

Utjecaj napona mreže na karakteristiku momenta kaveznog asinkronog motora

Vusić, Mario

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:909541>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-01**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište
Sjever**

Završni rad br. 406/EL/2017

Utjecaj napona mreže na karakteristiku momenta kaveznog asinkronog motora

Mario Vusić, 0822/601

Varaždin, rujan 2017. godine

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za elektrotehniku		
PRISTUPNIK	Mario Vusić	MATIČNI BROJ	0822/601
DATUM		KOLEGIJ	Električni strojevi
NASLOV RADA	Utjecaj napona mreže na karakteristiku momenta kaveznog asinkronog motora		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	The influence of the network voltage on the torque characteristic of the cage asynchronous motor		
MENTOR	Dr. sc. Branko Tomičić	ZVANJE	viši predavač
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. Dunja Srpak 2. Dr. Sc. Ladislav Havaš 3. Dr. Sc. Branko Tomičić - mentor 4. Mr. Sc. Ivan Šumiga - zamjenik člana 5.		

Zadatak završnog rada

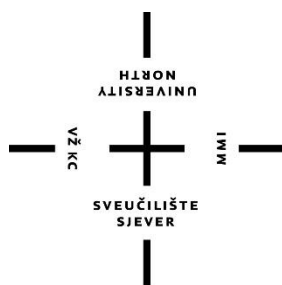
BROJ	406/EL/2017
OPIS	<ul style="list-style-type: none">- Objasniti strukturu nadomjesne mreže asinkronog motora, Potrebno je ukratko objasniti princip rada asinkronog stroja i na toj osnovi izvesti nadomjesnu shemu. Ukratko opisati značenje svakog pojedinog parametra.- Opisati prijelaznu pojavu zaleta asinkronog motora izravno na mrežu, Potrebno je proučiti dostupnu literaturu koja opisuje prijelaznu pojavu kod izravnog zaleta na mrežu. Valja izvesti odgovarajuće matematičke izraze za proračun vanjske karakteristike motora. Objasniti utjecaj napona mreže na iznos pojedinih parametara.- Načiniti matematički model motora i mreže u odgovarajućem programskom paketu, Potrebno je proučiti mogućnosti raspoloživog programskog paketa i načiniti odgovarajući model motora i radnog mehanizma.- Napraviti pokuse u laboratoriju Sveučilišta Sjever, Potrebno je izvršiti odgovarajuća mjerenja radi utvrđivanja parametara nadomjesne sheme. Potrebno je nacrtati sheme spoja i navesti potrebnu opremu za mjerenje.- Izračunati momentne karakteristike motora za različite napone mreže, iz podataka dobivenih pokusom potrebno je odrediti parametre nadomjesne mreže motora. Pomoću analitičkih izraza izračunati vanjsku karakteristiku motora za vrijeme trajanja zaleta.- Izvršiti simulacije u programskom paketu za izmjerene parametre motora i mreže, Pomoću izrađenog programskog modela potrebno je načiniti odgovarajuće simulacije za zadane parametre motora i mreže.- Izvršiti pokuse zaleta na asinkronom motoru koji se nalazi u laboratoriju Sveučilišta Sjever, Potrebno je izvršiti mjerenja karakteristike zaleta. Potrebno je nacrtati sheme spoja i navesti potrebnu opremu za mjerenje. Potrebno je usporediti rezultate mjerenja s rezultatima dobivenim proračunima. Valja objasniti razloge odstupanja.

ZADATAK URUČEN 11.09.2017.



POTPIS MENTORA

Tomić



**Sveučilište
Sjever**

Odjel za Elektrotehniku

Završni rad br. 406/EL/2017

Utjecaj napona mreže na karakteristiku momenta kaveznog asinkronog motora

Student

Mario Vusić, 0822/601

Mentor

Branko Tomičić, Dr. Sc.

