2-24)$$

$$\lambda_{qr} = (L_{ls} + L_m)i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (2-25)$$

Jednadžbe struja se definiraju kao funkcije pripadajućeg induktiviteta koji je definiran izrazima (2-18) i (2-17) i magnetskog toka definiranog izrazima (2-22) - (2-25).

$$i_{ds} = \frac{L_r}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{ds} - \frac{L_m}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{dr} \quad (2-26)$$

$$i_{dr} = \frac{L_s}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{dr} - \frac{L_m}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{ds} \quad (2-27)$$

$$i_{qs} = \frac{L_r}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{qs} - \frac{L_m}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{qr} \quad (2-28)$$

$$i_{qr} = \frac{L_r}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{qr} - \frac{L_m}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{qs} \quad (2-29)$$

Uvrštavanjem prethodno definiranih izraza za struje i izraza za induktivitet statora 2-17 i induktivitet rotora (2-18) u naponske jednadžbe definirane izrazima (2-15), (2-16), (2-19) i (2-20) dobivaju se diferencijalne jednadžbe magnetskih tokova.

$$u_{ds} = \frac{L_r R_s}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{ds} - \frac{L_m R_s}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{dr} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_e \quad (2-30)$$

$$0 = \frac{L_s R_r}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{dr} - \frac{L_m R_r}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{ds} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} \quad (2-31)$$

$$u_{qs} = \frac{L_r R_s}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{qs} - \frac{L_m R_s}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{qr} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_e \lambda_{ds} \quad (2-32)$$

$$0 = \frac{L_s R_r}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{qr} - \frac{L_m R_r}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{qs} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (2-33)$$

Uvrštavanjem izraza (2-34) u izraze (2-30)-(2-33) i naknadnog sređivanja se dobiju konačne jednačbe magnetskih tokova.

$$M = L_r L_m - L_m^2 \quad (2-34)$$

Diferencijalne jednačbe magnetskih tokova:

$$\frac{d\lambda_{ds}}{dt} = u_{ds} - \frac{L_r R_s}{M} \lambda_{ds} + \frac{L_m R_s}{M} \lambda_{dr} + \omega_e \lambda_{qs} \quad (2-35)$$

$$\frac{d\lambda_{dr}}{dt} = -\frac{L_s R_r}{M} \lambda_{dr} + \frac{L_m R_r}{M} \lambda_{ds} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qs} \quad (2-36)$$

$$\frac{d\lambda_{qs}}{dt} = u_{qs} - \frac{L_r R_s}{M} \lambda_{qs} + \frac{L_m R_s}{M} \lambda_{qr} - \omega_e \lambda_{ds} \quad (2-37)$$

$$\frac{d\lambda_{qr}}{dt} = -\frac{L_s R_r}{M} \lambda_{qr} + \frac{L_m R_r}{M} \lambda_{qs} - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (2-38)$$

Definiranje strujnih jednačbi kao funkcije induktiviteta i magnetskih tokova se dobiva uvrštavanjem izraza (2-34) u izraze (2-26)-(2-29).

$$i_{ds} = \frac{L_r}{M} \lambda_{ds} - \frac{L_m}{M} \lambda_{dr} \quad (2-39)$$

$$i_{dr} = \frac{L_s}{M} \lambda_{dr} - \frac{L_m}{M} \lambda_{ds} \quad (2-40)$$

$$i_{qs} = \frac{L_r}{M} \lambda_{qs} - \frac{L_m}{M} \lambda_{qr} \quad (2-41)$$

$$i_{qr} = \frac{L_s}{M} \lambda_{qr} - \frac{L_m}{M} \lambda_{qs} \quad (2-42)$$

Modeliranje zakretnog momenta asinkronog motora koji je definiran izrazom (2-43), čini vezu između električnog i mehaničkog djela.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (2-43)$$

Mehanički dio matematičkog modela asinkronog motora čini modeliranje brzine vrtnje rotora koje je prikazano izrazom (2-44).

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_L) - \frac{B}{J} \omega_r \quad (2-44)$$

Definiranjem električnog djela, mehaničkog djela kao i njihove poveznice je posljednji korak transformacije trofaznog asinkronog motora u dvoosni dq sustav.

2.3. Nadomjesna shema ustaljenog stanja asinkronog motora

Na temelju razmatranja u prethodnom poglavlju, jasno je da se vektorske jednadžbe mogu primijeniti na trofazni asinkroni stroj. Prema literaturi [17] se izvode vektorske jednadžbe asinkronog stroja sa strujama kao električnim varijablama stanja, a kutnom brzinom (ω) kao mehanička varijabla, jednadžbe glase:

$$\bar{U}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d}{dt}(L_s \bar{I}_s + L_m \bar{I}_r) + j\omega_k(L_s \bar{I}_s + L_m \bar{I}_r) \quad (2-45)$$

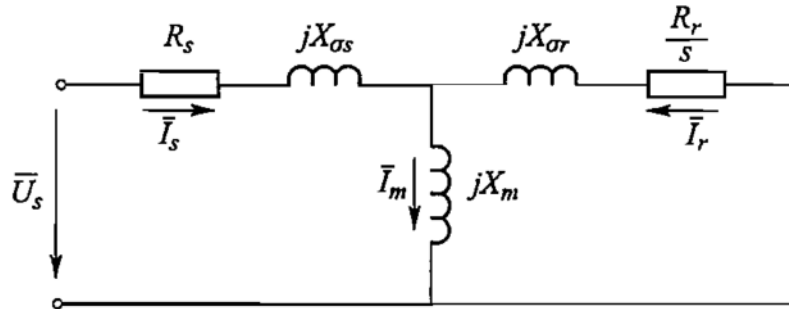
$$\bar{U}_r = R_r \bar{I}_r + \frac{d}{dt}(L_m \bar{I}_s + L_r \bar{I}_r) + j(\omega_k - \omega)(L_r \bar{I}_r + L_m \bar{I}_s) \quad (2-46)$$

Prema literaturi [17], za analizu ustaljenih stanja asinkronog stroja je prikladno primijeniti sinkrono rotirajući koordinatni sustav, jer su vremenske derivacije varijabli u stacionarnim stanjima u tom sustavu jednake nuli. Primjerice, izjednačimo li u (2-45) i (2-46) sve derivacije s nulom i pretpostavi li se da je kratko spojeni rotorski namot iznosa $\bar{U}_r=0$ u sinkrono rotirajućem koordinatnom sustavu ($\omega_k = \omega_s$) i zamjeni li se kutna brzina klizanjem, $\omega = (1 - s)\omega_s$, a induktivitet reaktancijama $X = \omega_s L$, dobiva se oblik naponskih jednadžbi koje tvore sustav:

$$\bar{U}_s = (R_s + jX_{\sigma s})\bar{I}_s + jX_m(\bar{I}_s + \bar{I}_r) \quad (2-47)$$

$$0 = \left(\frac{R_r}{s} + jX_{\sigma r}\right)\bar{I}_r + jX_m(\bar{I}_s + \bar{I}_r) \quad (2-48)$$

Na temelju jednadžbi (2-47) i (2-48) konstruirana je nadomjesna shema prikazana na slici.



SL. 2.8: Nadomjesna shema za ustaljena stanja

Na temelju sheme ustaljenog stanja asinkronog stroja, može se doći do fizikalnog značenja prijelaznih reaktancija koje se javljaju kao rezultat množenja prijelaznih induktiviteta s kružnom frekvencijom statora.

Rješavanjem naponskih jednadžbi mogu se dobiti vektori ulančanih tokova i struja kao kompleksne funkcije kutne brzine ω , odnosno klizanja s prikazanih u jednadžbama ispod.

$$\bar{U}_s = \left(\frac{R_s}{L'_s} + j\omega_s\right)\bar{\lambda}_s - \frac{R_s}{L'_s}k_r\bar{\lambda}'_r \quad (2-49)$$

$$0 = \frac{R_r}{L'_r}k_s\bar{\lambda}_s + \left(\frac{R_r}{L'_r} + j\omega_s\right)\bar{\lambda}_r \quad (2-50)$$

nakon uvođenja veličina:

$$s_{ps} = \frac{R_s}{X'_s} \quad (2-51)$$

$$s_{pr} = \frac{R_r}{X'_r} \quad (2-52)$$

sustav naponskih jednadžbi se može zapisati kao:

$$\overline{U}_s = (s_{ps} + j)\omega_s \overline{\lambda}_s - s_{ps} k_r \overline{\lambda}'_r \quad (2-53)$$

$$0 = -k_s s_{pr} \overline{\lambda}_s + (s_{pr} + j s)\omega_s \overline{\lambda}_r \quad (2-54)$$

Ako se razviju determinante sustava (2-53) i (2-54) i u dobiveni izraz uvede koeficijent rasipanja $\sigma = 1 - k_s k_r$, onda se može izraziti u obliku $\underline{D} = j\omega_s \underline{N}(s)$, gdje je:

$$\underline{N}_s = s_{pr} + s s_{ps} + j(s - \sigma s_{pr} s_{ps}) \quad (2-55)$$

Nakon što se odrede determinante sustava, dobivaju se rješenja za vektore ulančanih tokova:

$$\overline{\lambda}_s = \frac{\overline{U}_s s_{pr} + j s}{j\omega_s \underline{N}(s)} \quad (2-56)$$

$$\overline{\lambda}_r = \frac{\overline{U}_s s_{pr} k_s}{j\omega_s \underline{N}(s)} \quad (2-57)$$

Za vektore struja dobiva se:

$$\overline{I}_s = \frac{\overline{U}_s \sigma s_{pr} + j s}{j X'_s \underline{N}(s)} \quad (2-58)$$

$$\overline{I}_r = -\frac{\overline{U}_s j k_r s}{j X'_s \underline{N}(s)} \quad (2-59)$$

Najkraći postupak da se izvede stacionarna momentna karakteristika je pomoću prethodno definiranog ulančanog toka i struje rotora.

$$M_e = \frac{3}{2} p R_e (j \overline{I}_r \overline{\lambda}_r^*) \quad (2-60)$$

Gdje zvijezdica označava konjugiranu vrijednost vektora $\overline{\lambda}_r$. Uvrštavanjem izraza (2-57), (2-59), (2-51) i (2-52) koje je detaljnije opisano u literaturi [17] dolazi se do izraza za proračun momenta.

$$T = \frac{1}{\omega_s} \left[\frac{n_{ph} U_s^2 \frac{R_r}{s}}{R_s + \left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{\sigma s} + X_{\sigma r})^2} \right] \quad (2-61)$$

Ekvivalentno izrazu (2-61), prema literaturi [18] razvijeni moment stroja se može računati prema izrazu:

$$T = \frac{P_{meh}}{\omega_s} \quad (2-62)$$

2.4. Osnovni podatci asinkronog stroja

Ispitivanje asinkronih strojeva provodi se prvenstveno radi određivanja njegovih mehaničkih i električkih karakteristika, ali i da bi se provjerila usklađenost proizvedenog asinkronog stroja s konstrukcijskim i projektnim podacima. Glavni element za prepoznavanje karakteristika asinkronog stroja je natpisna pločica. Natpisna pločica sadrži: osnovne podatke o proizvođaču, godinu proizvodnje, tipnu oznaku, izvedbeni oblik, spoj statorskog namota, klasu izolacije i nazivne podatke za koje je stroj građen. Izgled natpisne pločice asinkronog stroja korištenog



SL. 2.9: *Natpisna pločica ispitivanog asinkronog stroja*

pri ispitivanju se nalazi na slici 2.9.

Tipna oznaka je različita kod različitih proizvođača. Obično sadrži: oznaku serije proizvodnje, oznaku vrste i zaštite motora, visinu osovine, duljinu kućišta i broj polova. Vrsta zaštite motora je definirana standardima o kojima će se više govoriti u narednim poglavljima. Nazivni podaci asinkronog motora su:

- nazivni napon U_n (efektivna vrijednost linijskog napona),
- nazivna snaga P_n ,
- frekvencija f_n ,
- struja I_n (efektivna vrijednost linijske struje),
- nazivni faktor snage $\cos\rho_n$ i
- nazivna brzina vrtnje n_n

Nazivna snaga motora je mehanička snaga koja se mjeri na osovini.

U sustavu za ispitivanje asinkronih motora ispitivani stroj je bio asinkroni motor tipske oznake 5AZ 71B-4 serijskog broja 818458 od proizvođača Končar.

Objašnjenje tipske oznake prema katalogu proizvođača je sljedeće:

- 5 - serijska oznaka za strojeve s kućištem od aluminijske legure
- AZ - asinkroni stroj sa zatvorenim kućištem
- 71 - visina centra osovine u odnosu na postolje na kojem se nalazi stroj
- B - duljina aktivnog dijela osovine
- 4 - broj polova asinkronog stroja
- B3 - horizontalna ugradnja pomoću nogara
- Ta40°C - vrijednost nazivne radne temperature motora
- Cl.F - izolacijski sustav motora razine F čija je maksimalna dopuštena temperatura 155°C
- IP55 - oznaka za zaštitu od taloženja prašine i zaštitu od mlaza vode iz svih smjerova

2.5. Provjera kvalitete asinkronih strojeva

Međunarodna organizacija za unaprjeđivanje tehnologije povezane s električnom energijom IEEE, osnovana je u SAD-u 1963. godine. Sredinom šezdesetih godina objavljena je prva verzija standarda kojom se definira ispitivanje višefaznih asinkronih strojeva i generatora, IEEE 112. Tim činom se postavlja osnova za jednoliko testiranje i razinu povjerenja u kvalitetu proizvoda od strane kupca prema proizvođaču. Standard sadrži upute za provođenje testova, kao i upute za utvrđivanje i definiranje korisnosti ispitivanog uređaja. Prema literaturi [21] standard se sastoji od pet glavnih grupa testova a to su sljedeće:

- Tipična forma izvještaja testiranja - Prije samog početka testiranja potrebno je pripremiti dokumentaciju u koju će se unositi podatci dobiveni tokom testiranja. Unutar IEEE 112 standarda postoje prilozi A i B koji predlažu formu izvještaja.
- Preliminarno testiranje - Podrazumijeva testiranja koja uvjetuju daljnji nastavak procedure, poput mjerenja otpora namota i temperature okoline u kojoj se provodi ispitivanje.
- Testovi koji se provode u praznom hodu - Testovi koji se provode sa ciljem utvrđivanja gubitaka u jezgri i namotima rotora, kao i gubitci stvoreni utjecajem trenja.
- Testovi koji se provode pod opterećenjem - Vrsta testova koja se izvodi sa svrhom utvrđivanja faktora snage, korisnosti, porasta struje, brzine i temperature. Prije provođenja testa potrebno je osigurati poravnanje stroja i njegovu stabilnost kako bi se otklonile dodatne vibracije. Porast temperature pri izvođenju ove vrste testova može biti između 50% i 120% nazivne temperature. Testiranja se prvo započinju s većim opterećenjem pa se ide ka manjim.
- Testovi koji se provode za zakočenim rotorom - Pri izvođenju ovakve vrste testova potrebno je osigurati da se osovina asinkronog stroja sigurno zakoči jer pri trofaznom napanju dolazi do velikog iznosa momenta, isto tako potrebno je pratiti temperaturu tokom izvođenja testa. Sva mjerenja se uzimaju pet sekundi nakon uključenja na napon.

Svako testiranje podrazumijeva točan numerički prikaz izmjerenih vrijednosti radi lakše i preciznije analize i konačnog izvještaja. Standard sadrži detaljno pojašnjenje o odabiru i podešavanju mjernih uređaja, kako bi se mjerna pogreška svela na što manju vrijednost. Uz to, detaljno su opisani postupci mjerenja i pozicioniranja mjernih sondi na ispitivani asinkroni stroj o čemu će se više govoriti u poglavlju 5.

Drugi standard koji se primjenjuje u izradi ovog diplomskog rada je IEC 60034-1. Standard se definira za sve rotirajuće električne strojeve, a stavak jedan se odnosi na ocjenu kvalitete i performansi stroja. Prema literaturi [22] standard se sastoji od sljedećih poglavlja:

- Definiranje područja primjene, odnosno zadatak je svakog proizvođača stroja da proizvod predodredi za područje primjene, odnosno da definira radne karakteristike poput opterećenja i njegovog trajanja.
- Definiranje maksimalnih vrijednosti napona, struje, vrijeme rada pod trajanjem maksimalnog opterećenja, maksimalna snaga koja se razvija na osovini stroja itd.
- Uvjeti okoline u kojoj se nalazi stroj. Konstrukcija stroja podrazumijeva uporabu materijala koji imaju ograničenja u obliku temperatura kojima se izlažu. IEC 60034-1 definira maksimalnu temperaturu okoline od 40°C i minimalnu -15°C. Nadmorska visina ima utjecaj na gustoću zraka i brzinu hlađenja stroja, pa se standardom definira da maksimalna nadmorska visina ne prelazi 1000 m. Unutar ovog poglavlja se standardiziraju temperature i čistoća rashladne tekućine kao i skladištenje i transport stroja.

- Radni uvjeti kada je stroj spojen na električnu mrežu definiraju isključivo naponske razine i frekvenciju napajanja stroja. Posebno se razrađuju izmjenični i istosmjerni strojevi.
- Termičke klase i testovi koje se primjenjuju u konstrukciji i testiranju izolacijskog djela asinkronog stroja. Uloga je svakog proizvođača da navede termalnu klasu u kojoj se nalazi stroj nakon provedenih testova zagrijavanja. Poglavlje definira metode hlađenja stroja (zrak, voda i rashladna tekućina), kao i razlike u temperaturama kod primjene pojedine metode. Također, kod mjerenja temperature se govori o pozicioniranju sonde i vrstama mjernih sonde za temperaturu te o razlikama koje se mogu pojaviti pri primjeni različitih mjernih sonde.

3. ULOGA NEELEKTRIČNIH VELIČINA U ISPITNIM PROCEDURAMA ASINKRONOG STROJA

Ispitivanje asinkronih strojeva se provodi sa ciljem određivanja točnosti njegovih mehaničkih i električnih karakteristika, ali i radi provjere podataka dobivenih testiranjem s onim podacima koji su navedeni na natpisnoj pločici. Ispitne procedure u standardnim ispitivanjima asinkronog stroja podrazumjevaju praćenje električnih i neelektričnih veličina. Unutar ovoga rada detaljno će se opisati neelektrične veličine koje se prikupljaju u ispitnim procedurama koje se provode prema IEE 112 i IEC 60034 standardima. Praćenje i prikupljanje vrijednosti temperature, brzine, momenta i otpora namota je potpuno automatizirano što omogućava lakše vođenje ispitnog procesa. Kako bi se rezultat mjerenja mogao pravilno prikazati potrebno je poznavati ispitnu proceduru i očekivane vrijednosti koje se pojavljuju tokom ispitnog procesa. Detekcija kvara unutar procedure testiranja asinkronog motora je od ključne važnosti. Iz tog razloga sučelje za testiranje motora sadrži sustav praćenja neelektričnih veličina iz kojih se u stvarnom vremenu isčitavaju podatci sa ispitne stanice te u slučaju odstupanja ili naglog porasta vrijednosti operater može sukladno tome djelovati.

Industrijska oprema uključujući asinkrone strojeve je stvorena sa ulogom kako bi se proizvodnja održavala na optimalnoj razini bez prekida u proizvodnom procesu. Iz tog razloga od pogonskih strojeva se očekuje velika razina pouzdanosti i poznavanje njegovih karakteristika kako bi ga smjestili u optimalno područje rada.

Neki od razloga za testiranje asinkronih strojeva su:

- sigurnost ljudi i imovine
- usklađenost sa standardima i normama
- smanjeno vrijeme kvara pogona
- unaprijed određeno vrijeme održavanja i popravka pogona

Promjena mjerenih neelektričnih veličina djelom je uvjetovana konstrukcijom asinkronog stroja, te kako bi se bolje shvatila uloga neelektričnih veličina u ispitnim procedurama asinkronog stroja, potrebno imati razumijevanje o njegovom principu rada.

3.1. Uloga mjerenja temperature

Pri izboru asinkronog stroja treba obratiti pozornost na to da je motor izrađen tako da odgovara opterećenim zahtjevima unutar bilo koje primjene, te da temperatura unutar namota statora i rotora ne prelazi kritičnu temperaturu unutar klase. Kritična temperatura je temperatura u kojoj izolacija namota statora i rotora može podnijeti bez trajnih oštećenja. Oštećenje izolacije može skratiti vijek trajanja motora i na kraju rezultirati električnim smetnjama.