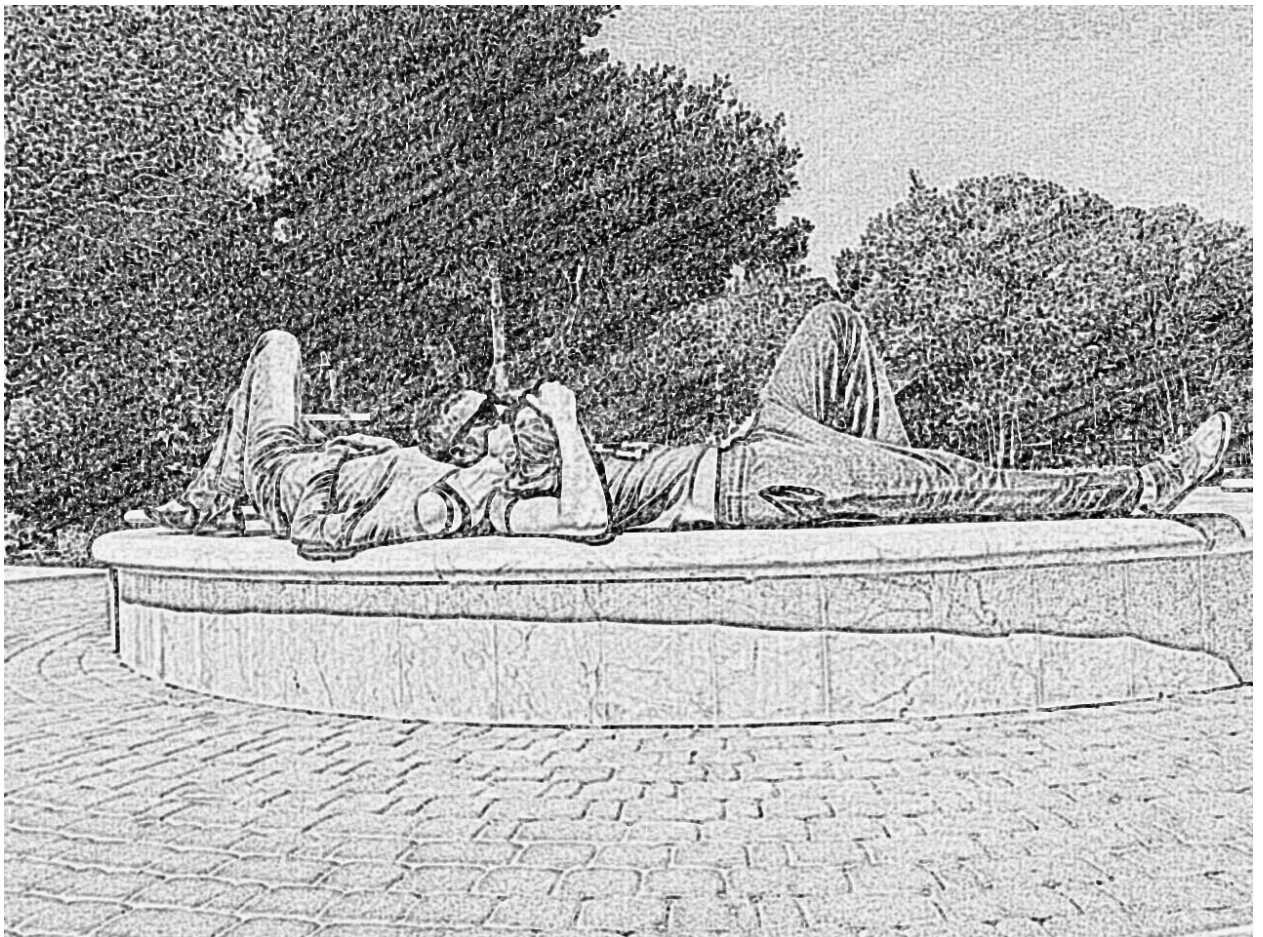
Varaždin, rujan 2017. godine

Predgovor

Zahvaljujem se svom mentoru dr. sc. Branku Tomičiću pri pomoći odabira teme i oko izrade ovog rada. Sa svojim znanjem i stručnim savjetima uvelike je pripomogao pri razumijevanju problematike pojedinih segmenata ovog rada. Također zahvaljujem se i svim profesorima koji su tokom studiranja doprinijeli mom razvoju znanja ali i mene kao osobe.

Isto se zahvaljujem i svojoj obitelji na potpori i razumijevanju tokom studiranja kao i prijateljima koji su mi bili podrška tijekom studiranja.

Posebna zahvala mojoj najvećoj podršci pri pisanju ovog rada, mag. oec. Mirni Kiridžija kojoj i posvećujem ovaj rad.



Sažetak

Ovim radom prikazan je utjecaj napona mreže na momentnu karakteristiku kaveznog asinkronog motora, odnosno njegove vanjske karakteristike. Provedeni su pokusi ispitivanja kaveznog asinkronog motora kako bi se utvrdili parametri nadomjesne sheme. Dobiveni su parametri potom korišteni za računalnu simulaciju zaleta motora direktnim uključivanjem na mrežu u programskom paketu Matlab Simulink.

Također proveden je i pokus zaleta asinkronog kaveznog motora u laboratoriju za električne strojeve na Sveučilištu Sjever. Isto tako preko analitičkih izraza uz pomoć parametara motora dobivene su vrijednosti za karakteristiku momenta računskim putem. Na kraju su rezultati dobiveni različitim metodama uspoređeni i pojašnjeno je odstupanje u rezultatima pojedinih metoda.

Ključne riječi: asinkroni stroj, asinkroni kavezni motor, moment motora, prazni hod, kratki spoj, nadomjesna shema AM

This work shows the influence of the network voltage on the momentary characteristic of the cage asynchronous motor, ie its external characteristic. Testing of the cage asynchronous motors was carried out in order to determine the parameters of the substitute scheme. The obtained parameters were then used for computer simulation of engine droplet by direct inclusion on the network in the Matlab Simulink software package.

An assay of an asynchronous cage engine was also performed at the Laboratory for Electrical Machines at the University of North. Also, through analytical expressions with the help of engine parameters, values for torque characteristics were obtained by calculation. Finally, the results obtained by different methods are compared and the deviation in the results of individual methods is explained.

Key words: asynchronous machine, asynchronous cage motor, motor torque curve, no load test, blocked rotor test, equivalent circuit AM

Popis korištenih kratica

AM	Asinkroni motor
$\cos \varphi_0$	Faktor snage motora
E_1	Inducirani napon statora
E_2	Inducirani napon u rotora
f_1	Frekvencija statorskog induciranog napona
f_2	Frekvencija rotorskog induciranog napona
f_{n1}	Faktor namota statora
f_{n2}	Faktor namota rotora
I_0	Struja praznog hoda
i_{as}, i_{bs}, i_{cs}	Fazne struje statora
i_{ar}, i_{br}, i_{cr}	Fazne struje rotora
I_k	Struja kratkog spoja
M_{max}	Maksimalni moment motora
M_t	Moment tereta motora
M_{pr}	Prekretni ili maksimalni moment motora
n	Brzina vrtnje rotora motora
n_s	Sinkrona brzina vrtnje ili brzina vrtnje okretnog magnetskog polja
N_1	Broj zavoja statorskog namota
N_2	Broj zavoja rotorskog namota
P_1	Snaga koju motor uzima iz mreže
P_2	Snaga koju motor razvija na osovini
P_0	Ukupni gubici praznog hoda motora
P_0'	Uži gubici praznog hoda
P_{Cu0}	Gubici namota statora u praznom hodu
P_{Cu1}	Fazni gubici u namotu statora
P_{Cu2}	Fazni gubici u namotu rotora
P_{Fe}	Gubici u željezu
P_k	Ukupni gubici kratkog spoja motora
P_{meh}	Mehanička snaga motora
P_{okr}	Snaga okretnog polja
$P_{tr,v}$	Gubici zbog trenja i ventilacije
p	Broj pari polova motora
R_1	Radni otpor statorskog namota

R_2	Radni otpor rotorskog namota
s	Klizanje motora
U	Napon napajanja (mreže)
U_0	Napon praznog hoda
u_{as}, u_{bs}, u_{cs}	Fazni naponi statora
u_{ar}, u_{br}, u_{cr}	Fazni naponi rotora
U_k	Napon kratkog spoja
Z_2	Impedancija rotorskog namota
$X_{\sigma 1}$	Rasipna reaktancija statora
$X_{\sigma 2}$	Rasipna reaktancija rotora
ω	Mehanička kružna brzina
ω_s	Sinkrona kutna brzina
σ	Faktor ulančenja
$\psi_{as}, \psi_{bs}, \psi_{cs}$	Ulančeni tokovi statora
$\psi_{ar}, \psi_{br}, \psi_{cr}$	Ulančeni tokovi rotora

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Teorija asinkronog motora.....	2
2.1.	Osnove konstrukcije trofaznog asinkronog motora.....	2
2.2.	Izvedbe asinkronih motora.....	4
2.2.1.	Kavezni asinkroni motor.....	4
2.2.2.	Kliznokolutni asinkroni motor.....	5
2.3.	Princip rada trofaznog kaveznog asinkronog motora.....	6
2.4.	Nadomjesna shema asinkronog motora.....	9
2.4.1.	Pokus praznog hoda.....	16
2.4.2.	Pokus kratkog spoja.....	18
2.5.	Bilanca snage i korisnost kaveznog asinkronog motora.....	20
2.6.	Momentna karakteristika kaveznog asinkronog motora.....	23
3.	Matematički model stroja.....	28
3.1.	Matematički model asinkronog motora.....	28
3.2.	Transformacija trofaznih varijabli.....	33
3.3.	Normiranje jednadžbi dvoosnog modela.....	37
4.	Određivanje parametara nadomjesne sheme kaveznog AM.....	40
4.1.	Podaci motora i mjerne opreme.....	40
4.2.	Vrijednosti dobivene pokusom praznog hoda.....	41
4.3.	Vrijednosti dobivene pokusom kratkog spoja.....	45
4.4.	Proračun statičke momentne karakteristika.....	49
5.	Pokus zaleta kaveznog asinkronog motora u laboratoriju.....	51
6.	Računalni model motora.....	56
6.1.	Osnove Matlaba.....	56
6.2.	Izrada simulacijske sheme mreže i kaveznog asinkronog motora pomoću grafičkih blokova u programskom paketu Simulink.....	57
6.3.	Simulacija zaleta kaveznog asinkronog motora na računalu.....	60
6.4.	Dinamička momentna karakteristika.....	60
7.	Analiza i usporedba dobivenih rezultata.....	63
8.	Zaključak.....	65
9.	Literatura.....	66
	Popis slika.....	67
	Prilozi.....	2

1. Uvod

Asinkroni električni strojevi pripadaju strojevima izmjenične struje. Ime asinkroni dobili su prema činjenici da se brzina vrtnje rotora razlikuje od brzine vrtnje okretnog magnetskog polja. Najčešće se koriste kao asinkroni motori u elektromotornim pogonima, a ponekad kao i generatori u elektranama. Dok se sinkroni strojevi uglavnom proizvode za velike snage, pojedinačno kao generatori, asinkroni strojevi najčešće se upotrebljavaju kao motori manjih snaga, najčešće u serijskoj proizvodnji i srednjih snaga. Proizvode se pojedinačno i za veće snage, desetak MW i više, te za napone veće od 15 kV.

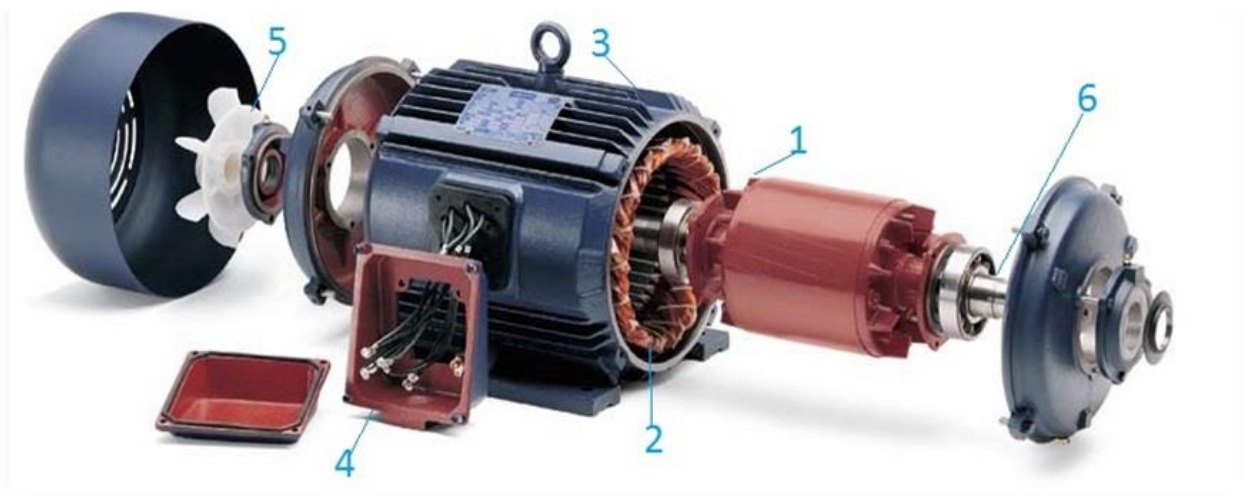
Godine 188. asinkroni motor otkrio je veliki izumitelj Nikola Tesla. Princip rada asinkronog motora temelji se na teoriji okretnog magnetskog polja. Priključkom statorskog namota na vanjski izvor u rotorskom namotu se inducira napon putem elektromagnetske indukcije koji potjera struju kroz rotorski namot. Zbog toga asinkroni motor još nazivamo i indukcijski motor.