Mjerenje temperature je uobičajena metoda pri ispitivanju električnih strojeva i zaštiti pogona od pregrijavanja. Metode za mjerenje temperature stroja su:

- mjerenje omskog otpora namota U-I metodom
- mjerenje temperature pomoću ugrađenih temperaturnih senzora (kontaktno lokalno mjerenje temperature)
- mjerenje temperature pomoću naknadno postavljenih termometara
- mjerenje omskog otpora namota metodom superpozicije
- beskontaktno mjerenje temperature - IC termografija

3.1.1 Temperaturna klasa

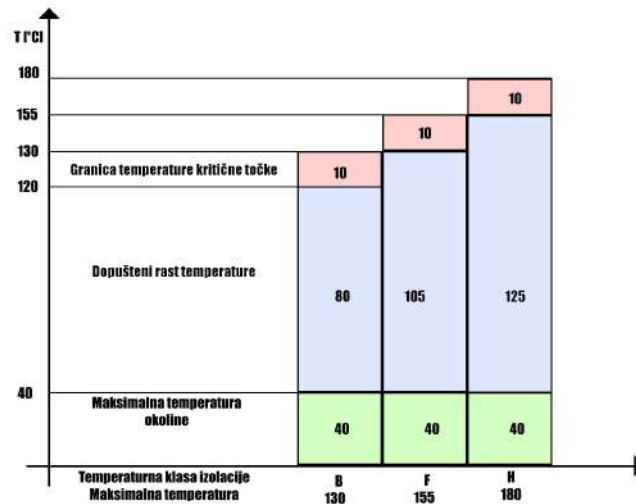
Uzimajući u obzir jednostavan dizajn i robusnost asinkronog stroja jedini čimbenik koji utječe na njegov životni vijek je kvaliteta izolacijskih materijala korištenih u konstrukciji statora i rotora. Na stanje izolacije utječe nekoliko faktora poput temperature, vlažnosti zraka, vibracija u radnoj okolini i kemijskih elemenata koji ubrzavaju koroziju i dovode do ubrzanog starenja materijala. Vijek trajanja asinkronog stroja se smanji za polovinu u slučaju kada se izloži temperaturi u rasponu od 8°C do 10°C većoj od njegove temperaturne klase izolacijskog materijala. [13]. Kako bi se osigurao duži vijek trajanja asinkronog stroja treba uzeti u obzir korištenje temperaturnih sondi za praćenje temperature i zaštitu namota. Bitno je naglasiti kada se referira na smanjeni vijek trajanja asinkronog stroja da se tu isključivo ne misli na nagle promjene temperature koje rezultiraju izgaranjem izolacije, nego na konstantno starenje i gubitak svojstva materijala koji postaje suh i gubi izolacijsku snagu. Kao rezultat toga asinkroni stroj neće moći izdržati iznos napona što može dovesti do kratkog spoja. Iskustva su pokazala u slučaju da se radna temperatura stroja održava ispod razine koja je propisana temperaturnom klasom vijek trajanja izolacije je praktički zauvijek. [13]. Temperatura koja uzrokuje gubitak svojstva izolacije je znatno niža od temperature koja uzrokuje njezino izgaranje. Oštećenje se najčešće pojavljuje na najtoplijem mjestu unutar cijelog navoja i zaključuje se kako je dovoljno da do kvara dođe samo na jednom mjestu kako bi cijeli namot prestao funkcionirati.

Razvojem tehnologije i sve većom uporabom frekvencijskih pretvarača za kontrolu rada asinkronog stroja u obzir se moraju uzeti i utjecaji različitih frekvencija koje prolaze kroz namote te njihov efekt u obziru promjene temperature. Asinkroni strojevi su skloni većem zagrijavanju kada se napajaju pomoću frekvencijskog pretvarača nego uporabom trofaznog sinusoidnog valnog oblika napona. Do porasta temperature u slučaju napajanja pomoću frekvencijskog pretvarača dolazi zbog porasta gubitaka unutar zavoja stroja koji se javljaju zbog visokih harmonika PWM signala. Dolazi do smanjene izmjene topline s okolinim prostorom zbog promjena brzine u slučaju napajanja niskim frekvencijama kada stroj ima svoj sustav hlađenja na poledini koji izravno ovisi o brzini vrtnje rotora.

Neki od načina za održavanje optimalne temperature izolacije stroja u radu s frekvencijskim pretvaračem su:

- smanjenje okretnog momenta asinkronog stroja
- korištenje neovisnog sustava hlađenja
- implementacija rješenja kontrole brzine i momenta koju nudi proizvođač opreme koja se koristi za kontrolu asinkronog stroja

Temperaturna klasa se određuje s ciljem ispravnog odabira željenog stroja za njegovu primjenu i pravovremenu zaštitu motora u slučaju porasta temperature.



SL. 3.10: Temperaturne klase izolacije

Kako je spomenuto u prethodnom poglavlju za izradu ovoga rada se koristio asinkroni motor temperaturne klase *F* čija je maksimalna temperatura 155°C . Maksimalna temperatura je definirana zbrojem temperature okoline i dozvoljene temperature unutar promatrane klase. Prema normi IEC 60034-1 za temperaturu okoline se uzima 40°C . Graf na 3.10 prikazuje temperaturne klase *B*, *F* i *H*. Na y-osi grafa se vide maksimalne vrijednosti temperatura koje asinkroni stroj nebi trebao prelaziti jer se riskiraju oštećenja izolacije i namota stroja.

3.2. Uloga mjerenja otpora

Mjerenje otpora statorskog namota trofaznog asinkronog stroja otkriva probleme koje drugi testovi možda neće pronaći i tako dovode do pravovremene spoznaje o stanju stroja i namota. Ti problemi uključuju djelomične ili potpune kratke spojeve između faza, loše prešanje kablenskog završetka ili njihovo spajanje na priključnicu, neravnotežu između faza i pogrešne veze zavojnica (fazno). Studije provedene od strane IEEE i Instituta za istraživanje električne energije (EPRI) o kvarovima električnih rotacijskih strojeva pokazuju da je 48% kvarova motora posljedica električnih kvarova [14]. Kada se govori o otporu unutar asinkronog stroja mogu se promatrati dvije komponente otpora, a to su otpor izolacije i otpor namota stroja.

3.2.1 Otpor izolacije asinkronog stroja

Kada se govori o izolaciji u kontekstu rada asinkronog stroja tu se podrazumijeva kruti materijal koji sprječava tok električne struje između točaka različitog potencijala. Testiranje izolacije se

provodi kako bi se odredio integritet izolacijskog medija. Postupak testiranja je takav da se narine visoki napon na testni primjerak te se određuje struja koja teče u testnim uvjetima. Pretjerana struja može pokazati dotrajalo stanje ili dolazeći kvar izolacije. Testiranje izolacije se može provesti istosmjernim ili izmjeničnim naponom. Pri testiranju treba pripaziti provodi li se destruktivnom ili nedestruktivnom metodom. Prilikom provođenja destruktivnog testa se uzrokuje kvar koji opremu čini nepogodnom za daljnju primjenu, dok kod ne destruktivnih metoda se koriste niži naponi koji rijetko oštećuju opremu.

Testiranje visokim izmjeničnim naponom se provodi tako da se napon podiže na određeni nivo. Ako oprema zakaže ili ako proteče značajna struja, testirana oprema nije pogodna za rad. Ako oprema ne zakaže, prošla je testiranje. Ovakvom vrstom testa se jedino može utvrditi dali je oprema dobra ili loša za rad. Ne pokazuje se granica s kojom je oprema prošla testiranje. Korištenjem ne destruktivnih metoda se mogu dobiti podatci o faktoru snage, faktoru disipacije, kapacitivnosti itd. Provjeru kvalitete izolacije je potrebno provesti ukoliko se stroj ne stavi u uporabu nakon isporuke i provede duži vremenski period izvan pogona. Kvaliteta i iznos otpora izolacije varira ovisno o iznosu temperature, vlage i ostalih klimatskih faktora poput izloženosti suncu i utjecaju abrazivnih čestica. Vrlo je teško odrediti minimalan otpor izolacije jer on ovisi o vrsti materijala i načinu proizvodnje pa se iz tog razloga preporuča pogledati katalog s podacima određenog stroja koji sadrži podatke o otporu izolacije. Ispitivanje otpora izolacije se provodi s naponskim razinama između 100 - 15 000 V pomoću megaohmmetra u ručnoj izvedbi, pogonjenog motorom ili elektronski, te prikazuje otpor izolacije u megaoohmima. [15].

3.2.2 Otpor namota asinkronog stroja

Namoti statora su prema konstrukcijskoj izvedbi trofazni izmjenični namoti. U većini se testiranja kao kriterij prihvatljivosti za izmjerene omske otpore koriste računске vrijednosti, u kojima se definira dozvoljena donja i gornja granica odstupanja izmjerenog otpora u postotcima omskog otpora iz računskih podataka. U računskim podacima, projektant stroja daje omske otpore po fazi, preračunate na 20°C, bez obzira da li je namot spojen u trokut ili zvijezdu. Obzirom na izvedbu motora, a i specifičnost uvjeta i potrebnu brzinu rada u ispitnoj stanici ponekad nije moguće izmjeriti omski otpor po fazi. To se uglavnom odnosi na motore čiji je statorski namot spojen u trokut, a motor je primjerice napravljen u zatvorenoj izvedbi. Ispitivač ima dostupne samo izvode namota i u mogućnosti je mjeriti samo omski otpor između stezaljki namota. Takav pristup mjerenju omskog otpora, olakšava i izračunavanje gubitaka u namotu motora jer se za sve izvedbe namota koristi. Formula za izračun gubitaka u namotima motora, definirana standardom IEEE 112 glasi:

$$P_{Cu} = I^2 R \quad (3-63)$$

Gdje su P_{Cu} gubici u namotu, I je struja koja teče namotom, a R je omski otpor namota izmjeren između stezaljki. Ovaj se otpor mjeri na sva tri para stezaljki $U1 - V1$, $U1 - W1$ i $V1 - W1$. [19] Slika 3.11 prikazuje redoslijed stezaljki unutar spojne kutije asinkronog stroja.

Kada se izmjeri otpor između stezaljki asinkronog stroja preostaje još izmjerenu vrijednost otpora usporediti s računskim podacima. Kako se oni uvijek daju za otpor faze, potrebno je izmjereni otpor između stezaljki preračunati na fazni otpor, što se za namot spojen u trokut vrši prema izrazu:

$$R_f = \frac{3}{2} R \quad (3-64)$$

a za namot spojen u zvijezdu prema izrazu:

$$R_f = \frac{1}{2} R \quad (3-65)$$



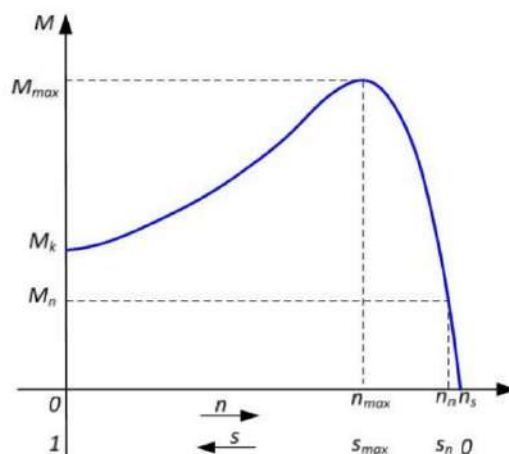
SL. 3.11: Oznake namota asinkronog stroja spojenog u trokut

Najviše se koristi mjerenje otpora mjerenjem struje i napona, (tzv. U-I metoda), Thomsonovim mostom, Wheatstoneovim mostom i digitalnim mjeracem otpora. U-I metoda (u odgovarajućem spoju i uz upotrebu odgovarajućeg instrumenta odgovara za sve veličine otpora, Thomsonov most se koristi za otpore od 0,001 do 1 Ω (posebnu pažnju treba posvetiti kod mjerenja otpora namota, koji imaju znatni induktivitet, koji pri mjerenju može izazvati uništenje osjetljivog nul-instrumenta), a Wheatstoneov most za otpore veće od 1 Ω . Instrumenti za direktno mjerenje otpora (mjeraci otpora) za veće otpore imaju priključak sa 2 žice, kao Wheatstoneov most, za male otpore imaju priključak sa 4 voda (2 strujna i 2 naponska) za eliminaciju otpora mjernih vodova. Stoga za male otpore obično koristimo posebne mjerne žice - sonde.[16]

3.3. Uloga mjerenja brzine i momenta asinkronog stroja

Primjena asinkronih strojeva u industriji podrazumijeva pravilan odabir stroja za njegovu primjenu, što znači zadovoljavanje uvjeta predstavljenih od strane tereta prema stroju. Mehanička snaga se definira pomoću izmjerenih vrijednosti brzine i momenta. Brzina se definira u mjernoj jedinici okretaj po minuti te je mjerenje brzine vrlo važno radi preciznije kontrole procesa. Unutar složenog industrijskog procesa u kojem dolazi do međusobne ovisnosti dvaju ili više sustava, vrlo je bitno imati povratnu vezu brzine vrtnje. O preciznosti povratne veze mjerene brzine ovisi i daljnja preciznost proizvodnje unutar promatranog procesa. Suvremeni elektromotorni pogoni, za regulaciju brzine vrtnje koriste frekvencijske pretvarače. Naime brzina vrtnje asinkronih motora čvrsto je vezana za frekvenciju napajanja, tako da se mijenjanjem same frekvencije mijenja i brzina vrtnje motora. Za izvedbu motora to znači da ne mora imati rotorski namot izveden preko kliznih koluta, već se može upotrijebiti puno jeftinija izvedba rotora s kaveznom namotom.

Slično kao i uloga brzine, moment je jedna od ključnih mehaničkih veličina čija vrijednost definira asinkroni stroj. Kada se govori o momentu asinkronog stroja, potrebno je poznavati momentnu karakteristiku koja se definira kao ovisnost momenta o brzini. Pri odabiru motora za industrijski pogon, od najvećeg interesa je motorni dio momentne karakteristike (3.12) sa svojim specifičnim vrijednostima poput poteznog momenta, maksimalnog momenta i nazivnog momenta. Upravo pomoću te karakteristike i s uvjetom da se prethodno pozna je iznos tereta, može se odabrati ispravan stroj.



SL. 3.12: *Motorni dio momentne karakteristike*

Pri izvođenju testiranja asinkronih strojeva, od ključne su važnosti pouzdane i točne povratne vrijednosti momenta i brzine vrtnje. Jedan od osnovnih zahtjeva za pravilno ispitivanje asinkronih strojeva je taj da mjerene vrijednosti budu točne radi daljnje analize podataka i proračuna, brzina i moment služe za određivanje mehaničkih karakteristika, te iz tog razloga se očekuje velika pouzdanost pri mjerenju.

Ako se promatraju sigurnosni razlozi, povratna veza brzine vrtnje i momenta je bitna zbog pravovremene obaviještenosti operatera ispitne stanice o postizanju nazivne brzine vrtnje i momenta opterećenja stroja. Također, u slučaju da operater nema vizualni kontakt s osovinom, odnosno rotorom motora mora jasno znati dali je sigurna za pristup i kontakti rad oko motora, poput postavljanja termosondi i sličnih poslova koji zahtijevaju mirovanje osovine iz sigurnosnih razloga.

4. POSTUPCI MJERENJA NEELEKTRIČNIH VELIČINA

Kada se govori o testiranju asinkronog motora, taj pojam podrazumjeva pokuse unutar kojih se prikupljaju električne i neelektrične veličine sa svrhom utvrđivanja točnosti i preciznosti podataka s natpisne pločice ili kataloga motora s onima koji se dobiju u postupku testiranja i analizom rezultata o koja će se obraditi u poglavlju broj 7. U ovom poglavlju će biti pisano o mjernim postupcima i procedurama koje se koriste za prikupljanje podataka unutar ispitnog procesa asinkronog motora. U standardnim ispitnim procedurama asinkronog stroja od neelektričnih veličina se prikupljaju temperatura, otpor namota, brzina vrtnje i moment motora. Svaka od mjerenih veličina se zasniva na različitom mjeriteljskom principu od kojih će svaki biti opisan kao i njegov princip rada i matematička analiza iza njega. Ispitivanje motora se vrši prema IEEE standardnom postupku za ispitivanje višefaznih asinkronih motora i generatora. Ovaj standard obuhvaća cjelokupne upute za vođenje i generiranje prihvatljivog izvještaja o općenito primjenjivim i prihvatljivijim asinkronim motorima i generatorima. Testovi opisani unutar IEEE standarda se mogu primijeniti na oboje motore i generatore, prema potrebi. Budući da su višefazni elektroenergetski sustavi gotovo univerzalno trofazni sustavi, jednadžbe u ovom standardu napisane su posebno za tri faze. Kada se ispitivanje provodi na jednofaznom naponu, jednadžbe se mijenjaju prikladno tome [21].

Standardna ispitna procedura ispitivanja asinkronih strojeva obuhvaća sljedeće pokuse:

- Mjerenje otpora namota
- Određivanje redoslijeda faza i smjera vrtnje
- Pokus praznog hoda
- Pokus zagrijavanja
- Pokus opterećenja
- Pokus kratkog spoja
- Snimanje momentne karakteristike
- Pokus optimalnog napona
- Stres test

Unutar ovog diplomskog rada glavni fokus za obradu rezultata mjerenja neelektričnih veličina se priklanja sljedećim ispitnim procedurama:

- Pokus zagrijavanja
- Snimanje momentne karakteristike
- Stres test

Kako bi se bolje shvatila ispitna procedura, potrebno je detaljnije objasniti postupak izvođenja svakog od navedenih pokusa.

4.0.1 Pokus zagrijavanja

Pokus trajnog rada ili pokus zagrijavanja se provodi s ciljem utvrđivanja kvalitativne ocjene toplinskog proračuna stroja i izolacijskih materijala korištenih pri konstrukciji stroja [19].

Pokus zagrijavanja se u ispitnoj proceduri izvodi prije pokusa opterećenja. Opterećenje ispitivanog stroja mora biti nazivno kako bi mu se odredilo i nazivno zagrijavanje. Samo trajanje pokusa ovisi o konstrukciji ispitivanog stroja i njegovoj primjeni. Ako se radi stroju koji je konstruiran za trajni pogon, onda pokus može trajati i do četiri sata, u slučaju ispitivanja strojeva koji rade u kratkotrajnom pogonu, trajanje pokusa je određeno predviđenim trajanjem opterećenja. Prema standardu [21], završetak pokusa zagrijavanja definira stagnacija temperature, odnosno porast temperature unutar jednog sata mora biti manji od 1°C. Nakon stagnacije temperature ispitivanog stroja, potrebno je izvršiti mjerenje otpora zagrijanih statorskih namota u vremenskim razmacima od 2 sekunde kako bi se jasno vidio padajući trend temperature.

Nakon što je temperatura stagnirala, zagrijavanje se odredi indirektno iz izmjerenih vrijednosti otpora statorskog namota prije i nakon pokusa zagrijavanja:

$$\Delta\vartheta = \frac{1}{\alpha_{Cu}} \left(\frac{R_{\vartheta}}{R_{\vartheta a}} - 1 \right) \quad (4-66)$$

gdje je:

$\Delta\vartheta$ - povišenje temperature namota

α_{Cu} - temperaturni koeficijent materijala namota (bakra)

R_{ϑ} - otpor stezaljki nakon pokusa zagrijavanja i

$R_{\vartheta a}$ - otpor stezaljki izmjeren prije pokusa zagrijavanja (na temperaturi okoline)

4.0.2 Snimanje momentne karakteristike

Momentna karakteristika daje ovisnost razvijenog momenta na osovini i brzini vrtnje motora. Unutar ovog diplomskog rada moment se snima pomoću estimatora momenta. Problem pri izvođenju ove ispitne procedure se javlja blizu prekretnog momenta, gdje stroj više ne može savladati povećanje momenta tereta od strane opterećenog servo motora. Iz tog razloga, kako bi se zaštitio stroj, ispitna procedura se izvodi pri smanjenom naponu od 110 V. Skaliranje momenta se vrši pomoću izraza (4-67) tako da vrijednosti s oznakom kmj označavaju mjerne vrijednosti pri sniženom naponu.

$$M_{kn} = M_{kmj} \left(\frac{U_n}{U_{mj}} \right)^2 \quad (4-67)$$

Prema standardu [21], procedura provođenja pokusa započinje s zagrijavanjem stroja na nazivnu temperaturu i mjerenjem otpora namota statora asinkronog stroja. Asinkroni stroj se zavrti sinkronom brzinom i brzina se smanjuje u koracima od 30 okr/min do nule. Pri svakom smanjivanju brzine se spremaju mjerene vrijednosti. Posebnu pozornost treba posvetiti mjerenju u području karakteristike unutar koje se javlja prekretni moment. Unutar tog područja se savjetuje spremanje mjerenih vrijednosti za manje pomake brzine.