Pri konstrukciji asinkronog motora kao i kasnijem odabiru pri njegovoj uporabi u elektromotornom pogonu, jedan od bitnih čimbenika jest momenta karakteristika motora. Vrlo je bitno poznavati njezino ponašanje u pojedinim režimima rada i čimbenike koji utječu na njezine osobine, kako one unutarnje ovisne o motoru, tako i one vanjske poput mreže. U elektromotornim pogonima treba računati da napon mreže nije konstantan. Dozvoljene su promjene napona od $\pm 5\%$ a ponekad i do $\pm 10\%$. Prilikom pokretanja u slabijim mrežama može se desiti da napon mreže padne još i više. Upravo utjecaj napona mreže na momentnu karakteristiku motora je ono što će se proučavati u nastavku rada.

2. Teorija asinkronog motora

2.1. Osnove konstrukcije trofaznog asinkronog motora

Na slici 2.1 prikazan je asinkroni motor i njegovi osnovni dijelovi. Na slici su dijelovi označeni brojevima, a na tumaču ispod slike su predstavljeni nazivi dijelova motora.



Slika 2.1 Konstrukcija asinkronog motora



1. Rotor



2. Stator



3. Kućište



4. Priključna kutija

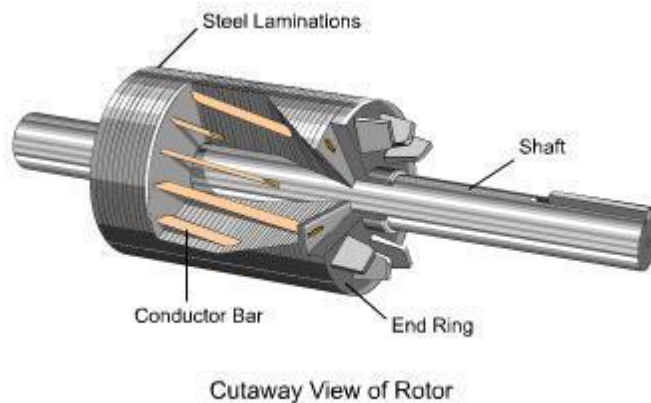


5. Ventilator



6. Osovina

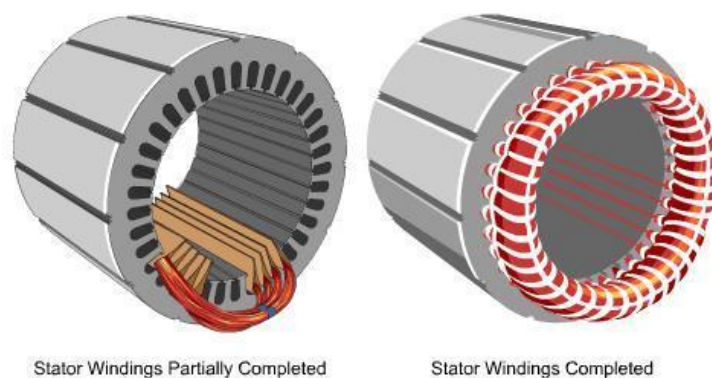
Rotor se sastoji od rotorskog paketa, namota i osovine te je slične konstrukcije kao i stator. Rotor ima oblik valjka i izveden je od dinamo limova. S vanjske strane uzduž samog rotora nalaze se utori za smještaj rotorskog namota. Ukoliko je rotorski namot izveden od materijala kao što su bakar, mjed, aluminij, bronca i ukoliko su s obje strane prstena kratko spojeni te poprimaju oblik kaveza tada se govori o kaveznom asinkronom motoru.



Slika 2.2 Presjek rotora

Stator je dizajniran kao šuplji valjak, a uzduž unutarnje strane valjka nalaze se utori u koje se stavlja trofazni namotaj. Oko samog statora nalazi se kućište koje služi kao zaštita svih unutarnjih dijelova motora.

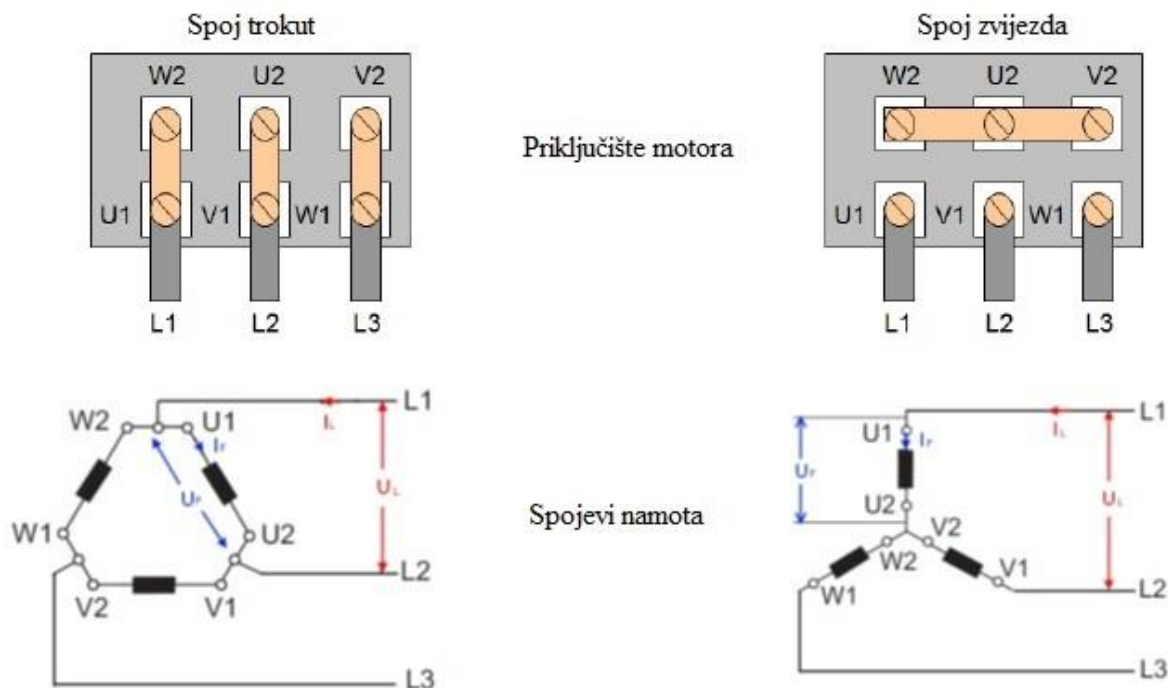
Kućište se izrađuje od lijevanog željeza, čelika, aluminija i sl.. Radi boljeg hlađenja motora kućište je većinom rebrasto ili se u statorskom paketu limova nalaze kanali za hlađenje. Kod pojedinih motora na osovinu se prigraduje ventilator radi poboljšanja učinkovitosti hlađenja.



Slika 2.3 Konstrukcija statora

U priključnoj kutiji koja se nalazi na kućištu motora nalaze se stezaljke na koje je izveden statorski namot. Stezaljke služe za napajanje motora priključkom trofaznog izvora napona [1].

Postoje dva načina spajanja statorskog trofaznog namota, u spoj zvijezda ili spoj trokut.



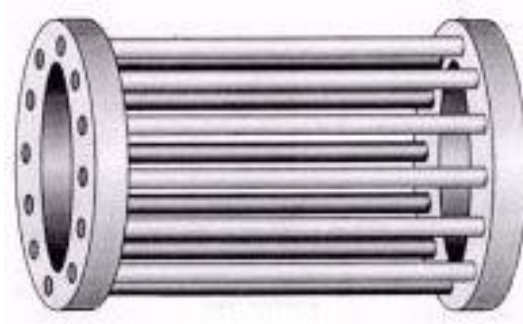
Slika 2.4 Shema spoja namota i odgovarajući izgled spoja namota u priključnoj kutiji za spoj trokut i spoj zvijezda

2.2. Izvedbe asinkronih motora

Postoje razne podjele asinkronih motora, pa tako prema izvedbi rotorskog namota asinkroni motori mogu biti kavezni ili kliznokolutni.

2.2.1. Kavezni asinkroni motor

Stator asinkronog motora je izveden kao i kod kolutnih motora. Kod kaveznog asinkronog motora u svakom utoru rotora smješten je po jedan vodič u obliku šipke. Šipke su sa svake strane rotora kratko spojene prstenima i čine višefazni rotorski namot. Ako se odstrani željezna jezgra, takav namotaj izgleda poput kaveza kao na slici 2.5, pa otud i ime kavezni asinkroni motor.



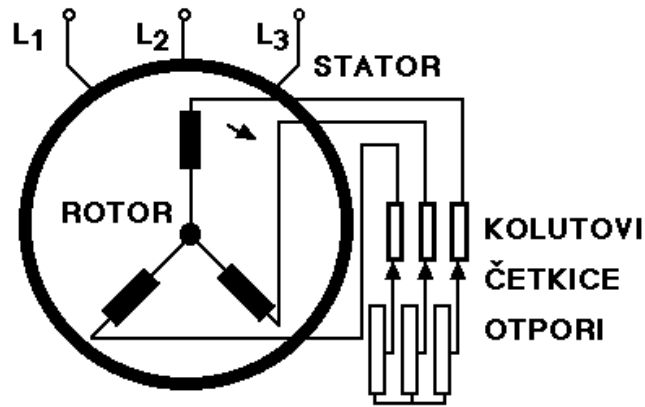
Slika 2.5 Namot asinkronog kaveznog motora

Kavezni namot ponaša se kao da je višefazni i simetričan što je uvjet da se stvori okretno polje. Broj pari polova rotora prilagođuje se broju pari polova statora, a broj faza rotorskog namota jednak je broju štapova. Tako bi se isti kavezni rotor mogao primijeniti za bilo koji broj statorskih pari polova i faza pa bi se npr. kavezni rotor trofaznog motora mogao koristiti kod jednofaznog i obratno. Kod raznih tipova motora izvedeni se kavezni rotori ipak međusobno razlikuju ne samo po dimenzijama, nego po obliku i broju vodiča kaveznog namota kako bi se dobile optimalne karakteristike motora.

Kavezni asinkroni motor nema kliznih koluta i nema kliznih kontakata. Jedini mehanički potrošni dijelovi su ležajevi pa je zbog toga kavezni asinkroni motor najpouzdaniji, najlakši za održavanje, najjeftiniji i najčešće korišten elektromotor [1].

2.2.2. Kliznokolutni asinkroni motor

Rotorski namot je obično trofazni i izveden je od svitaka slično kao i statorski namot. Namoti mogu biti spojeni u trokut ili zvijezdu. Osnovni je zahtjev da oba namota stvaraju simetrično okretno polje. Krajevi tih namota su preko kliznih koluta spojeni na četkice. Ako je rotor izveden kao trofazni, što najčešće bude, imamo tri klizna koluta smještena na osovini koji su međusobno i prema osovini izolirana. Kad se rotor okreće četkice klize po kolutima i preko otpornika smještenih izvan stroja u rotorskom uputniku, pokretaču, zatvaraju strujni krug rotorskog namota. Takav motor za koji su karakteristični klizni koluti i četkice naziva se kolutni motor (slika 2.6).



Slika 2.6 Kliznokolutni asinkroni motor

Promjenom otpora rotorskog uputnika može se mijenjati momentna karakteristika motora. Kolutni asinkroni motor koristi se u elektromotornim pogonima s teškim uvjetima pokretanja gdje se zahtjeva veliki potezni moment, kao npr. kod pokretanja dizalica, mlinova, drobilica, pumpi i sl.. U odnosu na kavezni motor su teži, skuplji i osjetljiviji u pogonu.