4.0.3 Stres test

Provođenje stres testa daje uvid u karakteristiku opterećenja ili radnu karakteristiku asinkronog motora pri raznim opterećenjima. Kada se govori o opterećenju na motoru, tu se podrazumijeva opterećenje mehaničkom snagom na osovini, koju motor razvija kako bi savladao moment tereta koji ga pokušava zaustaviti [19]. Karakteristike opterećenja motora se snimaju uglavnom jednom u radnom vijeku motora i to onda kada je nov, time se ujedno i provjerava podudaranje vrijednosti motora s onim iz nazivnih podataka.

Postupak izvođenja ispitne procedure započinje s ograničavanjem brzine vrtnje na iznos od 500 okr/min i započinje se sa podizanjem napona dok struja ne bude malo veća od nazivnog iznosa. Ispitivani stroj se zagrijava do temperature od 105°C te se opterećuje s iznosom momenta od $1,5M_n$ i postepeno smanjuje do nule. Prema [21] ispitivanje se provodi kroz 15 točaka i za oba smjera vrtnje. Mjerenje otpora namota se provodi prije početka i netom nakon završetka ispitne procedure.

4.1. Postupci i opis mjerenja temperature

Definicija temperature počiva na spoznaji o termičkoj ravnoteži sustava. Po njoj se dva toplinska sustava nalaze u stanju ravnoteže ako posjeduju istu temperaturu. Povežu li se u jedan sustav, tada im temperatura ostaje nepromijenjena. Mjerna jedinica za temperaturu je Kelvin (K). U nultoj točki Kelvinove ljestvice molekule gotovo miruju, pa to tijelo ne posjeduje nikakvu toplinsku energiju. Iz tog razloga nema ni negativne temperature, jer energetski siromašnije stanje jednostavno ne postoji.[20] Za potrebe ovoga rada temperatura će se izražavati u Celzijevoj ljestvici koja svoju nultu temperaturu definira temperaturi skrućivanja vode. Veza između Kelvinove i Celzijeve ljestvice se definira izrazom:

$$T[^\circ C] = T[K] - 273,15[K] \quad (4-68)$$

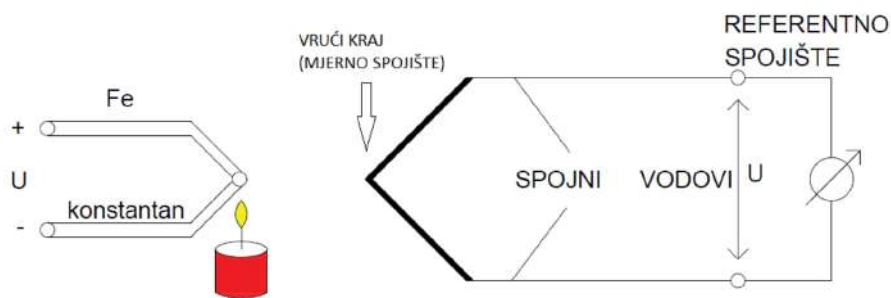
Pri izradi ovoga rada se koriste dodirni električni termometri, odnosno termoparovi. Rad termoparova se zasniva na Seebeckovom efektu. Seebeckov efekt je onaj efekt pri kojem se pojavljuje električni napon u električnom strujnom krugu sastavljenom od dvaju različitih metalnih

vodiča kada su im materijali vodiča na različitim temperaturama. Termopar ili termoelement omogućava izravno pretvaranje razlike temperatura u električnu struju dakle neposredno pretvara toplinsku energiju u električnu i najčešće je upotrebljavani temperaturni senzor. Kako bi dobili pojavu termonapona koriste se 2 različita materijala najčešće obične metalne slitine. Spoje li se krajevi promatranih žica zavarivanjem, dobiva se termopar i pri promjeni temperature na zavarenom kraju dolazi do razlike potencijala U_T koji je razmjernan razlici temperatura T_1 i T_2 . Inducirani napon U_T se naziva termonapon. Matematički zapis opisanog Seebeckovog efekta glasi:

$$U_T = a(T_1 - T_2) \quad (4-69)$$

U izrazu 4-69 konstanta a ovisna je o kombinaciji korištenih materijala, odnosno o tipu termopara, a kreće se od 1...5 mV/100K.

Mjerno spojište jedan je kraj koji treba biti čvrsto spojen a drugi kraj vodova je referentno spojište gdje se mjeri napon. Ako se to spojno mjesto zagrijava na određenu temperaturu onda se pojavljuje napon između drugih, slobodnih krajeva žice. Napon je karakterističan za određene vodiče i mijenja se s promjenom temperature, nadalje, mjerenjem spomenutog napona se također može saznati točan iznos temperature spojnog mjesta. Ako je potreban veći napon, termočlanci se spajaju serijski spoj. Termoparovi imaju vrlo visoku točnost za određene mjerne opsege a njegove izvedbe su unaprijed određene normama i tipovima. [27]



SL. 4.13: Prikaz rada termopara [33]

Temperaturni osjetnik je u temperaturnom okružju strano tijelo, pa svojom prisutnošću izaziva smetnje pri mjerenju. Izmjerena temperatura stoga nešto odstupa od stvarne. [20] Kako bi se odstupanja temperature svela na što manju razinu, pri postavljanju termoparova je potrebno pripaziti da se nalaze u neposrednoj blizini površine elementa čija se temperatura mjeri. Kako bi se to osiguralo koristi se ljepljiva krep traka koja ima svojstvo da prijanja za materijal (u ovom slučaju metalno kućište asinkronog stroja) i pri visokim temperaturama. Također, ukoliko fizička svojstva materijala i vanjski utjecaju poput vibracija i izloženosti vlagi dopuštaju, preporuča se upotreba termalne paste pomoću koje se termopar sonda pozicionira na njoj predviđeno mjesto.

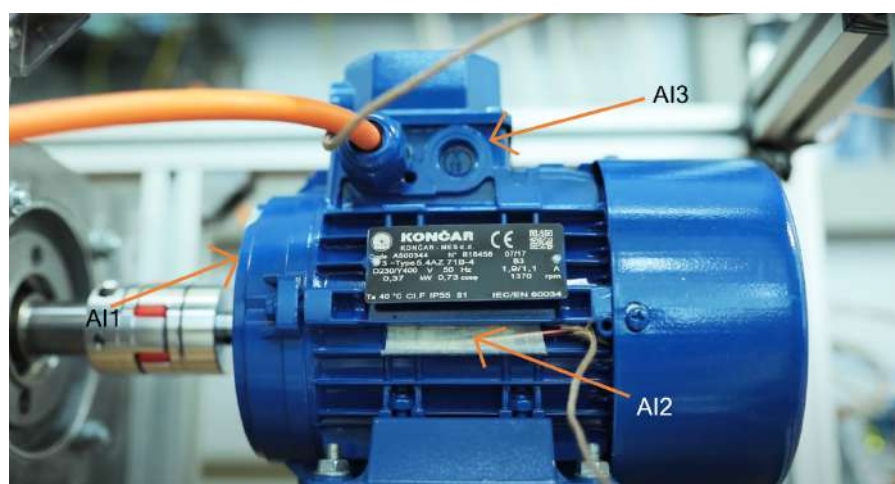
4.1.1 Položaj mjernih sondi pri izvođenju testiranja asinkronog stroja

Za potrebe ovog pokusa koriste se četiri termopara klase J. Kako je prethodno napomenuto, za rad su potrebne dvije vrste materijala. Kod klase J pozitivni metal je željezo, a negativni metal je slitina bakra (55%) i nikla (45%). Temperaturni mjerni raspon J tipa termopara je u iznosu od -219°C do 760°C što ovu klasu smješta u jednu od najčešće korištenih kada se u obzir uzme mjerni opseg i njihova cijena.

Prema IEEE 112 standardu za ispitivanje višefaznih asinkronih motora i generatora, dužina termoelementa koji se nalazi na stroju ne bi trebala prelaziti 5 cm. Unutar ovoga diplomskog rada i procesa mjerenja temperatura se mjeri na sljedećim mjestima:

- sonda za mjerenje temperature prostorije (AI0)
- iznad osovine motora na prednjem djelu kućišta (AI1)
- bočni štit asinkronog stroja unutar žlijeba za hlađenje s desne strane (AI2)
- na dnu priključne kutije (AI3)

Položaj mjernih sondi na asinkronom stroju je prikazan slikom 4.14.



SL. 4.14: Položaj mjernih sondi na asinkronom stroju

Pri postavljanju sondi treba obratiti veliku pozornost na to da kada se postavljaju s ljepljivom krep trakom ne ostaju mjehurići zraka koji dovode do pomicanja sonde tokom rada i rezultiraju oscilacijama mjerenih vrijednosti temperature. Preporučljivo je prije postavljanja podlogu obrisati čistim alkoholnim ubrusom radi boljeg prijanjanja. Isto tako prije postavljanja sonde unutar priključne kutije potrebno je odspojiti sve priključne terminale i priključnu sabirnicu kako bi se došlo do metalnog dna kutije. Kada se sonda zalijepi na dno kutije potrebno je napojne kablove vratiti po ispravnom redosljedu faza. Sonda koja se postavlja unutar priključne kutije se dovodi u nju kroz isti otvor kao i napojni kablovi i tako se minimaliziraju gubici i toplinska disipacija te se dobiva točno očitavanje temperature. Pri odabiranju mjesta za sondu koja će mjeriti sobnu temperaturu, potrebno je obratiti pozornost da se nalazi na sigurnoj udaljenosti od testiranog asinkronog stroja te da isti neće imati velikog utjecaja na mjernu sondu tokom testiranja. Neki od mjernih pogrešaka sobne temperature mogu biti preblizu pozicionirana sonda tako da radijacija topline s asinkronog stroja utječe na nju, strujanje zraka ventilatora motora u direktnom smjeru sonde za mjerenje temperature prostorije ili poremećaj temperature iz okolnih toplinskih sustava.

4.2. Postupci i opis mjerenja otpora

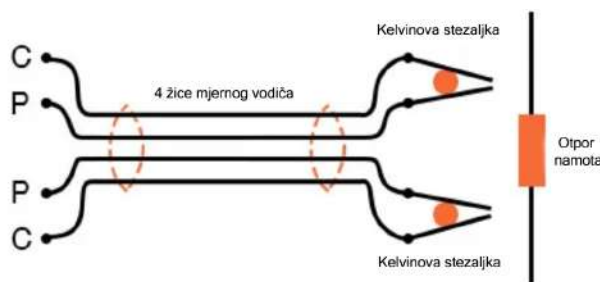
Zbog ograničenja i mjerne pogreške otpora namota pri korištenju metode dvije stezaljke, unutar ovoga rada se koristi metoda s četiri stezaljke. Metoda četiri stezaljke se koristi pri mjerenju malih otpora, pri mjerenju se koristi uređaj Keithley 2000 koji u sebi sadrži strujni izvor i

voltmetar te pomoću njih dolazi do traženog otpora. Mjerenje otpora namota se izvodi na način da se pomoću dva duža vodiča produže izvodi namota motora kako bi se uređaj nalazio na sigurnoj udaljenosti tokom testiranja motora, što ujedno omogućava lakšu automatizaciju procesa mjerenja otpora, odnosno nije potrebno pri svakom mjerenju spajati stezaljke mjernog uređaja na namote. Pri spajanju stezaljki mjernog uređaja na izvedene vodiče namota motora potrebno je pripaziti da taj spoj bude što čvršći i stabilniji kako bi se smanjile oscilacije mjerenog otpora. Nakon što se spoje svi vodiči s mjernim uređajem potrebno ih je kratko spojiti na najudaljenijem kraju, odnosno u priključnoj kutiji asinkronog stroja kako bi se kompenzirali otpori mjernih vodiča (mjernih stezaljki uređaja Keithley 2000 i izvedenih namota bakrenim licnatim vodičem). Kada se vodiči kratko spoje na zaslonu uređaja Keithley 2000 prikazan na slici 4.15 se treba pojaviti iznos otpora koji je jednak onom koji pružaju mjerni vodiči te pritiskom na tipku *REL* kompenzira njihov otpor i iznosi 0Ω s čime se uklanja utjecaj otpora mjernih vodiča.



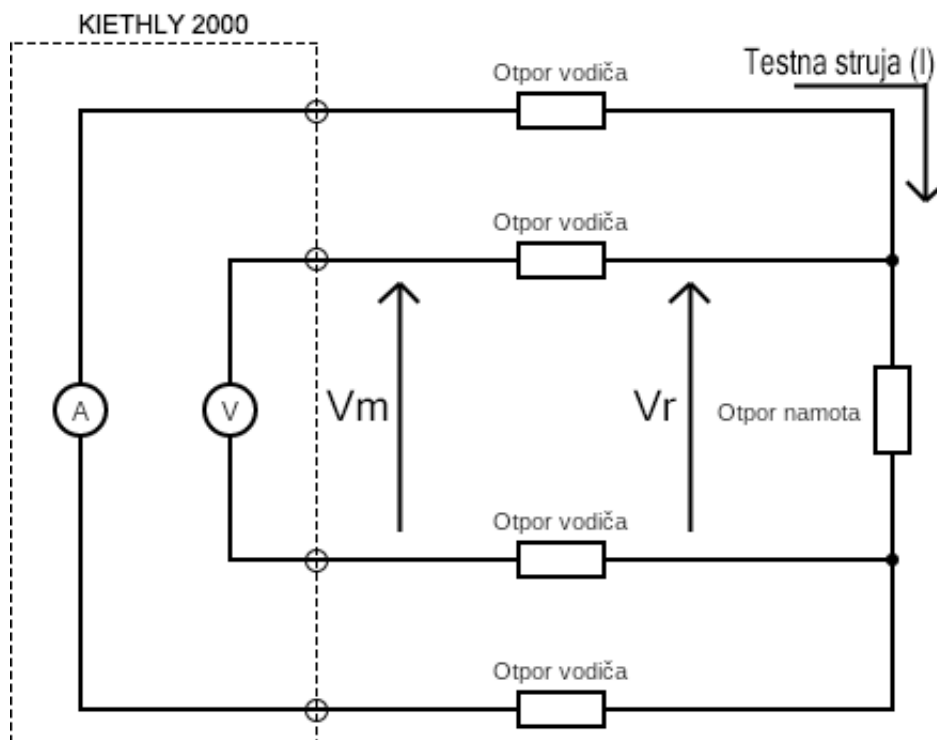
SL. 4.15: Mjerni uređaj Keithley 2000

Metoda mjerenja koja izbjegava pogreške uzrokovane otporom žice naziva se Kelvin ili četiri-žična metoda. U Kelvin kvačicama, polovice čeljusti su izolirane jedna od druge na mjestu zgloba, samo se dodiruju na vrhovima gdje pričvršćuju žicu ili terminal predmeta koji se mjeri, što se vidi na slici 4.16. Dakle, struja kroz polovice "C" (struja) ne prolazi kroz polovicu "P" (napon) i neće stvoriti pad napona koji uzrokuje pogreške duž svoje dužine:



SL. 4.16: Princip spoja Kelvinovih stezaljki

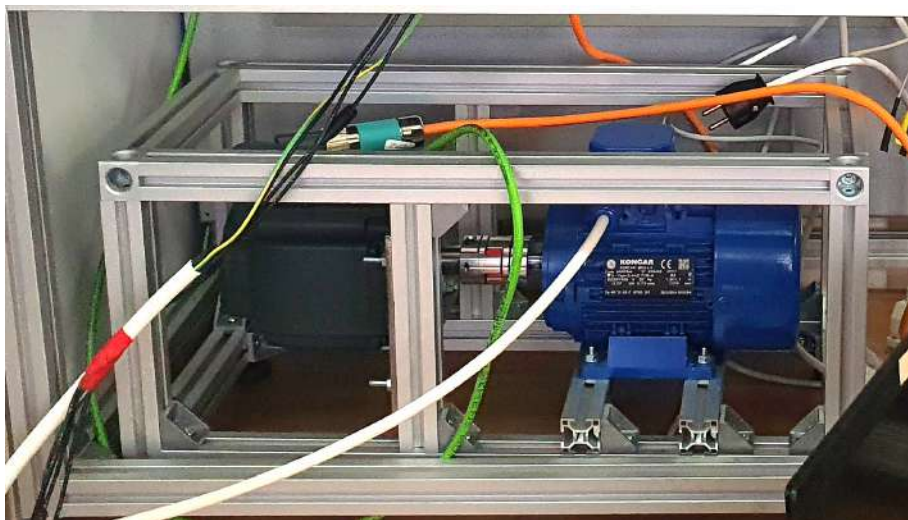
Kao što je prethodno rečeno, mjerenja se vrše pomoću uređaja tako da testna struja (I) prolazi kroz traženi otpor (otpor namota) kroz "C" parove vodova. Napon V_m se mjeri kroz drugi par vodova, odnosno "P" par. Iako kroz vodove na kojima se mjerni napon u praksi teče mala struja, ona se može zanemariti. Pad napona na mjernomvodu napona je zanemariiv, pa je napon (V_m) u osnovi jednak naponu (V_r). Posljedično tome i vrijednost otpora se može odrediti puno preciznije nego s dvožičnom metodom. Treba imati na umu da mjerni vodovi napona trebaju biti spojeni što bliže mjerenom elementu za vrijeme testiranja i mjerenja kako bi se izbjeglo uključivanje otpora mjernih vodiča u mjerenju. Shema spoja mjerenja otpora s četiri stezaljke je prikazana na slici 4.17.



SL. 4.17: Shema spoja mjerenja otpora metodom četiri stezaljke

4.3. Postupci i opis mjerenja brzine

Kako bi se jasnije shvatio postupak mjerenja brzine potrebno je objasniti laboratorijski postav ispitne stanice za asinkrone strojeve. Osnovni dio stanice je ispitivani asinkroni stroj na čiju je osovinu spojen servo motor koji služi za terećenje asinkronog motora. Iz razloga što su njihove osovine spojene i brzina vrtnje je u svakom trenutku jednakog iznosa, rezolver za mjerenje brzine se nalazi na servo motoru. Slika 4.18 prikazuje dio ispitne stanice na kojoj se nalaze povezani servo motor i asinkrni stroj.

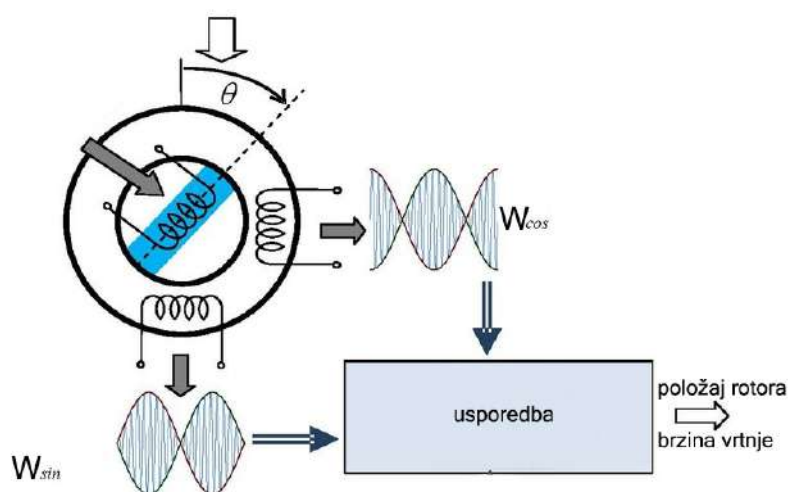


SL. 4.18: Servo motor (lijevo) i asinkroni stroj (desno)

Prema literaturi [28], brzina vrtnje se mjeri pomoću 14 bitnog rezolvera proizvođača

Siemens, model R14DQ. Rezolver je vrsta rotirajućeg električnog transformatora koji mjeri stupnjeve rotacije i spada u skupinu indukcijskih senzora jer mu se princip rada zasniva na rotirajućim zavojnicama.

Cilj rezolvera je definiranje kuta zakreta motora u sinuse i kosinuse kuta [29]. Za položaj rotora pod kutem Θ u namotima rezolvera W_{cos} i W_{sin} induciraju se naponi čija amplituda ovisi o zakretu osovine. Frekvencija izlaznih valnih oblika *sin* i *cos* je jednaka frekvenciji pobudnog napona. [31]. Slika 4.19 prikazuje princip rada rezolvera, on na sekundarnoj strani daje dva signala sinusnog i kosinusnog valnog oblika, dok je na primaru priključen izmjenični napon. Usporedbom sinusnog i kosinusnog valnog oblika se određuje kut zakreta te samim time i brzina vrtnje rotora. Za mehanički okret osovine od 360° , na izlazu dolazi do signala u trajanju od punog perioda jedne sinusoide, sukladno tome i kosinusoide. Broj punih perioda definira mjerenu brzinu vrtnje asinkronog stroja.