2.3. Princip rada trofaznog kaveznog asinkronog motora

Prema literaturi [1], [2] i [3], priključivanjem statora asinkronog motora na izmjenični trofazni izvor napona poteći će struja koja stvori okretno magnetsko polje. To polje rotira sinkronom brzinom pri čemu presijeca vodiče statorskog i rotorskog namota u kojima se inducira napon. Inducirani napon u statorskom namotu drži ravnotežu priključenom naponu mreže, dok inducirani napon u rotorskom namotu potjera struju kroz vodiče rotora.

Ako je rotorski namot kratko spojen kao što je to normalan slučaj kod kaveznih motora, struja koju će preko impedancije jedne faze rotora potjerati inducirani napon iznosi:

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{\sigma 2}^2}}, \quad (2.1)$$

gdje je:

E_2 - inducirani napon u rotorskom namotu

Z_2 - impedancija rotorskog namota

R_2 - otpor rotorskog namota

$X_{\sigma 2}$ - rasipna reaktancija rotorskog namota

Prema Biot-Savart-ovom zakonu, na vodiče rotora kojima teče struja i nalaze se u magnetskom polju djeluje sila koja na kraku prema osi rotacije stvara moment. Iznos momenta određen je izrazom:

$$M = k \cdot I_2 \cdot \Phi \cdot \cos \varphi_2 \quad (2.2)$$

gdje je:

k - konstanta određena konstrukcijom motora

φ_2 - kut između struje I_2 i magnetskog toka Φ .

Sinkrona brzina vrtnje kojom se vrti magnetsko polje određena je izrazom:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (2.3)$$

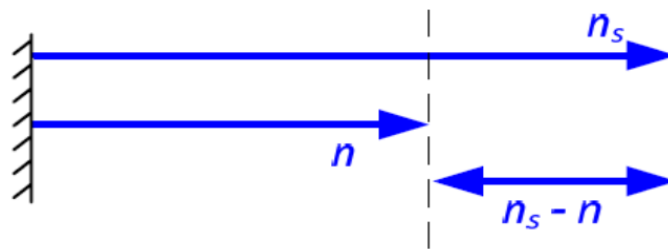
gdje su:

f – frekvencija napona mreže,

p – broj pari polova motora.

Ako rotor asinkronog motora nije zakočen, usred djelovanja okretnog magnetskog polja počinje se okretati. Brzina vrtnje rotora zaostaje za brzinom vrtnje okretnog magnetskog polja, a odnos ovih dvaju brzina izražen je preko parametra nazvanog klizanje (izraz 2.4). Klizanje kao veličina je bezdimenzijsko i obično se izražava u postocima.

$$s = \frac{n_s - n}{n} = \frac{\Delta n}{n} \quad (2.4)$$



Slika 2.7 Prikaz odnosa sinkrone brzine vrtnje magnetskog polja i brzine vrtnje motora

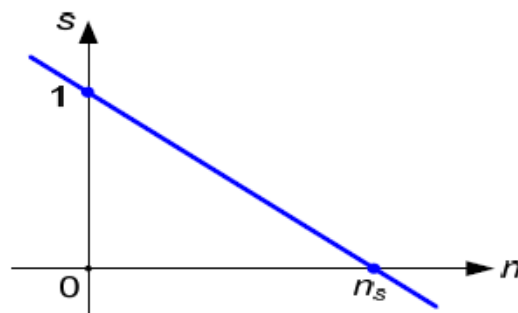
Brzinu vrtnje rotora možemo odrediti uvrštavanjem jednađbe (2.3) u jednađbu (2.4), pa se dobiva slijedeći izraz:

$$n = n_s(1 - s) = 60 \cdot \frac{f}{p} (1 - s) \quad (2.5)$$

Kod rada asinkronog motora postoje dva granična stanja u režimu rada, mirovanje (kratki spoj) i sinkronizam (idealni prazni hod).

U stanju mirovanja brzina rotora je nula, dok je klizanje maksimalno ($s = 1$). Motor se nalazi u kratkom spoju.

Kod sinkronizma brzina vrtnje rotora jednaka je sinkronoj brzini ($n = n_s$) pa je klizanje jednako nuli ($s = 0$).



Slika 2.8 Odnos između klizanja i sinkrone brzine

U stvarnosti, asinkroni motor nikad ne dostigne sinkronu brzinu vrtnje. Kada bi rotor postigao brzinu vrtnje okretnog magnetskog polja, čime bi nestala razlika između njihovih brzina, magnetske silnice više ne bi presijecale vodiče rotorskog namota. Kao posljedica toga, nema inducirano napona u rotorskom namotu, kroz vodiče rotora ne bi potekla struja pa samim time ne bi bilo djelovanja sile na vodiče rotora i stvaranja momenta potrebnog za vrtnju rotora. Dakle u realnom praznom hodu klizanje je najbliže nuli, ali nikad nula. U praznom hodu, kad nema tereta na osovini, motor mora svladati neki mali moment trenja u ležajevima, moment ventilacije i moment trenja rotora. Da bi savladao taj moment, namotima rotora mora teći neka mala struja, koju stvara isto tako mali napon koji je posljedica klizanja koje je vrlo blizu nule, ali nikad nula.

Prema literaturi [1], iznos induciranog napona u rotorskom namotu i njegova frekvencija ovise o razlici brzina okretnog magnetskog polja i rotora. Kad rotor miruje, rotorska frekvencija jednaka je statorskoj frekvenciji koju određuje izvor (mreža). U sinkronizmu frekvencija rotora bila bi jednaka nuli. Frekvencija statora određuje sinkronu brzinu vrtnje, a frekvenciju rotora određuje razlika između sinkrone brzine magnetskog polja i brzine vrtnje rotora, pa se dobiva izraz za klizanje koji glasi:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{n_r}{n_s} = \frac{n_s - n}{n_s} = s, \quad (2.6)$$

iz čega slijedi

$$f_2 = s f_1. \quad (2.7)$$

Okretno magnetsko polje stvoreno rotorskim višefaznim strujama frekvencije prema izrazu 2.7 ima prema rotoru brzinu:

$$n_r = \frac{f_2}{p} = \frac{f_1}{p} s = n_s \cdot s \quad (2.8)$$

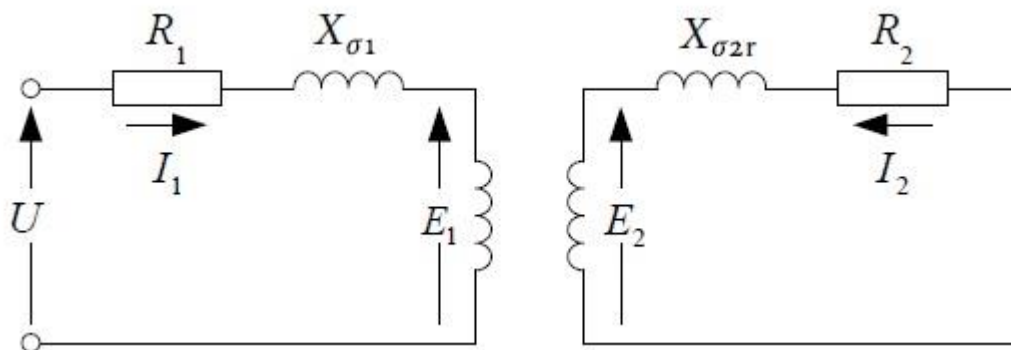
Kako se rotor već okreće nazivnom brzinom, tada rotorski magnetski tok u odnosu na mirujući stator ima brzinu:

$$n + n_r = n + (n_s - n) = n_s, \quad (2.9)$$

upravo onu istu koju ima i statorsko okretno polje.

2.4. Nadomjesna shema asinkronog motora

Slično kao i transformator, asinkroni motor može se prikazati nadomjesnom shemom koja prikazuje statorske i rotorske komponente motora. Na slici 2.9 prikazana je pojednostavljena shema sa odvojenim statorskim i rotorskim krugom i njihovim komponentama.



Slika 2.9 Nadomjesna shema asinkronog motora, statorski krug (lijevo) i rotorski krug (desno)

Gdje su:

- U - napon napajanja (mreže)
- R_1 - radni otpor statora
- $X_{\sigma 1}$ - rasipna reaktancija statora
- E_1 - inducirani napon statora
- R_2 - radni otpor rotora
- $X_{\sigma 2}$ - rasipna reaktancija rotora
- E_2 - inducirani napon rotora

Prema literaturi [1] iznos inducirano rotorskog napona ovisi o broju zavoja rotora, faktoru namota rotora i o brzini presijecanja magnetskog toka rotorskim vodičima, a koja je razmjerna frekvenciji rotora. Iz omjera napona statora i rotora

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 f_1 f_{n1}}{N_2 f_2 f_{n2}} = \frac{N_1 f_{n1}}{N_2 f_{n2}} \cdot \frac{1}{s}, \quad (2.10)$$

slijedi da je

$$E_2 = s \cdot \frac{N_2 f_{n2}}{N_1 f_{n1}} \cdot E_1, \quad (2.11)$$

pri čemu su:

- E_1 - inducirani napon u statoru
- E_2 - inducirani napon u rotoru
- N_1 - broj zavoja statorskog namota
- N_2 - broj zavoja rotorskog namota
- f_{n1} - faktor namota statora

f_{n2} - faktor namota rotora

Ako rotor miruje, klizanje je jednako jedan, pa je napon rotora u mirovanju, odnosno u kratkom spoju određen prema izrazu:

$$E_{2k} = E_1 \cdot \frac{N_2 f_{n2}}{N_1 f_{n1}} \quad (2.12)$$

Ako se dobiveni izraz (2.8) uvrsti u izraz (2.7) dobiva se rotorski napon izražen preko klizanja i napona mirujućeg rotora:

$$E_2 = sE_{2k} \quad (2.13)$$

U trenutku pokretanja kada je klizanje maksimalno, inducirani napon rotora postiže najveću vrijednost, pa je i struja pokretanja velika. 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 [1].

Tijekom zaleta motora frekvencija rotorske struje smanjuje se prema izrazu (2.7) a samim time smanjuje se i induktivni otpor rotora koji u mirovanju iznosi:

$$X_{\sigma 2k} = \omega_1 L_{\sigma 2} = 2\pi f_1 L_{\sigma 2} \quad (2.14)$$

Za vrijeme vrtnje rotora kod nekog klizanja, pri frekvenciji rotora i određenom klizanju rasipni otpor poprima vrijednost:

$$X_{\sigma 2} = 2\pi f_2 L_{\sigma 2} = sX_{\sigma 2k} \quad (2.15)$$

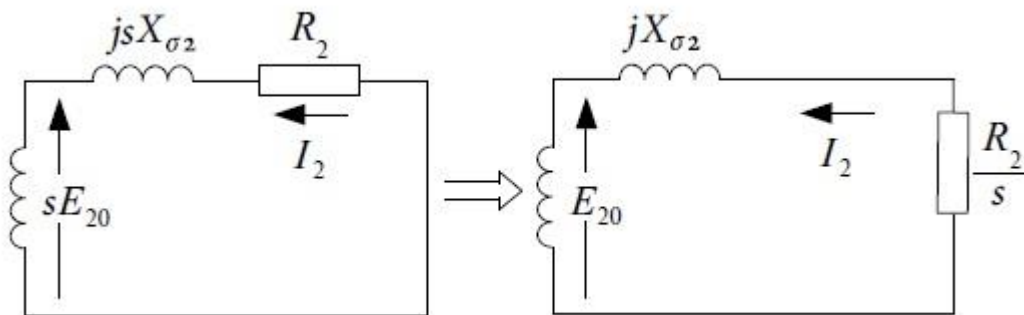
Za faznu struju u rotorskom namotu pri nekom opterećenju kojem odgovara određeno klizanje vrijedi izraz:

$$I_2 = \frac{s \cdot E_{2k}}{\sqrt{R_2^2 + (s \cdot X_{\sigma 2k})^2}} \quad (2.16)$$