SL. 4.19: Princip rada rezolvera [30]

Rezolver koji se nalazi na servo motoru je spojen u motorski modul s kojim se upravlja pomoću PLC uređaja proizvođača Siemens, model S-1200. Za uspješnu komunikaciju između mjeriteljskog sučelja u kojem se odvija mjerenje i numerički proračun, potrebno je ostvariti obostranu komunikaciju između PLC uređaja i LabVIEW programa. Vrsta komunikacije za izmjenu podatka se ostvaruje pomoću OPC servera koji će biti opisan u poglavlju 5.4.

4.4. Postupci i opis mjerenja momenta

Postupak ispitivanja asinkronih strojeva zahtjeva precizno mjerenje momenta kojeg ispitivani stroj daje na izlazu tokom ispitne procedure. Kao i brzina, vrijednost momenta se također mjeri na strani servo motora. Slika 4.18 prikazuje spojene osovine opterećenog servo motora i ispitivanog asinkronog stroja. Uzimajući u obzir mehanički spoj osovina, mjerenje momenta se izvodi pomoću estimacije momenta unutar frekvencijskog pretvarača koji upravlja opterećenim servo motorom.

U literaturi [32] je objašnjena estimacija momenta unutar frekvencijskog pretvarača proizvođača Siemens, model S-120, koja se zasniva na dinamičkom observeru koji vrši proračun momenta pomoću matematičkog modela servo motora i mjerenih vrijednosti tokom njegovog rada što

daje vrlo preciznu vrijednost momenta, prema tome se koristi pri izradi ovoga rada. Estimirani moment se sprema na adresu unutar statusne riječi za komunikaciju između frekvencijskog pretvarača i PLC uređaja. Kao i brzina, vrijednost momenta se šalje u LabVIEW mjerno sučelje pomoću OPC servera koje je opisano u poglavlju 5.4.

5. LABORATORIJSKI SUSTAV ZA ISPITIVANJE ASINKRONIH MOTORA

Postupak automatiziranog ispitivanja asinkronih strojeva uvelike pojednostavljuje provođenje ispitne procedure, no čovjek nije potpuno isključen iz procesa. Sustav za ispitivanje asinkronih predstavlja složeni proces koji sadrži više cjelina poput upravljanja, mjerenja i prikupljanja podatka s ciljem utvrđivanja ispravnosti stroja. Razina automatizacije unutar ovog rada se sastoji od:

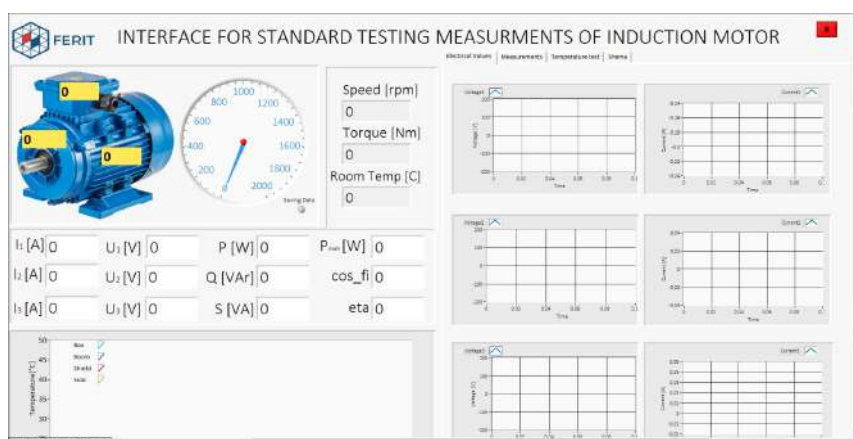
- automatiziranog upravljanje strojevima uključenim u ispitivanje
- automatiziranog procesa prikupljanja podataka

Laboratorijski sustav za ispitivanje asinkronih strojeva se sastoji od pet glavnih dijelova, a to su:

- sustav za napajanje asinkronog stroja i servo motora - Sastoji se od trofaznog transformatora čiji izlazi vode do releja koji je upravljan od strane PLC uređaja. Servo motor se kontrolira i napaja u potpunosti od strane Siemensove opreme, njegova primarna uloga je opterećenje asinkronog stroja, a služi i za hlađenje asinkronog motora pošto svojom vrtnjom pokreće i ventilator koji se nalazi na poleđini asinkronog stroja.
- industrijska oprema za automatizaciju ispitnog procesa - Automatizacija provođenja ispitivanja podrazumijeva automatsko podešavanje radne točke stroja pri snimanju karakteristika. Ulogu kontrole procesa ima Siemens PLC, serije S-1200. PLC upravlja radom opteretnog servo motora, relejima koji se aktiviraju pri mjerenju otpora, prebacivanjem iz lokalnog (eng. *local control*) načina upravljanja procesom u udaljeni (eng. *remote control*) i mnogim drugim sigurnosnim uvjetima koji se moraju zadovoljiti radi očuvanja opreme i sigurnosti operatera ispitne stanice .
- električni pogon koji se sastoji od ispitivanog asinkronog stroja i opteretnog servo motora - Postolje na kojem se nalaze ispitivani asinkroni motor i opteretni servo motor je središnji dio ispitne stanice. Osim motora, dio postava su i mjerni senzori za brzinu i termoelementi za mjerenje temperature asinkronog stroja. Pri pozicioniranju termoelementa je potrebno pripaziti kako nebi došli u izravan kontakt s rotirajućim dijelovima stroja. Također, od ključne važnosti je precizno spajanje osovina servo i asinkrnog stroja, jer upravo to osigurava stabilan rad, bez vibracija i ubrzane potrošnje ležajeva motora koji mogu prouzročiti porast temperature.
- oprema za mjerenje - Unutar ispitne procedure potrebno je mjeriti električne i neelektrične veličine, te prikupljati mjerene vrijednosti pomoću LabVIEW programa. Za mjerenje električnih veličina napona koriste se tri diferencijalne naponske sonde GW-Instek GDP-025, a vrijednosti struje se mjere pomoću triju strujnih kliješta proizvođača Tektronix, model A622. Sve mjerne sonde za mjerenje električnih veličina se spajaju na DAQmx karticu. To je uređaj koji omogućuje povezivanje senzora i sondi sa računalom putem

USB komunikacijskog protokola sa vrlo velikom frekvencijom ažuriranja podataka. Mjerenje neelektričnih veličina se realizira upotrebom Compact RIO kontrolera za mjerenje temperature i Keithley 2000 mjernog uređaja za mjerenje vrijednosti otpora.

- grafička sučelja za upravljanje ispitnom stanicom i upravljanje procesom mjerenja električnih i neelektričnih veličina - Sustavi za izvođenje ispitnog procesa asinkronog stroja su razdvojeni na dva računala sa svrhom lakšeg vođenja procesa i vizualizacije mjerenih vrijednosti. Prvo grafičko sučelje služi za upravljanje ispitnim procesom i izrađeno je pomoću TIA Portala i WinCC programskog paketa. Njegova uloga je upravljanje industrijskom opremom za napajanje, odabir načina kontrole i razine opterećenja definirane iznosom brzine ili momenta. Drugo grafičko sučelje služi za prikaz mjerenih veličina, mjerenje i pohranjivanje podataka za daljnju analizu, prikazano je na slici 5.20.



SL. 5.20: Grafičko sučelje za mjerenje tokom provođenja ispitne procedure

Grafičko sučelje je u potpunosti izrađeno uporabom LabVIEW programa te sadrži vizualni i numerički prikaz svih mjerenih električnih i neelektričnih veličina. Od funkcionalnosti sučelja posjeduje automatizirani sustav za pohranu podataka u odabranom vremenskom periodu, koji operateru ispitne stanice omogućava unošenje vremenskog intervala pohrane podataka.

Slika 5.21 prikazuje navedene dijelove ispitne stanice.

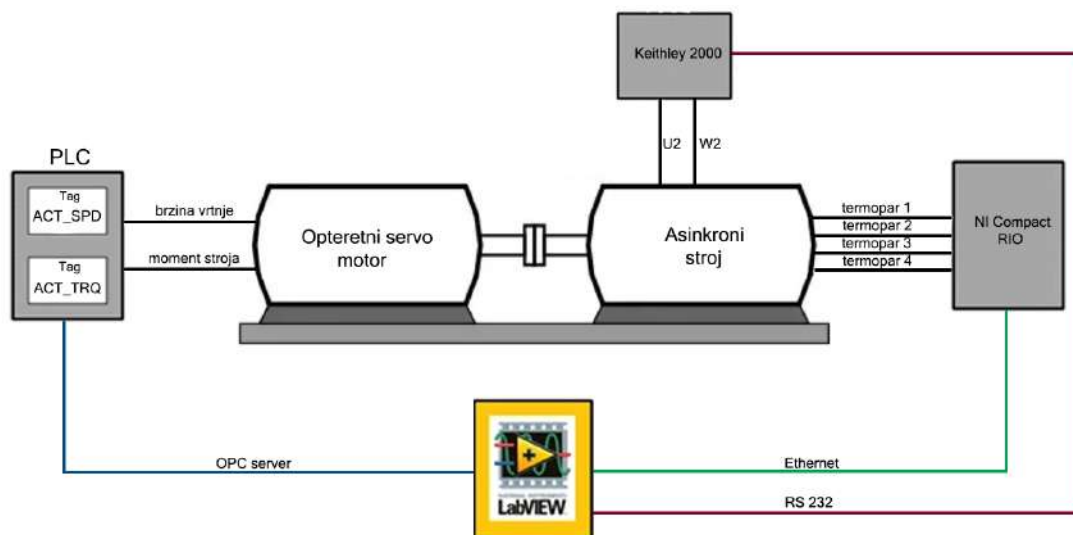


SL. 5.21: Ispitna stanica za ispitivanje asinkronih strojeva

Kombinacijom svih navedenih dijelova ispitne stanice, postiže se uvjet za automatizirano ispitivanje asinkronih strojeva, koje od operatera iziskuje minimalnu interakciju s mjernom opremom i samim strojem. Isto tako, provođenje ispitne procedure je vrlo jednostavno korištenjem grafičkog sučelja za upravljanje ispitnim procesom, jednostavnim unosom vrijednosti opterećenog servo motora se dolazi do željenog radnog režima asinkronog stroja. Pri izvođenju ispitne procedure vrlo je važno pratiti sve mjerene vrijednosti snage, struje, napona i temperature kako ne bi došlo do oštećenja mjerne opreme ili samog asinkronog stroja.

5.1. Opis laboratorijskog sustava mjerenja neelektričnih veličina

Mjerenje neelektričnih veličina, kako je prethodno spomenuto, podrazumijeva mjerenje sljedećih vrijednosti ispitivanog stroja: temperature, otpora namota, brzine vrtnje i momenta. Svaka od mjerenih veličina zahtjeva opremu i način na koji se izvodi uspješno mjerenje. Laboratorijski sustav za mjerenje se sastoji od opreme pomoću koje se promatrana veličina mjeri i komunikacijskog kanala pomoću kojega se prikazuje unutar grafičkog sučelja za mjerenje. Slika 5.22 prikazuje blokovski prikaz laboratorijskog sustava za mjerenje neelektričnih veličina.



SL. 5.22: Blokovski prikaz laboratorijskog sustava za mjerenje neelektričnih veličina

Mjerenje otpora namota se izvodi pomoću Keithley 2000 mjernog uređaja koji se konfigurira za mjerenje otpora pomoću metode četiri stezaljke. Mjerni postav za mjerenje otpora se sastoji od samog uređaja na koji su spojene stezaljke koje se spajaju na izvedene namote ispitivanog asinkronog stroja. Mjerenje temperature se izvodi pomoću uređaja Compact RIO, proizvođača NI. Uređaj se sastoji od kućišta na koji se spajaju moduli sa ulazima za senzore. Termoelementi se spajaju na module i ispitivani asinkroni stroj koji mjerenu temperaturu putem Ethernet komunikacijskog protokola prosljeđuje u LabVIEW program i prikazuje unutar grafičkog sučelja. Za potrebe mjerenja brzine i momenta ispitivanog asinkronog stroja uspostavlja se OPC server za razmjenu podataka te se mjerene vrijednosti preuzimaju s PLC uređaja.

5.2. National Instruments Compact RIO

Za potrebe mjerenja temperature se koristi Compact RIO-9024 od proizvođača NI. To je modularni kontroler visokih performansi koji omogućava prijenos podataka u stvarnom vremenu

kao i visoke mogućnosti obrade podataka. Sami kontroler se spaja na kućište koje u sebi sadrži priključke za module koji su prikazani na slici 5.23.

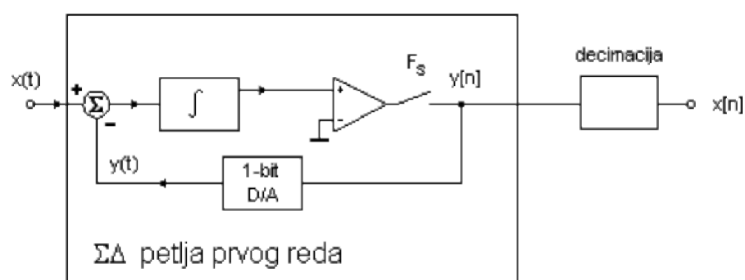


SL. 5.23: Compact RIO-9024 mikro-kontroler

NI 9211 je modul C serije od proizvođača NI koji ima mogućnosti kontrole i prikupljanja podataka unutar širokog spektra aplikacija. Njihova značajka je velika mjerna preciznost i mogućnost povezivanja do četiri termopara po modulu.

Neke od prednosti korištenja NI 9211 modula su:

- **24 bitni delta-sigma ADC pretvarač** - tehnička izvedba delta-sigma ADC pretvarača se sastoji od integratora, komparatora i 1-bitnog digitalno-analognog pretvarača (DAC) posloženih u petlju negativne povratne sprege, kao što je prikazano na slici 5.24



SL. 5.24: Shematski prikaz komponenti delta-sigma kruga

U integratorski krug dovodi se zbroj ulaznog signala i negiranog izlaza iz digitalno-analognog pretvarača. Izlaz integratora je signal rampe čiji je nagib proporcionalan njegovom ulazu. Izlaz integratora uspoređuje se s referentnim signalom komparatora kako bi se generirao bit u iznosu 0 ili 1. Binarni izlaz komparatora se zapisuje u digitalni filter za procjenu ruba signala i oversamplig frekvencije. Svaki bit predstavlja smjer izlazne rampe integratora s obzirom na referencu usporedbe i, nakon višestrukih iteracija, tok bita slični kvantiziranoj vrijednosti ulaznog signala. U osnovi povratna petlja djeluje tako da prosječni izlaz digitalno analognog pretvornika odgovara ulaznom signalu. Digitalni filter za decimaciju prosječno usmjerava pojedinačno svaki bit da bi se dobio n-bitni uzorak pri željenoj brzini uzorkovanja F_s . [23]

- **detekcija termoparova pri spajanju** - svaki kanal na modulu NI 9211 prikazanog na slici ima otvoreni krug za otkrivanje termoparova koji se sastoji od izvora struje između TC + i TC- terminala. Ako je otvoreni termopar spojen na kanal, izvor struje inducira napon preko vodova termopara i na taj način ih prepoznaje. [24]



SL. 5.25: Modul NI 9211

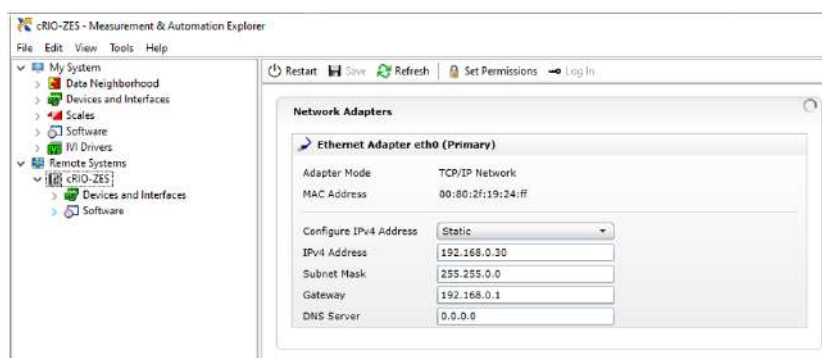
- **kompensacija hladnog spoja za termopar radi visoke preciznosti mjerenja** - toplina koja se rasipa sa susjednih modulima serije C ili obližnjih izvora topline može uzrokovati pogreške u mjerenja termopara. Toplinski gradijent na spojnim stezaljkama se može razlikovati, te terminali različitih NI 9211 kanala mogu biti na različitim temperaturama, što stvara mjerne pogreške i utječe na relativnu točnost mjerenja između kanala. Konačna mjerena vrijednost u sebi sadrži kompenzaciju vanjskih utjecaja, odnosno pogreške uzrokovane toplinskim rasipanjem preko terminala NI 9211.

Prema NI priručniku o uporabi NI 9211 serije C modula mjerna pogreška može biti uzrokovana:

- tipom termopara koji se koristi
- mjernom preciznosti unutar područja rada termopara
- mjerenom temperaturom
- otporom vodiča termopara

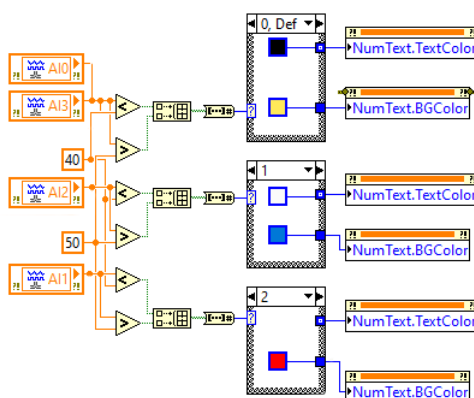
5.2.1 Prikupljanje potataka o temperaturi

Kao što je spomenuto za prikupljanje temperature se koristio uređaj od NI, Compact RIO. Uređaj se spaja na računalo pomoću sabirnice za ethernet priključke proizvođača Siemens, model SCALANCE XB008. Računalo se također spaja na tu istu sabirnicu te se pokreće program NI MAX (Measurement & Automation Explorer) koji je besplatan program od NI-a i služi za detekciju i konfiguraciju uređaja koji su dio NI VISA i DAQmx platforme. Ima funkcije poput resetiranja na tvorničke postavke, dodjeljivanje IPv4 adrese koja je bitna radi uspostavljanja komunikacije s PLC uređajem što će biti opisano u poglavlju 5.4. Slika 5.26 prikazuje sučelje NI MAX programa i s lijeve strane se vidi padajući izbornik *Remote Systems* unutar kojega se nalazi priključeni uređaj compact RIO pod nazivom *cRIO-ZES*, klikom na njega otvara nam se izbornik s desne strane unutar kojega se vrši njegova konfiguracija.



SL. 5.26: Prikaz sučelja unutar NI MAX programa

LabVIEW program osim selekcije pojedinih .vi datoteka omogućava i organizaciju priključenih uređaja koji se koriste za procese mjerenja. Nakon provedene konfiguracije uređaja, preostaje pokrenuti LabVIEW te se unutar projekta dodaje Compact RIO kao uređaj za prikupljanje podataka. Nakon dodavanja uređaja unutar projekta se nalazi popis svih spojenih modula na Compact RIO te otvaranjem se modula NI 9211 u padajućem izborniku prikazu svi spojeni termoelementi. Oni se prevlačenjem pozicioniraju unutar programa te se izrađuje sekvenca za prikupljanje podataka o temperaturi. Kako bi sučelje bilo orijentirano prema operateru i radi lakšeg primjećivanja porasta temperature asinkronog stroja tokom testiranja, razvija se logika unutar LabVIEW programa pri kojoj dolazi do promjene boje kućice kada temperatura prijeđe određenu vrijednost. Slika 5.27 prikazuje termoelemente (AI0,AI1,AI2 i AI3) spojene na modul NI 9211 unutar kućišta Compact RIO mikro-kontrolera.



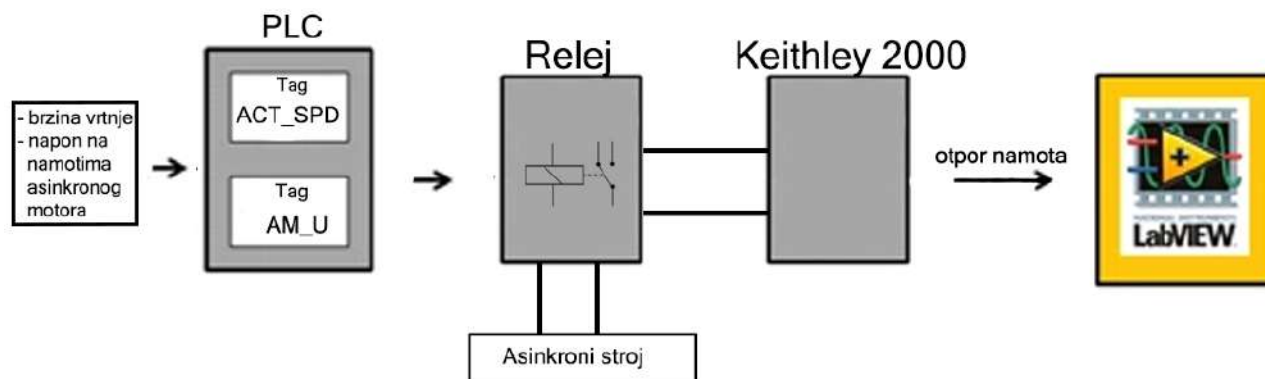
SL. 5.27: Sonde za mjerenje temperature unutar LabVIEW programa

Prikupljanje podataka o temperaturi se vrši pomoću bloka *Write To Measurement File* te se unutar njega odabire način pohranjivanja podataka u .csv obliku datoteke radi lakše daljnje obrade rezultata testiranja.

5.3. Implementacija Keithley 2000 unutar LabVIEW programa

Prikupljanje mjernih podataka otpora je potpuno automatizirano pomoću PLC-a. Potrebno je obratiti pozornost na to da tokom rada asinkronog motora ne dolazi do pojave napona na izvedenim namotima motora koji imaju isključivo ulogu za mjerenje otpora. To se postiže tako da se tek nakon završetka vrtnje motora i utvrđivanja beznaponskog stanja odnosno razine napona koja neće oštetiti mjernu opremu dobiva uvjet za uklop releja. PLC serije S-1200

preuzima ulogu kontrole uvjeta uklapanja releja pomoću svojih analognih ulaza i izlaza. Nakon postizanja uvjeta za mjerenje otpora namota i pritiskom na tipku unutar LabVIEW grafičkog sučelja spremamo traženu veličinu u tablicu mjerenih vrijednosti. Ovaj pristup mjerenju otpora se pokazao vrlo pouzdan i precizan tokom cijelog testiranja, odlikuje ga jednostavnost i potpuna automatiziranost u smislu prikupljanja podataka i zaštite opreme. Slika 5.28 prikazuje blokovski prikaz spoja za mjerenje otpora namota asinkronog stroja.



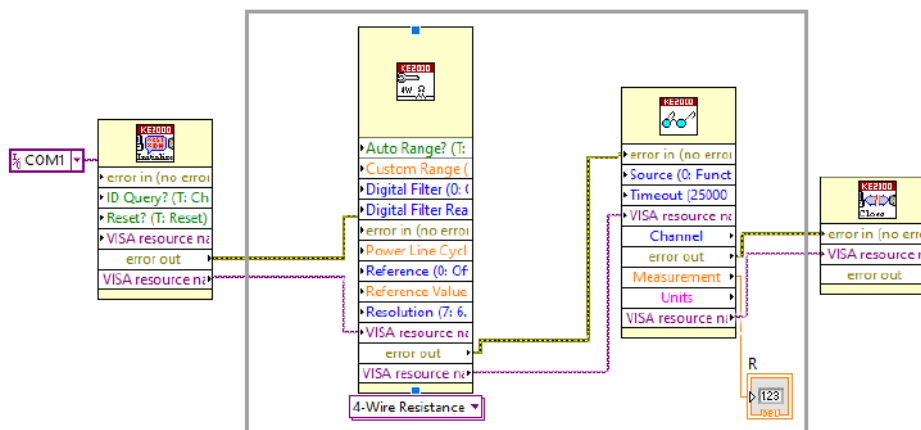
SL. 5.28: Blokovski prikaz sustava za mjerenje otpora

Kako bi prikupljanje podataka s mjernog uređaja Keithley 2000 bilo moguće unutar LabVIEW programa, potrebno je odraditi njegovu konfiguraciju. Prvo je potrebno odraditi konfiguraciju samog mjernog uređaja koja uključuje omogućavanje RS-232 komunikacijskog ulaza/izlaza, nakon kablenskog povezivanja s računalom dolazi do uspostave veze, odnosno računalno prepoznaje uređaj te preostaje odrediti konfiguraciju i postavke mjerenja unutar LabVIEW programa. Pri automatizaciji mjerenja određenog uređaja s LabVIEW programom je potrebno preuzeti "driver" za određeni uređaj. Nakon preuzimanja unutar padajućeg izbornika pod karticom *Instruments I/O* → *Instrument Drivers* pronalazimo određene blokove koji služe za dodavanje i odabir mjerenja željenog uređaja, u ovom slučaju mjerenje otpora metodom četiri stezaljke pomoću uređaja Keithley 2000. Redoslijed slaganja blokova je sljedeći:

- Blok za inicijalizaciju - Ulaz u blok predstavlja broj komunikacijskog ulaza unutar kojega je spojen mjerni uređaj. U ovom slučaju se radi o COM 1 portu na računalu. Blok se nalazi izvan glavne funkcije izvršavanja procesa (main) jer njegova iteracija je dovoljna da se odradi jednom pri samom pokretanju programa kako bi se prepoznao ulaz koji ostaje isti tokom izvršavanja programa i mjerenja.
- Blok za odabir mjerenja - Svrha bloka je da se pri dnu u padajućem izborniku odabere mjerenje koje se izvodi pomoću uređaja. Taj odabir u pozadinskim LabVIEW procesima dolazi do tražene mjerene veličine i njene mjerne jedinice. Neki od odabira su mjerenje struje, napona, otpora metodom dvije stezaljke itd. U ovom slučaju kao što je prethodno spomenuto odabire se mjerenje otpora s metodom četiri stezaljke.
- Blok za očitavanje vrijednosti - Nakon što je u prethodnom bloku odabrana veličina koja se želi mjeriti i njena metoda, potrebno je mjerenu vrijednost obraditi na način da se preusmjeri u blok za ispisivanje vrijednosti na grafičkom sučelju. Osim brojčanog ispisa na grafičkom sučelju, mjerena vrijednost se sprema kako bi se koristila u daljnjoj obradi podataka. Vrlo je bitno da se u trenutku kada se sprema vrijednost otpora namota također spremi i iznos temperature mjernih sondi, čije je pozicioniranje opisano u prethodnom poglavlju.

- Blok za zatvaranje programa mjerenja - Pri završetku izvršavanja programa, prekidom na tipku stop ili u slučaju pojave greške u komunikaciji dolazi do gubitka varijable "VISA resource name" s čijim se gubitkom automatski zatvara program pomoću navedenoga bloka. Također, postoji mogućnost numeričkog ispisa greške koja se pojavila tokom mjerenja, te naknadnim istraživanjem u katalogu uređaja se može utvrditi točan razlog kvara.

Pojednostavljeni shematski prikaz opisanih blokova za automatizirano mjerenje i spremanje vrijednosti otpora metodom četiri stezaljke je prikazano na slici 5.29.



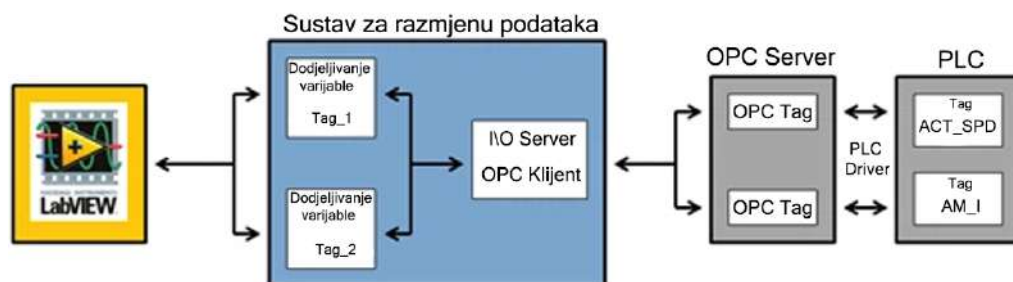
SL. 5.29: Shematski prikaz blokova za mjerenje otpora unutar LabVIEW programa

Kao i prethodno opisana brzina, prikupljanje vrijednosti otpora se vrši pomoću bloka *Write To Measurement File*, te se nakon toga sprema u .csv obliku datoteke.

5.4. Uloga OPC servera za mjerenje brzine vrtnje i momenta

OPC (*Open Platform Communications*) je tehnologija koja omogućava obostranu komunikaciju između klijenta i servera. Svaka strana unutar komunikacije može pružati podatke ili koristiti podatke [25]. Broj klijenata unutar komunikacije sa serverom nije ograničen i upravo iz tog razloga je široko prihvaćena metoda za razmjenu podataka unutar industrijskih pogona, laboratorija i ispitnih postrojenja. OPC zaklada je definirala niz standarda koji omogućavaju svakom proizvođaču industrijskih uređaja da se nalazi na listi OPC kompatibilnih uređaja, iz tog razloga, većina današnjih PLC uređaja i programa je dizajnirana za rad sa standardom OPC zaklade [26].

Za potrebe izrade ovog diplomskog rada uspostavlja se obostrana komunikacija između LabVIEW programa i Siemensovog PLC uređaja, serije S-1200. S takvim sustavom se postigne mogućnost slanja i preuzimanja vrijednosti u oba smjera u vrlo malom vremenskom kašnjenju (manje od 100 ms). Shematski prikaz na slici 5.30 prikazuje princip rada OPC servera ispitne stanice za testiranje asinkronih strojeva.



SL. 5.30: Shematski prikaz konstrukcije OPC servera

Princip rada je sljedeći, varijable koje PLC šalje prema OPC serveru su iznos brzine vrtnje, označene sa oznakom *ACT_SPD* i iznos momenta, sa oznakom *ACT_TRQ*. Druga strana komunikacije se sastoji od slanja vrijednosti temperature namota, struje (koja je na shemi označena oznakom *AM_I*) i napona testiranog asinkronog strojaprema PLC uređaju iz LabVIEW programa radi potpune automatizacije ispitne procedure. Nakon toga se definira IP adresa mrežne kartice i vrijeme radnog ciklusa ažuriranja podataka.

Prvi korak pri kreiranju OPC servera je odabir programa pomoću kojeg će se server napraviti. Pri izradi ovog diplomskog rada odabran je program *NI OPC Servers*. Unutar programa je potrebno stvoriti novi kanal i dodijeliti mu ime i komunikacijski protokol PLC uređaja, u ovom slučaju je to *Siemens TCP/IP Ethernet*

Dodavanje PLC uređaja započinje sa dodjeljivanjem imena, te potom slijedi odabir serije Siemensovih PLC uređaja i dodjeljivanje točne IP adrese uređaja koja se nalazi u hardverskoj kartici TIA Portala.

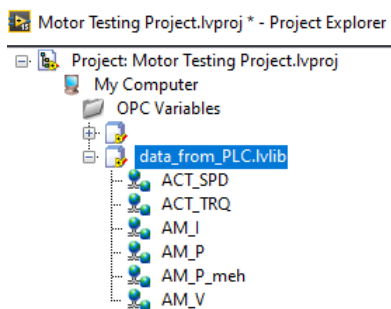
Dodavanje varijabli koje se razmjenjuju putem servera se ostvaruje pomoću *OPC Quick Client* tako što se odabirom *Siemens.PLC* grupe dodaju varijable koje se žele slati s PLC uređaja unošenjem njihovog naziva, adrese i tipa podatka, te informacije se također nalaze unutar TIA Portala. Slika 5.31 prikazuje listu varijabli koje se razmjenjuju putem OPC servera.

OPC Quick Client - Untitled *

Item ID	Quality	Data Type
Siemens.PLC._Rack	Good	Byte
Siemens.PLC._Slot	Good	Byte
Siemens.PLC.ACT_SPD	Good	Float
Siemens.PLC.ACT_TEMP	Good	Float
Siemens.PLC.ACT_TRQ	Good	Float
Siemens.PLC.AM_I	Good	Float
Siemens.PLC.AM_P	Good	Float
Siemens.PLC.AM_P_meh	Good	Float
Siemens.PLC.AM_V	Good	Float
Siemens.PLC.Tag_1	Good	Boolean

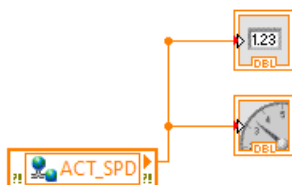
SL. 5.31: Lista varijabli na OPC serveru

Varijable su dodane na OPC server sa ulogom da se preuzimaju, analiziraju i šalju natrag na server. Preuzimanje varijabli u LabVIEW program se realizira kreiranjem I/O servera unutar LabVIEW projekta, te se kao tip servera odabire OPC klijent. Također, kao i kod kreiranja OPC servera, unutar LabVIEW programa se definira radno vrijeme ciklusa ažuriranja podataka. Zadnje što preostaje je dodavanje varijabli s OPC servera unutar LabVIEW sučelja, to se realizira tako što se desnim klikom na *data_from_PLC.lvlib* odabire *Create Bound Variables* i dodaju se željene varijable koje dolaze iz PLC-a. Slika 5.32 prikazuje dodane varijable unutar LabVIEW projekta.



SL. 5.32: *Lista varijabli unutar LabVIEW projekta*

Grafički i numerički prikaz varijabli koje su dodane u LabVIEW projekt se realizira njihovim prevlačenjem i pozicioniranjem unutar grafičkog sučelja za logiku te daljnjim povezivanjem. Slika 5.33 prikazuje varijablu brzine koja se preuzima s PLC uređaja i prikazuje u LabVIEW programu.



SL. 5.33: *Varijabla brzine dodana unutar LabVIEW programa*

Sukladno tome se realizira razmjena podataka i za ostale mjerene vrijednosti koje se kasnije koriste u proračunu i analizi ispitivanog asinkronog stroja.

6. PROGRAM ZA OBRADU PRIKUPLJENIH PODATAKA

Kako bi ispitna procedura bila zaokružena u cjelinu, potrebno je odraditi programsku obradu prikupljenih podataka. Programski dio sustava koji je zadužen za obradu rezultata mjerenja i izradu dijagrama se sastoji od programa napisanih u Matlab programu i može se naći u Prilogu 1. U nastavku je dan opis programa, kao i matematičkih funkcija koje se koriste pri obradi rezultata mjerenja.

Unutar ovoga diplomskog rada, obrada podataka se obavlja za sljedeće pokuse:

- obrada podataka prikupljenih u pokusu zagrijavanja
- obrada podataka prikupljenih u pokusu snimanja momentne karakteristike
- obrada podataka prikupljenih u stres testu

Program za obradu prikupljenih podataka se izvodi ciklički odnosno linije koda se obrađuju od prve prema posljednjoj. Pristup obradi podataka je složen proces jer zahtjeva slaganje podataka u određena polja koja definiraju mjerene vrijednosti, koje se nakon toga obrađuju. Zajedničko svakoj programskoj obradi mjerenih podataka jest što se može generalizirati u tri glavne skupine:

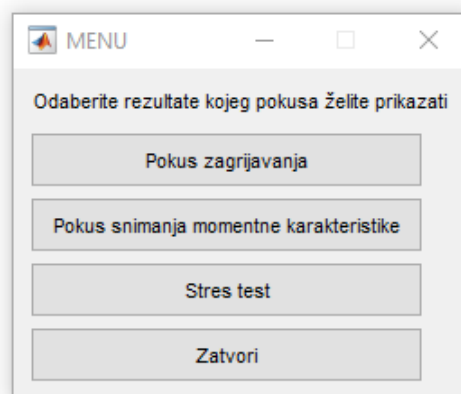
- program za učitavanje i sortiranje mjerenih vrijednosti
- program za matematičku obradu podataka
- program za grafički prikaz rezultata ispitnog procesa

Prvi korak pri izradi programa za obradu prikupljenih podataka je učitavanje *.lvm* datoteke unutar koje se nalaze sve mjerene veličine tokom ispitne procedure za određeni pokus. Matlab skripta za učitavanje podataka je prikazana u prilogu pod nazivom primjer koda 2. Kako se podatci nalaze u polju i mjerene vrijednosti su definirane stupcima, potrebno je vrijednosti koje se žele obraditi, odvojiti iz polja podataka, te ih pohraniti u njima odgovarajuću varijablu.

Svaki pokus unutar ispitne procedure zahtjeva specifičan pristup matematičkoj obradi prikupljenih podataka. Najčešće korišteni načina za matematičku obradu prikupljenih podataka pri izradi ovog diplomskog rada su pronalaženje najbolje aproksimacije funkcije kroz mjerene točke pomoću eksponencijalne i polyfit metode. Generiranje funkcija koje izvršavaju matematičku analizu se provodi pomoću Matlab programa pisanog u *.m* datotekama i pomoću programskog dodatka pod nazivom *Curve Fitting Tool* unutar kojega se odabire metoda i stupanj proračuna, te se podešavaju željeni parametri koji daju traženi rezultat. Također jedna od matematičkih funkcija programa za obradu podataka je pronalaženje maksimalne vrijednosti temperature u stacionarnom stanju rada tokom zagrijavanja i pronalazak maksimalne nadtemperature do koje dolazi pri zaustavljanju motora, nakon koje počinje njegovo hlađenje.

Generirani kod kreiran od strane prethodno opisanog Matlab dodatka se sprema u obliku *.m* datoteke i prikazan je u prilogu 3. Unutar koda su sadržane funkcije koje obavljaju prethodno opisanu matematičku analizu i dio koji služi za grafički prikaz podataka. Dodatno je potrebno odraditi skaliranje i način prikaza kao i imenovanje osi apcisa i ordinata te dodijeliti naziv svakom grafičkom prikazu kako bi se jasno znalo o kojem se pokusu unutar ispitne procedure radi.

Pri početku rada s programom za obradu rezultata potrebno je pokrenuti *mainmenu.vi* koji rezultira otvaranjem prozora prikazanog na slici 6.34, unutar kojeg se odabire pokus čiji se rezultati žele prikazati. Matlab skripta kojom se definira rad glavnog sučelja je prikazana u prilogu 1.



SL. 6.34: Glavni izbornik za odabir rezultata pokusa

Odabirom željenog pokusa unutar ispitne procedure se generiraju grafički prikazi koji će biti opisani u poglavlju 7.

6.1. Matematička obrada mjerenih vrijednosti

Pouzdana ispitivanje asinkronih strojeva podrazumijeva preciznu matematičku analizu mjerenih podataka. Kako bi se bolje shvatila svrha ovog poglavlja potrebno je objasniti vremensku ovisnost prikupljanja podataka.

Tokom izvođenja ispitne procedure, svi mjereni podatci se prikupljaju ovisno o vrsti i trajanju pokusa. Unutar mjeriteljskog grafičkog sučelja postoje tri opcije za odabir vremenskog intervala spremanja podataka:

- LOG 20s - odabirom ove funkcije sve mjerene vrijednosti se spremaju svakih 20 sekundi tokom izvođenja ispitne procedure
- LOG 3s - odabirom ove funkcije sve mjerene vrijednosti se spremaju svake 3 sekunde tokom izvođenja ispitne procedure
- HOME - pritiskom *HOME* tipke na tipkovnici spremaju se sve mjerene vrijednosti

Intervali spremanja podataka su predodređeni i optimizirani na vremenski interval koji neće prouzrokovati gomilanje velike količine mjerenih vrijednosti koje nemaju svrhu u daljnoj analizi rezultata.

Uzme li se u obzir trajanje pokusa zagrijavanja asinkronog stroja koje može trajati i do četiri sata, ovisno o veličini ispitivanog stroja, tada se koristi spremanje mjerenih vrijednosti svakih 20 sekundi. Problem koji se javlja pri tome jest taj da se porast temperature općenito definira kao eksponencijalna funkcija i kako bi se došlo do točne funkcije porasta temperature asinkronog stroja, potrebno je odraditi linearnu regresiju pomoću točaka mjerenih vrijednosti temperature.

6.1.1 Pretvorba eksponencijalne funkcije u linearnu regresiju

Svrha procesa pretvorbe eksponencijalne funkcije u linearnu funkciju jest ta što se pomoću linearne funkcije lakše odrađuje proces aproksimacije funkcije (eng. curve fitting).

Pretpostavimo da je konačni oblik funkcije rasta temperature definiran eksponencijalnom funkcijom (6-70) .

$$y = be^{\frac{x}{c}} \quad (6-70)$$

Prikupljeni mjereni podatci su točke, te kako bi se definirao oblik eksponencijalne funkcije potrebno je odrediti koeficijente a i b . Prema literaturi [36], prvi korak pri transformaciji u linearnu funkciju je uporaba logaritamske funkcije kojom se dobije izraz (6-71).

$$\ln(y) = \ln\left(be^{\frac{x}{c}}\right) \quad (6-71)$$

Prema pravilima logaritama slijedi da je logaritam umnoška jednak zbroju logaritama faktora, te slijedi izraz (6-72).

$$\ln(y) = \ln(b) + \ln\left(e^{\frac{x}{c}}\right) \quad (6-72)$$

Logaritam potencije s bazom e i eksponentom bx jednak je umnošku eksponenta i logaritma s bazom e , pod tim uvjetom dobije se izraz (6-73).

$$\ln(y) = \ln(b) + \frac{x}{c} \ln(e) \quad (6-73)$$

Daljnijim sređivanjem izraza (6-73), dobije se izraz (6-74) koji se definira kao linearna jednadžba pravca.

$$\ln(y) = \frac{x}{c} + \ln(b) \quad (6-74)$$

gdje je:

- c - nagib pravca
- $\ln(b)$ - odsječak na y osi, odnosno ordinati

Sukladno tome, postupak pronalazaženja konstanti b i c se svodi na proračun vrijednosti nagiba pravca i odsječka na y osi pomoću vrijednosti mjerenih točaka koje se nalaze u okolini pravca.

Za potrebe računanja nagiba pravca c prema izrazu (6-75), prvo je potrebno odrediti za svaku točku s koordinatama (x,y) vrijednosti x^2 i umnožak xy . Sumiranjem svih izračunatih vrijednosti se dobiva $\sum x$, $\sum y$, $\sum x^2$ i $\sum xy$.

$$\frac{1}{c} = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (6-75)$$

gdje je:

- n - broj točaka na grafu, odnosno broj mjernih uzoraka

Kako bi jednadžba pravca bila potpuna, potrebno je izračunati odsječak na y osi prema izrazu (6-76).

$$b = \frac{\sum y - m \sum x}{n} \quad (6-76)$$

Linearni regresijski model za sustav od K -varijabli definiran je sustavom jednadžbi (6-77)

$$\begin{aligned} y_1 &= \beta_0 + \beta_1 x_{1,1} + \beta_2 x_{1,2} + \dots + \beta_{K-1} x_{1,K-1} + e_1, \\ y_2 &= \beta_0 + \beta_1 x_{2,1} + \beta_2 x_{2,2} + \dots + \beta_{K-1} x_{2,K-1} + e_2, \\ &\vdots \\ y_N &= \beta_0 + \beta_1 x_{N,1} + \beta_2 x_{N,2} + \dots + \beta_{K-1} x_{N,K-1} + e_N \end{aligned} \quad (6-77)$$

pri čemu nizovi $x_1 = (x_{k,1})_{k=1,\dots,N}$, $x_2 = (x_{k,2})_{k=1,\dots,N}$, ..., $x_{K-1} = (x_{k,K-1})_{k=1,\dots,N}$ predstavljaju $K-1$ nezavisnu varijablu, niz $(y_k)_{k=1,\dots,N}$ zavisnu varijablu, niz $(e_k)_{k=1,\dots,N}$ smetnju, a $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{K-1}$ parametre koji se žele estimirati.

Radi jednostavnosti u nastavku će se koristiti matrični zapis jednadžbe:

$$y = (X\beta) + e \quad (6-78)$$

pri čemu je:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{N,1} & x_{N,2} & \dots & x_{N,K-1} \end{bmatrix} \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_K \end{bmatrix} e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_N \end{bmatrix} \quad (6-79)$$

Za postupak estimacije parametara linearnog regresijskog modela K -varijabli treba pretpostaviti:

- $y = X\beta + e$ prikazuje stvarnu ovisnost između vektora zavisne varijable y i regresijske matrice X za skup od N uzoraka. Vektor parametara stvarnih vrijednosti β jednak je za sve uzorke.
- e vektor nezavisne slučajne varijable s pripadajućom funkcijom gustoće vjerojatnosti.

- Matrica X strogo je deterministička.
- Rang matrice X jednak je K , matematički zapisano $\text{rang}(X) = K$.
- Osim podataka sadržanih u vektoru y i matrici X ne postoje druge informacije ili uvjeti za određivanje vektora parametara β .

Postupak estimacije započinje definiranjem jednadžbe koja određuje estimaciju vektora zavisne varijable:

$$\hat{y} = X\hat{\beta} \quad (6-80)$$

Razlika jednadžbi (6-78) i (6-80) odgovara vektoru odstupanja i jednaka je estimiranoj vrijednosti vektora smetnje:

$$\hat{e} = y - \hat{y} \quad (6-81)$$

Cilj metode najmanjih kvadrata je odrediti vektor parametara $\hat{\beta}$ za koje će vrijediti:

$$\hat{\beta} = \underset{\beta}{\text{argmin}} \sum_{k=1}^N \hat{e}_k^2 = (y - X\hat{\beta})^T (y - X\hat{\beta}) \quad (6-82)$$

Desni dio jednadžbe (6-82) odgovara zbroju kvadrata odstupanja i funkcija je vektor parametara. Preuređivanjem desnog dijela jednadžbe (6-82) slijedi:

$$f(\hat{\beta}) = (y - X\hat{\beta})^T (y - X\hat{\beta}) = y^T y - y^T X\hat{\beta} - \hat{\beta}^T X^T y + \hat{\beta}^T X^T X\hat{\beta} \quad (6-83)$$

Kako su svi pribrojnici jednadžbe (6-83) dimenzije (1×1) vrijedi izraz:

$$(\hat{\beta}^T X^T y) = y^T X\hat{\beta} \quad (6-84)$$

Uvrštavanjem izraza (6-84) u jednadžbu (6-83) slijedi:

$$f(\hat{\beta}) = \hat{\beta}^T X^T X\hat{\beta} - 2y^T X\hat{\beta} + y^T y \quad (6-85)$$

Jednadžbu (6-85) može se zapisati u obliku:

$$f(\hat{\beta}) = \hat{\beta}^T A\hat{\beta} + a^T \hat{\beta} + \alpha \quad (6-86)$$

pri čemu je $A = X^T X$, $a^T = -2y^T X$ i $\alpha = y^T y$. Ako se uzme u obzir da je funkcija $f(\hat{\beta})$ konveksna i derivabilna, slijedi da je njena stacionarna točka ujedno i točka globalnog minimuma. Stacionarna točka funkcije $f(\hat{\beta})$ određuje se iz jednadžbe:

$$\frac{df(\hat{\beta})}{d\hat{\beta}} = \vec{0} \quad (6-87)$$

Iz jednadžbe (6-87) slijedi:

$$\frac{df(\hat{\beta})}{d\hat{\beta}} = 2X^T X\hat{\beta} - (2y^T X)^T \quad (6-88)$$

$$X^T X\hat{\beta} = X^T y \quad (6-89)$$

Kako je $X^T X$ matrica regularna, jednadžba (6-89) se može preurediti na način:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (6-90)$$

Vektor parametara $\hat{\beta}$ određen jednadžbom (6-90) točka je globalnog minimuma funkcije zbroja kvadrata odstupanja i kao takav predstavlja rješenje metode najmanjih kvadrata.

7. REZULTATI MJERENJA

Ovo poglavlje bit će posvećeno analizi i prikazu rezultata mjerenja neelektričnih veličina tokom ispitne procedure testiranja asinkronog motora za pokuse zagrijavanja, snimanja momentne karakteristike i stres testa. Svi rezultati su obrađeni unutar Matlab programskog paketa pomoću matematičkih funkcija opisanih u prethodnom poglavlju.

7.1. Obrada rezultata za pokus zagrijavanja

Kako bi se bolje dao uvid u ponašanje temperature tokom provođenja pokusa zagrijavanja, potrebno je dati aproksimativnu funkciju zagrijavanja, odnosno hlađenja stroja koja je definirana izrazom 7-91.

$$f(x) = \pm a \pm b e^{\pm \frac{x}{c}} \quad (7-91)$$

gdje su varijable definirane kao:

a - definira odsječak na y osi

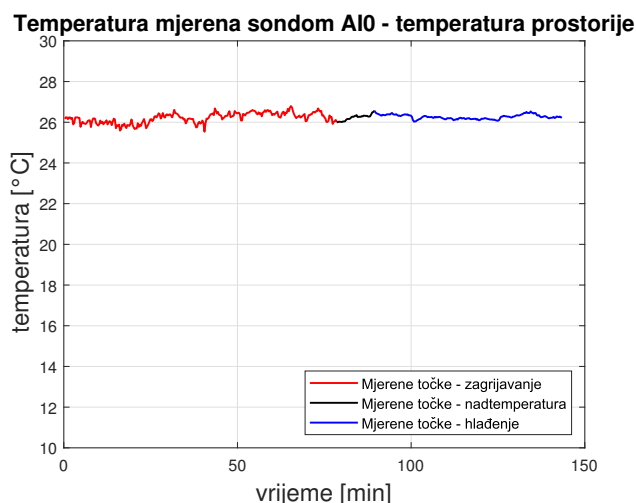
b - određuje amplitudu grafa

c - definira strminu krivulje

Iz izraza 7-91 vremenska konstanta se definira prema izrazu 7-92 i određuje vrijeme potrebno za postizanje 63,2% vrijednosti između početne i krajnje temperature.

$$\tau = c \quad (7-92)$$

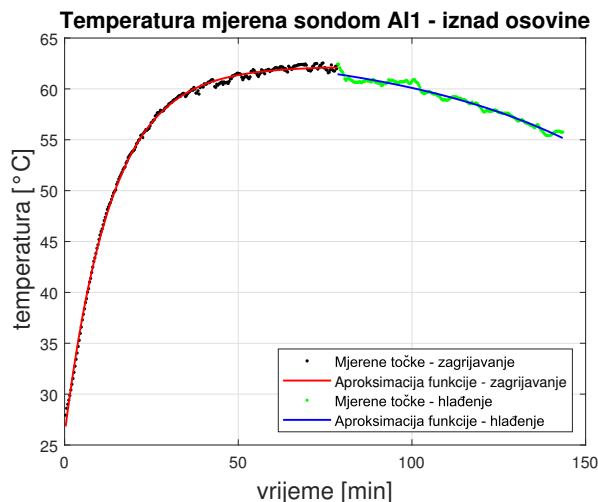
Prvi uvjet pri ispravnom provođenju ispitne procedure jest taj da se osigura približno konstantna temperatura okoline u kojoj se izvode pokusi, slika 7.35 prikazuje temperaturu okoline tokom izvođenja pokusa.



SL. 7.35: Temperatura prostorije tokom pokusa zagrijavanja

Funkcija aproksimirane temperature pomoću mjerenih točki za sondu smještenu iznad osovine asinkronog stroja je prikazana na slici 7.36. Koeficijenti iz izraza za rast temperature (7-91) su navedeni u tablici ispod. Iz grafa se vidi kako temperatura postiže maksimalnu

vrijednost stacionarnog stanja u vrijednosti od $62,4^{\circ}\text{C}$. Mjerna sonda na području iznad osovine ne zabilježava funkciju nadvišenja temperature iz razloga što u trenutku gašenja stroja ne dolazi do prijelaza topline iz namota stroja do djela na kućištu gdje je sonda pozicionirana. Isto tako, još jedan od razloga zašto ne dolazi do temperaturnog nadvišenja je taj što se mjerna sonda ne nalazi u direktnom području protoka ventiliranog zraka koji dolazi od izvora sa stražnje strane motora.

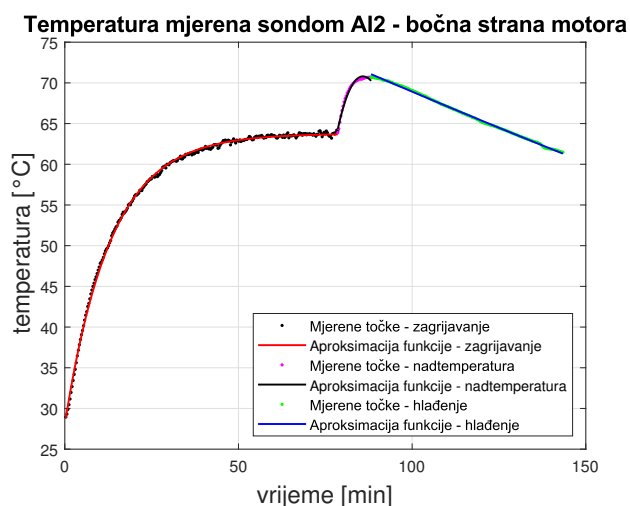


SL. 7.36: *Temperatura iznad osovine tokom pokusa zagrijavanja*

zagrijavanje	temperaturno nadvišenje	hlađenje
a=62,21	a=0	a=4644
b=36,18	b=0	b=4694
c=13,33	c=0	c=3,21

Prema izrazu (7-92) se definira vremenska konstanta za funkcije zagrijavanja koja iznosi 13,33 min, a za područje hlađenja 3,21 min.

Pri mjerenju temperature pomoću mjerne sonde koja se nalazi na bočnoj strani motora dolazi se do maksimalne temperature stacionarnog stanja unutar pokusa zagrijavanja od $64,4^{\circ}\text{C}$. Nakon gašenja dolazi do temperaturnog nadvišenja do maksimalnog iznosa od $70,8^{\circ}\text{C}$. Do temperaturnog nadvišenja od $6,4^{\circ}\text{C}$ dolazi iz razloga što se mjerena sonda nalazi na bočnoj strani motora u izravnom smjeru strujanja zraka proizvedenog od strane ventilatora, te prestankom hlađenja dolazi do bržeg zagrijavanja bočne strane motora zbog promjene konvekcijskog prijenosa topline prema okolini zbog prestanka strujanja zraka uslijed djelovanja ventilacije.

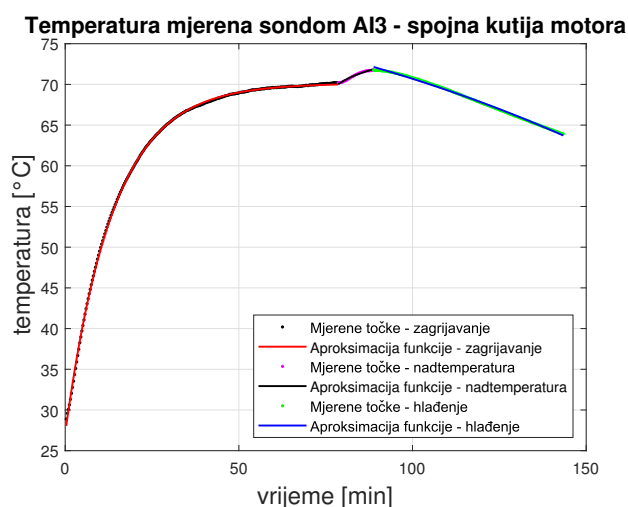


SL. 7.37: Temperatura bočne strane tokom pokusa zagrijavanja

zagrijavanje	temperaturno nadvišenje	hlađenje
a=63,76	a=-694,5	a=-6789
b=-35,72	b=801,2	b=-6836
c=13,07	c=3,995	c=3,16

Prema izrazu (7-92) se definiira vremenska konstanta za funkcije zagrijavanja koja iznosi 13.07 min, za područje nadvišenja 3.9 min, a za područje hlađenja 3.16 min.

Rezultati dobiveni mjernom sondom koja se nalazi unutar priključne kutije ispitivanog asinkronog stroja su prikazani na slici 7.38. Maksimalna temperatura stacionarnog stanja iznosi 70,2°C, a tokom nadvišenja dolazi do iznosa od 71,8°C. Uzrok nadvišenja pri mjerenju temperature unutar priključne kutije je disipacija topline koja dolazi iz namota prema vanjskom sloju kućišta stroja. Namoti su tokom rada stroja također pod utjecajem hlađenja od strane ventilatora, te u trenutku kada dolazi do mirovanja osovine, odnosno ventilatora, toplina se sporije predaje okolini i dolazi do porasta temperature kućišta unutar priključne kutije.

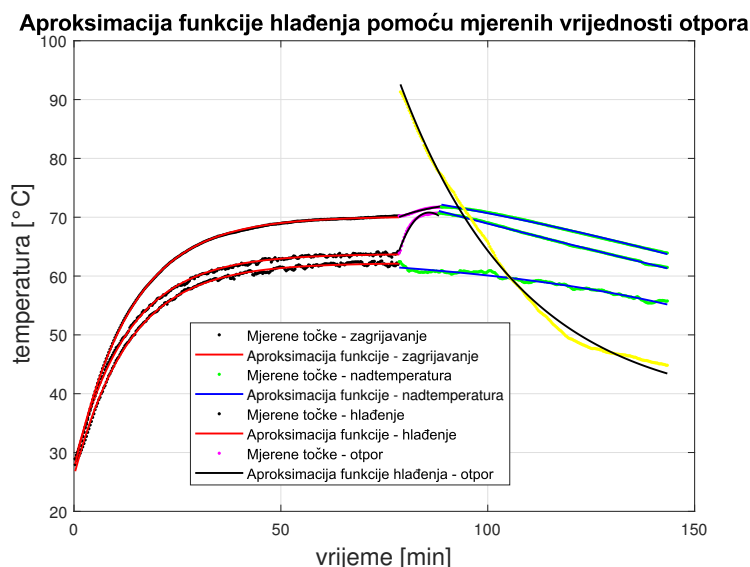


SL. 7.38: Temperatura unutar priključne kutije tokom pokusa zagrijavanja

zagrijavanje	temperaturno nadvišenje	hlađenje
a=70,11	a=-434,6	a=-1059
b=-43,01	b=518,1	b=1110
c=13,64	c=2,1	c=1,715

Prema izrazu (7-92) se definira vremenska konstanta za funkcije zagrijavanja koja iznosi 13,64 min, za područje nadvišenja 2,1 min, a za područje hlađenja 1,72 min.

Mjerenje otpora tokom ispitne procedure izvođenja pokusa zagrijavanja se izvodi u hladnom stanju i svake 2 sekunde nakon postizanja temperaturnog stacionarnog stanja koje uvjetuje kraj zagrijavanja. Prvo mjerenje otpora namota prije početka izvođenja ispitne procedure pri temperaturi od 26.16°C daje vrijednost otpora namota u iznosu od 18.98 Ω, što u izrazu (4-66) označava varijablu $R_{\theta a}$. Za temperaturni koeficijent bakra (α_{Cu}) se uzima vrijednost $4,3 \cdot 10^{-3}[K]$. Proračunom izraza (4-66) unutar Matlab programskog sučelja se dolazi grafa prikazanog na slici 7.39.



SL. 7.39: *Aproksimacija funkcije hlađenja pomoću mjerenih vrijednosti otpora*

Cilj aproksimacije temperature pomoću mjerenog otpora je taj što se očitavaju vrijednosti temperature statorskog namota koji je konstruiran od bakra, te se pomoću maksimalnih vrijednosti temperature može odrediti vjerodostojnost izolacijske klase unutar koje se nalazi ispitivani stroj. Sa grafa 7.39 se vidi kako maksimalna aproksimirana temperatura ima iznos od 92,58°C što zadovoljava izolacijsku klasu kojom je konstruiran ispitivani stroj. Također, kao i prethodne aproksimirane funkcije, i funkcija otpora se aproksimira pomoću eksponencijalne funkcije, te se jasno vidi kako u trenutku gašenja stroja ne dolazi do temperaturnog nadvišenja iz razloga što više nema gibanja struje kroz vodiče statora, koje rezultira porastom temperature.

Procjena otpora rotora pri čijoj se konstrukciji koristi materijal aluminij se vrši prema izrazu (7-93).

$$R_r = R_{r0}[1 + \alpha_{Al}(T - T_0)] \quad (7-93)$$

gdje je:

R_r - otpor rotora

R_0 - otpor rotora pri sobnoj temperaturi

T - mjerena temperatura

T_0 - sobna temperatura

α_{Al} - temperaturni koeficijent aluminijske

Temperaturna sonda korištena pri proračunu otpora je pozicionirana na bočnoj strani motora te se pomoću nje mjere vrijednosti temperature u jednadžbi (7-93) definirane varijablom T . Prema literaturi [34] iz izraza (7-93) se dobije vrijednost otpora rotora prije početka pokusa zagrijavanja:

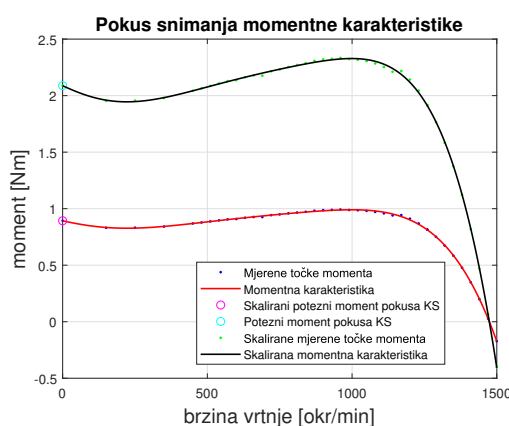
$$R_{r1} = 18,94[1 + 0,0042(28,25 - 26,25)] = 19,94\Omega \quad (7-94)$$

Nakon postizanja stacionarnog stanja zagrijavanja maksimalna vrijednost temperature iznosi $64,4^\circ C$ što rezultira iznosom otpora od:

$$R_{r2} = 18,94[1 + 0,0042(64,4 - 26,25)] = 20,09\Omega \quad (7-95)$$

7.2. Obrada rezultata za pokus snimanja momentne karakteristike

Momentna karakteristika prikazuje ovisnost brzine i momenta ispitivanog stroja u rasponu brzine od nule do sinkrone brzine. Karakteristika je opisana krivuljom s koje se očitavaju vrijednosti poteznog, prekretnog i nazivnog momenta. Rezultati dobiveni ispitnom procedurom izvođenja pokusa snimanja momentne karakteristike su prikazani na slici 7.40. Skaliranje vrijednosti mjenjenog momenta se izvodi pomoću izraza (4-67). Točke poteznog momenta označenog na grafu su preuzete iz pokusa kratkog spoja, te njihova oscilacija od mjenjenih vrijednosti dobivenih snimanjem momentne karakteristike može biti uzrokovana neparnom vrijednosti harmonika ulaznih veličina asinkronog stroja. Također, iznos poteznog momenta uvelike može biti uvjetovan položajem rotora u odnosu na stator.



SL. 7.40: Rezultati snimanja momentne karakteristike

Aproksimacijom funkcije kroz mjerene vrijednosti momenta se dobije crvena krivulja koja definira motorni dio momentne karakteristike asinkronog stroja. Kako je prethodno spomenuto u poglavlju 4.0.2, pokus snimanja momentne karakteristike se izvodi pri sniženom naponu, te je mjerene vrijednosti momenta potrebno skalirati pomoću izraza (4-67)

Skaliranjem mjerenih vrijednosti i aproksimacijom funkcije kroz skalirane vrijednosti momenta se dobije crna krivulja koja predstavlja motorni dio momentne karakteristike pri nazivnom naponu. Implementacijom izraza (2-61) unutar Matlab programskog sučelja dobije se iznos poteznog momenta 2,2 Nm za klizanje $s = 1$. Do prekretnog momenta dolazi pri brzini vrtnje od 1000 okr/min, a iznos prekretnog momenta je 2,33 Nm. Pri nazivnoj brzini vrtnje koja iznosi 1370 okr/min moment ispitivanog stroja ima vrijednost 1,22 Nm.

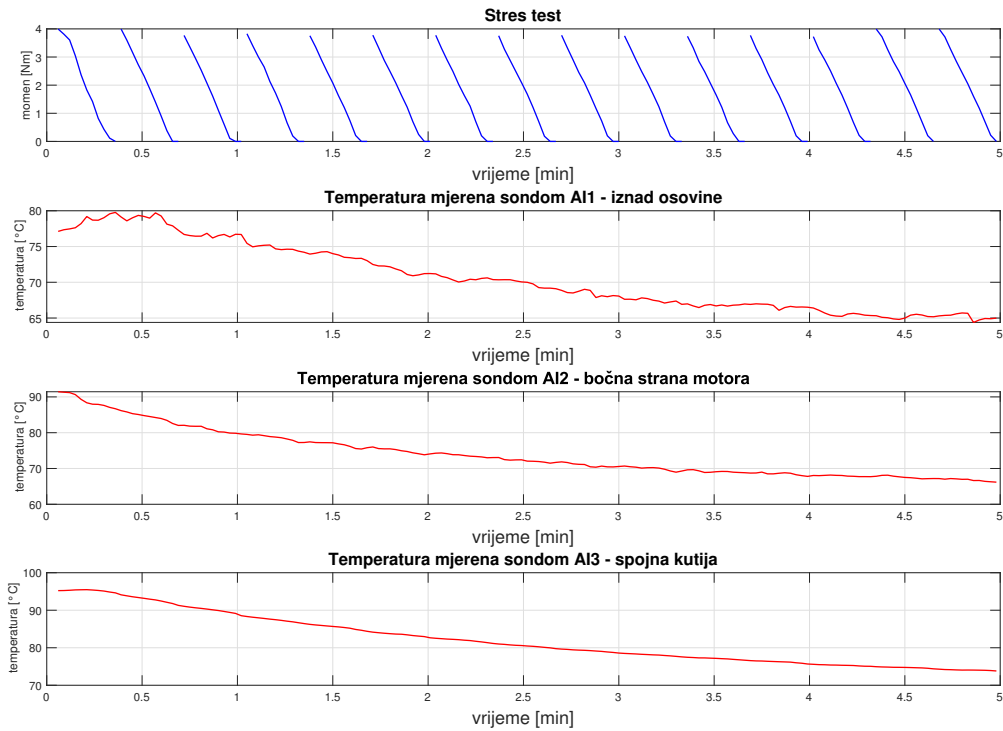
7.3. Obrada rezultata za stres test

Izvođenjem procedure stres testa opisane u poglavlju 4.0.3, dobiju se rezultati prikazani na slici 7.41. Procedura opterećenja asinkronog stroja se provodi petnaest puta tokom ispitne procedure, te se tokom provođenja snimaju vrijednosti momenta i temperature. Očitavanjem temperaturne klase motora s nazivne pločice se definira maksimalna temperatura do koje će se stroj zagrijati. U svrhu provođenja ispitne procedure za pokus stres testa unutar ovog diplomskog rada, definira se temperaturni izolacijski sustav motora razine F čija je maksimalna dopuštena temperatura 155°C. Zbog nedostatka sonde u namotima motora, čije mjerenje definira maksimalnu temperaturu navedenu izolacijskom klasom F, temperatura do koje se zagrijava asinkroni stroj dostiže maksimalnu vrijednost od 96°C. Stvarna temperatura namota je veća od mjerene temperature za 6,4°C, ali možemo s dovoljnom točnošću uzeti ovu aproksimaciju. To se vidi iz formule u nastavku.

Mjerenjem vrijednosti otpora namota asinkronog stroja pri sobnoj temperaturi i u trenutku maksimalne temperature prije početka provođenja ispitne procedure za pokus stres testa se može izračunati temperatura namota. Uzme li se u obzir kako su namoti izvedeni od bakra i uz poznavanje prethodno spomenutih otpora, uvrštavanjem u izraz (4-66) slijedi:

$$\vartheta = \frac{1}{0,0042} \left(\frac{25,95}{18,01} - 1 \right) = 104,97^{\circ}C \quad (7-96)$$

Vrijednost momenta unutar petnaest opteretnih krivulja se rasprostire u iznosu od $1,5M_n$ odnosno 3,9 Nm do nule. Promjenjivim opterećenjem se promatra ponašanje temperature stroja na pojedinim mjernim mjestima.



SL. 7.41: *Rezultati pokusa stres testa*

Ukupno trajanje pokusa je pet minuta i tokom cijelog intervala izvođenja pokusa se vidi padajući trend temperature.

Tako se s grafa vidi da je maksimalna temperatura iznad osovine mjerena temperaturnom sondom AI1 $79,7^{\circ}\text{C}$, a do kraja ispitne procedure temperatura pada na vrijednost od $64,99^{\circ}\text{C}$ što je pad od $14,71^{\circ}\text{C}$, odnosno $19,9\%$.

Temperatura mjerena sondom AI 2 koja se nalazi na bočnoj strani motora ima maksimalnu vrijednost od 96°C , a tokom ispitne procedure padne na vrijednost od $65,8^{\circ}\text{C}$, što je pad od $30,2^{\circ}\text{C}$, odnosno $32,3\%$.

Unutar priključne kutije motora se nalazi sonda AI3 koja mjeri maksimalnu temperaturu $95,39^{\circ}\text{C}$, do kraja izvođenja pokusa temperatura pada na vrijednost od $73,81^{\circ}\text{C}$, što predstavlja pad od $21,55^{\circ}\text{C}$, odnosno $22,5\%$.

Sobna temperatura je tokom izvođenja cijele ispitne procedure konstantna sa srednjom vrijednosti u iznosu od $25,3^{\circ}\text{C}$.

8. ZAKLJUČAK

Sustav za ispitivanje asinkronih strojeva u laboratorijskim uvjetima, opisan unutar ovog diplomskog rada, omogućuje automatiziranje jednog dijela ispitivanja asinkronih strojeva koja se poduzimaju u ispitnim stanicama i laboratorijima. Automatizirano je izvođenje i mjerenje veličina unutar pokusa praznog hoda, pokusa kratkog spoja, pokusa opterećenja, snimanje momentne karakteristike, pokusa zagrijavanja i stres testa. Naglasak unutar ovog diplomskog rada se stavlja na mjerenje neelektričnih veličina unutar standardnih ispitnih procedura asinkronog stroja. Za potrebe rada se razvija automatizirani sustav za provođenje ispitivanja i obradu rezultata, te crtanje dijagrama koji su karakteristični za svaki od pokusa. Automatiziranim provođenjem pokusa i prikupljanjem neelektričnih mjerenih veličina se postiže znatna ušteda vremena potrebnog za provođenje ispitne procedure i izradu izvještaja, pri obradi podataka unutar Matlab programskog paketa postiže se uniformiranost koja umanjuje mogućnosti za pojavu grešaka unutar same analize.

Mjerna oprema korištena za mjerenje neelektričnih veličina temperature, otpora, brzine vrtnje i momenta ispitivanog stroja je potpuno automatizirana i povezana unutar LabVIEW mjeriteljskog sučelja. Za mjerenje temperature se koristi NI Compact RIO kojeg karakterizira modularnost i brzi odziv na promjenu mjerenih vrijednosti. Za potrebe mjerenja brzine vrtnje i momenta ispitivanog stroja uspostavlja se komunikacija s PLC uređajem putem OPC servera koja čini ključ u automatizaciji sustava i njegovom razdvajanju na upravljački i mjeriteljski dio. Mjeriteljsko sučelje odlikuju prednosti poput jednostavnog grafičkog sučelja pomoću kojega se prate vrijednosti ispitivanog stroja i podešavaju parametri za spremanje mjerenih podataka.

Ispitne procedure se izvode prema IEEE 112 standardnom postupku za ispitivanje višefaznih asinkronih motora i generatora, a temperaturna klasa se definira prema IEC 6034-1 normi koja definira F područje ispitivanog asinkronog stroja. Kako bi mjereni podatci prikupljeni tokom ispitne procedure dali željene prikaze rezultata, oni zahtijevaju matematičku obradu podataka. Program za obradu i grafički prikaz podataka je samostalan program i može se upotrijebiti i izvan sustava ispitivanja asinkronih strojeva. Obrada započinje učitavanjem *.lvm* datoteke te se korištenjem linearne regresije i aproksimiranjem funkcije, definiraju koeficijenti funkcije koja najbolje odgovara mjerenim podacima. U poglavlju sedam daje se detaljan opis rezultata dobivenih mjerenjem vrijednosti neelektričnih veličina i njima karakterističnih pojava tokom rada asinkronog stroja.

Sustav se može dalje unaprjeđivati sa mogućnostima poput automatizirane regulacije napajanja asinkronog stroja, dodavanje više mjernih sonda na ispitivani stroj za svrhe mjerenja temperature i kreiranje samostalnog programa unutar Windows sučelja koji će objediniti sve opisane dijelove ispitne stanice.

LITERATURA

- [1] Kunal B. Chavhan, R.T. Ugale , (2016) Automated Test Bench for an Induction Motor using LabVIEW , Electrical Engineering Department, College of Engineering Pune, India
- [2] E. R. Summers, (1939) Determination of Temperature Rise of Induction Motors, IEEE Industry Applications Magazine
- [3] Firoz Ahmed, Narayan C. Kar, (2017) Analysis of End-Winding Thermal Effects in a Totally Enclosed Fan-Cooled Induction Motor With a Die Cast Copper Rotor, IEEE Transactions on industry applications
- [4] Wei Zhao, Aidong Xu, (2010) Resistance-Temperature Convention Calculation in EPA Temperature Transducer, Shenyang Institute of Automation, the Chinese Academy of Sciences Shenyang, China
- [5] Robbie McElveen, Mike Melfi, James McFarland, (2019) Improved Characterization of Polyphase Induction Motor Losses, IEEE Industry Applications Magazine
- [6] Anushree Rajendrarao Helonde, Mr. Mahesh Mankar, (2019) Identifying Three Phase Induction Motor Equivalent Circuit Parameters from Nameplate Data by Different Analytical Methods, Ramdeobaba College of Engineering and Management, Nagpur, Maharashtra, India
- [7] Vusić Mario, (2017) Utjecaj napona mreže na karakteristiku momenta kaveznog asinkronog motora, Sveučilište Sjever, Varaždin
- [8] B. Kuzmanović, (2005) Osnove elektrotehnike 1, Element, Zagreb
- [9] Matea Čović, (2019) Modeliranje i simuliranje trofaznog kaveznog asinkronog motora, Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet u Splitu
- [10] Aldo Boglietti, Andrea Cavagnino, Mario Lazzari, Michele Pastorelli, (2004) International Standards for the Induction Motor Efficiency Evaluation: A Critical Analysis of the Stray-Load Loss Determination, IEEE Industry Applications Magazine
- [11] Different ways to improve starting torque of A. C. induction motors, dostupna na: <https://www.aarohies.com/different-ways-to-improve-starting-torque-of-ac-induction-motors/>, Pristup: 14.srpanj.2020
- [12] Božidar Skalicki, Josip Grilec, (2005) Električni strojevi i pogoni, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [13] Brošura *Specification of Electric Motors.* dostupna na: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/ha0/h5f/WEG-motors-specification-of-electric-motors-50039409-brochure-english-web.pdf>
- [14] Članak *Winding resistance testing of motors*, dostupna na: <https://www.ee.co.za/article/winding-resistance-testing-of-motors.html>
- [15] Igor Kuzle, Hrvoje Pandžić, (2012) Održavanje elektroenergetskog sustava, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb

- [16] Ivan Gašparac, Mirko Cettolo, (2011) Električni strojevi-upute za laboratorijske vježbe, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb
- [17] Martin Jadrić, Božidar Frančić, (1995) Dinamika električnih strojeva, Graphis Zagreb.
- [18] Equivalent Circuit of an Induction Motor dostupno na: <https://circuitglobe.com/equivalent-circuit-of-an-induction-motor.html>, Pristup: 8.kolovoz.2021
- [19] Tomislav Čorak, (2001) Sustav automatiziranog ispitivanja asinkronog stroja u tvornici, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb.
- [20] Zdravko Valter, (2008) Procesna mjerenja, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek.
- [21] IEEE Power Engineering Society, (2004) IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, 3 Park Avenue, New York, USA.
- [22] IEC International Standard, (2010) International Standard, Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance
- [23] Benefits of Delta-Sigma Analog-to-Digital Conversion dostupno na: <https://www.ni.com/en-rs/innovations/white-papers/10/benefits-of-delta-sigma-analog-to-digital-conversion.html>, Pristup: 8.srpanj.2021
- [24] NI 9211 Datasheet dostupno na: https://www.ni.com/pdf/manuals/373466a_02.pdf, Pristup: 8.srpanj.2021
- [25] OPC Interoperability: Open Connectivity Through Open Standards dostupno na: <https://www.kepware.com/en-us/products/kepserverex/opc-interoperability/>, Pristup: 26.kolovoz.2021
- [26] Introduction to OPC dostupno na: <https://www.ni.com/en-rs/innovations/white-papers/08/introduction-to-opc.html>, Pristup: 26.kolovoz.2021
- [27] Tin Kvesić, (2018), Mjerenje neelektričnih veličina, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek
- [28] Data sheet for Simotics S1FK7 dostupno na: <https://mall.industry.siemens.com> Pristup: 25.kolovoz.2021
- [29] Robert Jaroš, (2017), Specijalne vrste regulacijskih strojeva za posebne namjene, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek
- [30] Resolver figure dostupno na: https://www.researchgate.net/figure/Resolver-operated-in-mode-2-and-associated-classical-converter-The-time-dependent_fig4_261154821 Pristup: 16.rujan.2021.
- [31] Predavanje, Održavanje brodskih elektroničkih sustava, dostupno na: <http://www.hdodig.com/lectures/mechatronics/pred4.pdf>, Pristup: 25.kolovoz.2021
- [32] SINAMICS S120 Drive functions dostupno na: <http://www.pogoni.etf.bg.ac.rs/VezbeRP/Sinamics%20S120-manual.pdf>, Pristup: 5.rujan.2021
- [33] Velibor Ravlić, (2004), Automatika za elektrotehničke škole, Zagreb

- [34] Ivan Mandić, Veseljko Tomljenović, Milica Pužar, (2012) Sinkroni i asinkroni električni strojevi, Priručnici tehničkog veleučilišta u Zagrebu
- [35] Keithley 2000 6 1/2 Digit Multimeter dostupno na: <https://www.amazon.co.uk/KEITHLEY-2000-Keithley-Digit-Multimeter/dp/B00HLCXQ10>, Pristup: 12.srpanj.2020
- [36] Douglas C. Montgomery, George C. Runger, (2014) Applied Statistics and Probability for Engineers, Arizona State University

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu opisan je princip rada sustava za mjerenje neelektričnih veličina unutar ispitne stanice za provođenje ispitnih procedura na asinkronim strojevima. Definiraju se pojedini elementi koji čine sustav za mjerenje, kao i njihov način povezivanja s LabVIEW programskim paketom. Naposljetku su prikazani rezultati dobiveni pokusom zagrijavanja, snimanja momentne karakteristike i strest testa, te su objašnjene i uspoređene vrijednosti mjerenih neelektričnih veličina.

Ključne riječi: ispitna stanica, neelektrične veličine, asinkroni stroj, LabVIEW, Compact RIO, Matlab

ABSTRACT

This thesis describes the principle of operation of the system for measuring non-electrical values within the standard test procedure for conducting tests on induction machines. The individual elements that make up the measurement system are defined, as well as their way of connecting to the LabVIEW software package. Finally, the results obtained by the temperature test, recording the torque-speed characteristic and the stress test are presented, and the values of the measured non - electric quantities are explained and compared.

Keywords: testing station, non-electrical values, induction machine, LabVIEW, Compact RIO, Matlab

ŽIVOTOPIS

Branimir Lovrić rođen je 31. svibnja 1997. godine u Osijeku. Osnovnu školu završio je u Đakovu 2012. godine. Iste je godine upisao prirodoslovno-matematičku gimnaziju A. G. Matoš u Đakovu. Nakon mature 2016. godine upisuje Elektrotehnički fakultet u Osijeku na Sveučilištu Josipa Jurja Strossmayera. Odabire sveučilišni preddiplomski studij elektrotehnike, koji završava 2018. godine i upisuje sveučilišni diplomski studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika, izborni blok industrijska elektroenergetika DEC na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku.

PRILOG 1 - MATLAB SKRIPTE

Primjer koda 1: *MATLAB skripta za pokretanje glavnog izbornika.*

```
1 run('testzagrijavanja')
2 n=10;
3 while n>0
4 choice = menu('Odaberite rezultate kojeg pokusa zelite prikazati','Pokus zagrijavanja','Pokus snimanja momentne
   ↪ karakteristike','Stres test','Zatvori');
5 n=choice;
6     switch choice
7         case 1
8             c=1;
9             MAINMENU_2
10        case 2
11            c=2;
12            snimanje_momentne_karakteristike
13        case 3
14            c=3;
15            test_10
16        case 4
17            close all;
18            n=0;
19            c=0;
20     end
21 end
```

Primjer koda 2: *MATLAB skripta za učitavanje podataka pokusa snimanja momentne karakteristike.*

```
1 clear all;
2
3 %load test_8 SNIMANJE MOMENTNE KARAKTERISTIKE data
4 test_8_1 = load ('test_8.lvm');
5
6 %duzina polja podataka
7 [i,j] = size(test_8_1);
8
9 %kako bi se maknilo zadnje mjerenje otpora na kraju pokusa
10 i=i-1;
11
12 %velicina polja podataka
13 i.column=[2:i]; %2 zbog prvog mjerenja koje je zbog otpora prije pokusa
14 i.size=transpose(i.column);
15
16 %odvajanje momenta i brzine vrtnje
17 test_8_speed=test_8_1(2:i,7:7);
18 test_8_torque=test_8_1(2:i,8:8);
19
20 %ucitavanje pokusa KRATKOG SPOJA zbog prikaza tocke poteznog momenta
```

```

21 test_7 = load ('test_7.lvm');
22 [i,j] = size(test_7);
23 i_last=i-1;
24 test_7_torque=test_7(2:i_last,8:8);
25 test_7_torque_mk=test_7_torque(1:1,1:1);
26 test_7_torque_last=test_7_torque(14:14,1:1);
27
28 %odvajanje tocke brzine – prve i zadnje
29 test_8_speed_mk=test_8_speed(1:1,1:1);
30 test_8_speed_last=test_8_speed(41:41,1:1);
31
32 %SKALIRANJE napona
33 test_8_voltage=test_8_1(2:i,1:1);
34 test_8_torque_scaled_1=(test_8_torque*(230/150)^2);
35
36 %SKALIRANJE TOCAKA KS
37 test_7_torque_mk_scaled=(test_7_torque_mk*(150.416/230)^2);
38
39 %dodavanje varijable
40 test_8_torque(41) = test_7_torque_mk_scaled
41 test_8_speed(41)=0
42
43 test_8_torque_scaled_1(41)=test_7_torque_mk
44 test_8_speed(41)=0
45
46 save('test_8_workspace')

```

Primjer koda 3: *MATLAB skripta za aproksimaciju funkcije i grafički prikaz podataka pokusa snimanja momentne karakteristike.*

```

1 function [fitresult, gof] = createFits(test_8_speed, test_8_torque, test_8_torque_scaled_1)
2 %CREATEFITS(TEST_8_SPEED,TEST_8_TORQUE,TEST_8_TORQUE_SCALED_1)
3 % Create fits.
4 %
5 % Data for 'measured' fit:
6 % X Input : test_8_speed
7 % Y Output: test_8_torque
8 % Data for 'scaledd' fit:
9 % X Input : test_8_speed
10 % Y Output: test_8_torque_scaled_1
11 % Output:
12 % fitresult : a cell-array of fit objects representing the fits.
13 % gof : structure array with goodness-of fit info.
14 %
15 % See also FIT, CFIT, SFIT.
16
17 % Auto-generated by MATLAB on 10-Sep-2021 02:21:07
18
19 %% Initialization.
20 load('test_8_workspace','test_7_torque_mk_scaled','test_7_torque_mk');
21 % Initialize arrays to store fits and goodness-of-fit.

```



```

22 fitresult = cell( 2, 1 );
23 gof = struct( 'sse', cell( 2, 1 ), ...
24     'rsquare', [], 'dfe', [], 'adjrsquare', [], 'rmse', [] );
25
26 %% Fit: 'measured'.
27 [xData, yData] = prepareCurveData( test_8_speed, test_8_torque );
28
29 % Set up fitype and options.
30 ft = fitype( 'poly7' );
31
32 % Fit model to data.
33 [fitresult{1}, gof(1)] = fit( xData, yData, ft );
34
35 % Plot fit with data.
36 figure( 'Name', 'both' );
37 h = plot( fitresult{1}, xData, yData );
38 set(h, 'LineWidth', 1.2)
39 hold on;
40 plot(0, test_7_torque_mk_scaled, 'mo');
41 hold on;
42 plot(0, test_7_torque_mk, 'co');
43 grid on
44
45 %% Fit: 'scaledd'.
46 [xData, yData] = prepareCurveData( test_8_speed, test_8_torque_scaled_1 );
47
48 % Set up fitype and options.
49 ft = fitype( 'poly7' );
50
51 % Fit model to data.
52 [fitresult{2}, gof(2)] = fit( xData, yData, ft );
53
54 % Plot fit with data.
55
56 h = plot( fitresult{2}, 'k-', xData, yData, 'g.' );
57 set(h, 'LineWidth', 1.2)
58 legend( h, 'Mjerene tocke', 'Momentna karakteristika', 'Location', 'SouthEast' );
59 % Label axes
60 xlabel ( 'brzina vrtnje [okr/min]', 'FontSize', 15);
61 ylabel ( 'moment [Nm]', 'FontSize', 15);
62 title ( 'Pokus snimanja momentne karakteristike', 'FontSize', 14);
63 grid on
64 print -depsc test_8
65
66
67 end

```

Primjer koda 4: *MATLAB skripta za učitavanje podataka pokusa zagrijavanja.*

```

1 clear all;
2

```

```

3 %load test_5 ZAGRIJAVNJE data
4 test_5.1 = load ('test_5.1.lvm');
5 test_5.2 = load ('test_5.2.lvm');
6
7 %definiranje broja podataka po stupcima (j) i retcima (i)
8 [i_1,j_1] = size(test_5.1);
9 [i_2,j_2] = size(test_5.2);
10 %definiranje poka broja uzorka kada poje hlae, nakon zadnjeg
11 %uzorka i_1
12 i_2.total=i_1-1+i_2;
13
14 %kreiranje reda elemenata i za i_1 i i_2(od zavretka i_1)
15 i_column_test_5.1=[i_1];
16 i_column_test_5.2=[i_1:i_2.total];
17
18 i_row_test_5.1 = transpose(i_column_test_5.1)*0.3;
19 i_row_test_5.2 = transpose(i_column_test_5.2);
20
21 %odvajanje temperature za svaku sondu x je i_row_test_5.1 y je test_5.1.temperature_ai0
22 test_5.1.temperature_ai0=test_5.1(1:i_1,9:9);
23 test_5.2.temperature_ai0=test_5.2(1:i_2,1:1);
24
25 test_5.1.temperature_ai1=test_5.1(1:i_1,10:10);
26 test_5.2.temperature_ai1=test_5.2(1:i_2,2:2);
27
28 test_5.1.temperature_ai2=test_5.1(1:i_1,11:11);
29 test_5.2.temperature_ai2=test_5.2(1:i_2,3:3);
30
31 test_5.1.temperature_ai3=test_5.1(1:i_1,12:12);
32 test_5.2.temperature_ai3=test_5.2(1:i_2,4:4);
33
34
35 %spajanje vremena za curvefit temperature spojene – ukupno polje
36 %vremena
37 i_row_test_5=[i_row_test_5.1;i_row_test_5.2]
38
39 %spajanje temperature prostoriije za curvefit
40 test_5.temperature_ai0=[test_5.1.temperature_ai0;test_5.2.temperature_ai0]
41
42
43 %pronazak maksimalne stacionarne temperature zagrijavanja x i y koord
44 [max_value_stationary_ai0,index_ai0]=max(test_5.1.temperature_ai0)
45 [max_value_stationary_ai1,index_ai1]=max(test_5.1.temperature_ai1)
46 [max_value_stationary_ai2,index_ai2]=max(test_5.1.temperature_ai2)
47 [max_value_stationary_ai3,index_ai3]=max(test_5.1.temperature_ai3)
48
49 %pronazak maksimalne nadtemperature nakon gaenja y koord
50 [max_value_overtemperature_ai0,index_overtemperature_ai0]=max(test_5.2.temperature_ai0)
51 [max_value_overtemperature_ai1,index_overtemperature_ai1]=max(test_5.2.temperature_ai1)
52 [max_value_overtemperature_ai2,index_overtemperature_ai2]=max(test_5.2.temperature_ai2)
53 [max_value_overtemperature_ai3,index_overtemperature_ai3]=max(test_5.2.temperature_ai3)

```

```

54
55 % DRUGO POLOVLJENJE test_5.2 na dio NADTEMPERATURE x je i_overtemperature_ai0_array y je
    ↪ test_5.2_overtemperature_ai
56 test_5.2_overtemperature_ai0=test_5.2_temperature_ai0(1:index_overtemperature_ai0,1:1)
57 [i_overtemperature_ai0,j_overtemperature_ai0] = size(test_5.2_overtemperature_ai0);
58 ai0_final_lenght=i_1+i_overtemperature_ai0-1;
59 i_overtemperature_ai0_array_total=[i_1:ai0_final_lenght];
60 i_overtemperature_ai0_array = transpose(i_overtemperature_ai0_array_total)*0.3;
61
62
63 test_5.2_overtemperature_ai1=test_5.2_temperature_ai1(1:index_overtemperature_ai1,1:1)
64 [i_overtemperature_ai1,j_overtemperature_ai1] = size(test_5.2_overtemperature_ai1);
65 ai1_final_lenght=i_1+i_overtemperature_ai1-1;
66 i_overtemperature_ai1_array_total=[i_1:ai1_final_lenght];
67 i_overtemperature_ai1_array = transpose(i_overtemperature_ai1_array_total)*0.3;
68
69
70 test_5.2_overtemperature_ai2=test_5.2_temperature_ai2(1:index_overtemperature_ai2,1:1)
71 [i_overtemperature_ai2,j_overtemperature_ai2] = size(test_5.2_overtemperature_ai2);
72 ai2_final_lenght=i_1+i_overtemperature_ai2-1;
73 i_overtemperature_ai2_array_total=[i_1:ai2_final_lenght];
74 i_overtemperature_ai2_array = transpose(i_overtemperature_ai2_array_total)*0.3;
75
76
77 test_5.2_overtemperature_ai3=test_5.2_temperature_ai3(1:index_overtemperature_ai3,1:1)
78 [i_overtemperature_ai3,j_overtemperature_ai3] = size(test_5.2_overtemperature_ai3);
79 ai3_final_lenght=i_1+i_overtemperature_ai3-1;
80 i_overtemperature_ai3_array_total=[i_1:ai3_final_lenght];
81 i_overtemperature_ai3_array = transpose(i_overtemperature_ai3_array_total)*0.3;
82
83
84 %TRE POLOVLJENJE test_5.2 NA HLANJE x je i_cooling_ai0_array y je test_5.2_cooling_ai0
85
86 test_5.2_cooling_ai0=test_5.2_temperature_ai0(index_overtemperature_ai0:i_2,1:1)
87 [i_cooling_ai0,j_cooling_ai0] = size(test_5.2_cooling_ai0);
88 i_cooling_ai0_array=[ai0_final_lenght:i_2_total]*0.3
89 i_cooling_ai0_array = transpose(i_cooling_ai0_array);
90
91
92 test_5.2_cooling_ai1=test_5.2_temperature_ai1(index_overtemperature_ai1:i_2,1:1)
93 [i_cooling_ai1,j_cooling_ai1] = size(test_5.2_cooling_ai1);
94 i_cooling_ai1_array=[ai1_final_lenght:i_2_total]*0.3
95 i_cooling_ai1_array = transpose(i_cooling_ai1_array);
96
97
98 test_5.2_cooling_ai2=test_5.2_temperature_ai2(index_overtemperature_ai2:i_2,1:1)
99 [i_cooling_ai2,j_cooling_ai2] = size(test_5.2_cooling_ai2);;
100 i_cooling_ai2_array=[ai2_final_lenght:i_2_total]*0.3
101 i_cooling_ai2_array = transpose(i_cooling_ai2_array);
102
103 test_5.2_cooling_ai3=test_5.2_temperature_ai3(index_overtemperature_ai3:i_2,1:1)

```

```

104 [i_cooling_ai3,j_cooling_ai3] = size(test_5_2.cooling_ai3);
105 i_cooling_ai3_array=[ai3_final_lenght:i_2_total]*0.3
106 i_cooling_ai3_array = transpose(i_cooling_ai3_array);
107
108
109 % %odvajanje mjerenja otpora
110 test_5_1_resistance=test_5_1(1:1,13:13);
111 test_5_2_resistance=test_5_2(2:i_2,5:5);
112
113 test_5_2_temperature_ai0_R=test_5_2.temperature_ai0(2:i_2,1:1);
114 i_2_R=i_2-1
115 yY=[263:i_2_total]*0.3
116
117 temp_TEST=[test_5_2.temperature_ai0_R]+((1/0.0043)*((test_5_2_resistance)/(test_5_1_resistance))-1))
118
119 % r_temp=plot(yY,temp_TEST)
120 xX=transpose(yY)
121
122 %plot R-T
123 test_5_2.temperature_ai1_R=test_5_2.temperature_ai1(2:i_2,1:1);
124 test_5_2.temperature_ai2_R=test_5_2.temperature_ai2(2:i_2,1:1);
125 test_5_2.temperature_ai3_R=test_5_2.temperature_ai3(2:i_2,1:1);

```

Primjer koda 5: *MATLAB skripta za aproksimaciju funkcije i grafički prikaz podataka pokusa zagrijavanja.*

```

1 %HEATING PART OF FUNCTION AI3
2 x=i_row_test_5_1;
3 y=test_5_1.temperature_ai3;
4
5 n = 1;
6 iy = zeros(length(x), n);
7 xp = zeros(length(x), n+1);
8 iy(:,1) = cumtrapz(x, y);
9 xp(:,1) = x;
10 for ii=2:1:n
11 iy(:, ii) = cumtrapz(x, iy(:, ii-1));
12 xp(:, ii) = xp(:, ii-1) .* x;
13 end
14 xp(:, n+1) = ones(size(x));
15 Y = [iy, xp];
16 A = pinv(Y)*y;
17 Ahat = [A(1:n)'; [eye(n-1), zeros(n-1, 1)]];
18 lambdas = eig(Ahat);
19 lambdas
20 X = [ones(size(x)), exp(lambdas' .* x)];
21 P = pinv(X)*y;
22 P
23 y_est = X*P;
24 figure();
25 plot(x, y, 'k. '); hold on;

```

```

26 grid on;
27 plot(x, y_est, 'r-', 'LineWidth',1.2);
28 hold on;
29
30
31 %OVERHEATING PART OF FUNCTION AI3
32 x_1= i_overttemperature_ai3_array
33 y_1= test_5.2_overttemperature_ai3
34 n = 1;
35 iy = zeros(length(x_1), n);
36 xp = zeros(length(x_1), n+1);
37 iy(:,1) = cumtrapz(x_1, y_1);
38 xp(:,1) = x_1;
39 for ii=2:1:n
40 iy(:, ii) = cumtrapz(x_1, iy(:, ii-1));
41 xp(:, ii) = xp(:, ii-1) .* x_1;
42 end
43 xp(:, n+1) = ones(size(x_1));
44 Y = [iy, xp];
45 A = pinv(Y)*y_1;
46 Ahat = [A(1:n)'; [eye(n-1), zeros(n-1, 1)]];
47 lambdas_1 = eig(Ahat);
48 lambdas_1
49 X = [ones(size(x_1)), exp(lambdas_1'.*x_1)];
50 P_1 = pinv(X)*y_1;
51 P_1
52 y_est = X*P_1;
53 plot(x_1, y_1, 'm. '); hold on;
54 grid on;
55 plot(x_1, y_est, 'k-', 'LineWidth',1.2);
56 hold on;
57
58
59 %COOLING PART OF FUNCTION AI3
60 x_2= i_cooling_ai3_array
61 y_2= test_5.2_cooling_ai3
62 n = 1;
63 iy = zeros(length(x_2), n);
64 xp = zeros(length(x_2), n+1);
65 iy(:,1) = cumtrapz(x_2, y_2);
66 xp(:,1) = x_2;
67 for ii=2:1:n
68 iy(:, ii) = cumtrapz(x_2, iy(:, ii-1));
69 xp(:, ii) = xp(:, ii-1) .* x_2;
70 end
71 xp(:, n+1) = ones(size(x_2));
72 Y = [iy, xp];
73 A = pinv(Y)*y_2;
74 Ahat = [A(1:n)'; [eye(n-1), zeros(n-1, 1)]];
75 lambdas_2 = eig(Ahat);
76 lambdas_2

```

```

77 X = [ones(size(x_2)), exp(lambdas_2'.*x_2)];
78 P_2 = pinv(X)*y_2;
79 P_2
80 y_est = X*P_2;
81 plot(x_2, y_2, 'g. '); hold on;
82 grid on;
83 plot(x_2, y_est, 'b-', 'LineWidth',1.2);
84 hold on;
85 xlabel ('vrijeme [min]', 'FontSize', 15);
86 ylabel ('temperatura [C]', 'FontSize', 15);
87 title('Temperatura mjerena sondom AI3 – spojna kutija motora', 'FontSize', 14);
88 legend( 'Mjerene tocke – zagrijavanje', 'Aproksimacija funkcije – zagrijavanje', 'Mjerene tocke – nadtemperatura', '
      ↪ Aproksimacija funkcije – nadtemperatura', 'Mjerene tocke – hladenje', 'Aproksimacija funkcije – hladenje', '
      ↪ Location', 'SouthEast' );
89
90
91 print -depsc ttest_5_AI3

```

Primjer koda 6: *MATLAB skripta za analizu podataka i grafički prikaz pokusa stres testa.*

```

1 clear all;
2
3 %load test_10 STRES TEST data
4 test_10_1 = load ('test_10.lvm');
5
6 %duzina polja podataka
7 [i,j] = size(test_10_1);
8
9 i=i-1; %kako bi se maknilo zadnje mjerenje otpora na kraju pokusa
10
11 %velicina polja podataka
12 i_column=[2:i]; %2 zbog prvog mjerenja koje je zbog otpora prije pokusa
13 i_size=transpose(i_column);
14
15 %odvajanje momenta i temperature
16 test_10_torque=test_10_1(2:i,8:8);
17 %AI0
18 test_10_temperature_ai0=test_10_1(2:i,9:9);
19 %AI1
20 test_10_temperature_ai1=test_10_1(2:i,10:10);
21 %AI2
22 test_10_temperature_ai2=test_10_1(2:i,11:11);
23 %AI3
24 test_10_temperature_ai3=test_10_1(2:i,12:12);
25 %separacija momenta u 15 stupaca i popunjavanje zadnjeg reda nulama
26 torque=reshape(test_10_torque,[],15)
27 i_size_new=reshape(i_size,[],15)
28 i_size_new=[i_size_new]*0.03
29 torque(11, :) = zeros(1, 15)
30 [i_torque,j_torque] = size(torque);
31 i_torque_size=[1:i_torque]

```

```

32 i_torque_size_transp=transpose(i_torque_size);
33 %ploting
34 subplot(4,1,1);
35 plot(i_size_new(:,1),torque(:,1), 'b-', 'LineWidth',1.1);
36 hold on;
37 plot(i_size_new(:,2),torque(:,2), 'b-', 'LineWidth',1.1);
38 hold on;
39 plot(i_size_new(:,3),torque(:,3), 'b-', 'LineWidth',1.1);
40 hold on;
41 plot(i_size_new(:,4),torque(:,4), 'b-', 'LineWidth',1.1);
42 hold on;
43 plot(i_size_new(:,5),torque(:,5), 'b-', 'LineWidth',1.1);
44 hold on;
45 plot(i_size_new(:,6),torque(:,6), 'b-', 'LineWidth',1.1);
46 hold on;
47 plot(i_size_new(:,7),torque(:,7), 'b-', 'LineWidth',1.1);
48 hold on;
49 plot(i_size_new(:,8),torque(:,8), 'b-', 'LineWidth',1.1);
50 hold on;
51 plot(i_size_new(:,9),torque(:,9), 'b-', 'LineWidth',1.1);
52 hold on;
53 plot(i_size_new(:,10),torque(:,10), 'b-', 'LineWidth',1.1);
54 hold on;
55 plot(i_size_new(:,11),torque(:,11), 'b-', 'LineWidth',1.1);
56 hold on;
57 plot(i_size_new(:,12),torque(:,12), 'b-', 'LineWidth',1.1);
58 hold on;
59 plot(i_size_new(:,13),torque(:,13), 'b-', 'LineWidth',1.1);
60 hold on;
61 plot(i_size_new(:,14),torque(:,14), 'b-', 'LineWidth',1.1);
62 hold on;
63 plot(i_size_new(:,15),torque(:,15), 'b-', 'LineWidth',1.1);
64 xlabel ('vrijeme [min]', 'FontSize', 15);
65 ylabel ('momen [Nm]', 'FontSize', 10);
66 title('Stres test', 'FontSize', 14);
67 grid on
68
69 i_size=[i_size]*0.03
70 subplot(4,1,2);
71 plot(i_size,test_10_temperature_ai1, 'r-', 'LineWidth',1.1);
72 xlabel ('vrijeme [min]', 'FontSize', 15);
73 ylabel ('temperatura [C]', 'FontSize', 10);
74 title('Temperatura mjerena sandom AI1 – iznad osovine', 'FontSize', 14);
75 grid on
76
77 subplot(4,1,3);
78 plot(i_size,test_10_temperature_ai2, 'r-', 'LineWidth',1.1);
79 xlabel ('vrijeme [min]', 'FontSize', 15);
80 ylabel ('temperatura [C]', 'FontSize', 10);
81 title('Temperatura mjerena sandom AI2 – bo strana motora', 'FontSize', 14);
82 grid on

```



```
83 |
84 | subplot(4,1,4);
85 | plot(i_size,test_10.temperature_ai3,'r-','LineWidth',1.1);
86 | xlabel ('vrijeme [min]','FontSize', 15);
87 | ylabel ('temperatura [C]','FontSize', 10);
88 | title('Temperatura mjerena sondom AI3 – spojna kutija','FontSize', 14);
89 | grid on
90 |
91 | print -depsc test_10
92 | %plot temperature
93 |
94 | speed=test_10_1(2:i,7:7);
```