Iz izraza (2.16) vidljivo je da su članovi brojnika i nazivnika ovisni o klizanju, odnosno opterećenju, što otežava analizu i predodžbu preko nadomjesne sheme rotorskog kruga. Zbog toga se struja kod opterećenjem izražava preko veličina u mirovanju. Ako se brojnik i nazivnik u izrazu (2.16) za rotorsku struju opterećenog motora podijele s klizanjem, tada je

$$I_2 = \frac{E_{2k}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{\sigma 2k}^2}}. \quad (2.17)$$

Nakon ove modifikacije rotorskog kruga, nadomjesna shema rotora poprima izgled prema slici 2.10:



Slika 2.10 Nadomjesna shema za rotorski krug modificiran s promjenjivim otporom rotora

Usporede li se izrazi (2.1) i (2.17), vidljivo je da se struja rotora pri opterećenju mijenja u odnosu na struju mirujućeg rotora. Asinkroni motor u radu pri nekom klizanju ponaša se kao mirujući motor kojem se prividno povećao radni otpor rotora na vrijednost R_2/s . U stvarnosti promijenili su se inducirani napon i rotorska reaktancija. Kako je otpor rotora u mirovanju radni, opterećenje je djelovalo jednako kao da se zakočenom rotoru otpor povećao za iznos [1]:

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R_2 \frac{1-s}{s}. \quad (2.18)$$

gdje je:

$\frac{R_2}{s}$ - ukupni radni otpor rotorskog kruga

R_2 - stvarni radni otpor rotorskog namota

$R_2 \frac{1-s}{s}$ - fiktivni otpor, ekvivalent mehaničke snage motora.

Kako bi se stator i rotor prikazali u nadomjesnoj shemi jednim strujnim krugom, uobičajeno je preračunati parametre rotorskog kruga na broj zavoja statora. Preračunati parametri statora označavaju se sa crticom i izračunavaju prema slijedećim izrazima:

$$E'_2 = E_2 \cdot \frac{N_1 \cdot f_{n1}}{N_2 \cdot f_{n2}}, \quad (2.19)$$

$$I'_2 = I_2 \frac{N_2 \cdot f_{n2}}{N_1 \cdot f_{n1}}, \quad (2.20)$$

$$R'_2 = R_2 \left(\frac{N_1 \cdot f_{n1}}{N_2 \cdot f_{n2}} \right)^2, \quad (2.21)$$

$$X'_{\sigma 2} = X_{\sigma 2} \frac{N_1 \cdot f_{n2}}{N_2 \cdot f_{n2}}, \quad (2.22)$$

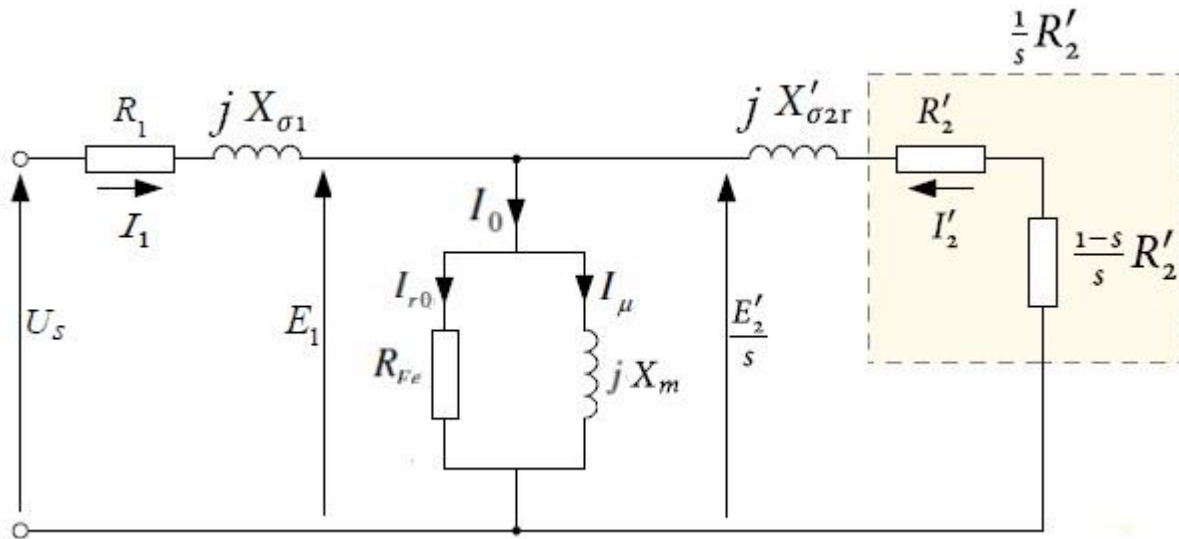
Fazor napona koji se inducira u namotu rotora s parametrima preračunatim na statorsku stranu zadan je izrazom:

$$\vec{E}'_2 = R'_2 \cdot \vec{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \vec{I}'_2 \quad (2.23)$$

Ako se izraz (2.23) podjeli sa klizanjem, dobije se:

$$\vec{E}_1 = \frac{\vec{E}'_2}{s} = \frac{R'_2}{s} \cdot \vec{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \vec{I}'_2 \quad (2.24)$$

Tako se dobije modificirani oblik potpune nadomjesne sheme asinkronog motora koja je prikazana na slici 2.11:



Slika 2.11 Potpuna nadomjesna shema asinkronog motora

Nadomjesna shema crta se za jednu fazu motora pa su tako sve vrijednosti fazne. Parametri nadomjesne sheme mogu se dobiti iz pokusa praznog hoda i kratkog spoja.

Značenje parametara nadomjesne mreže:

Radni otpor statorskog namota, R_1 :

Svaki vodič ima radni otpor, pa se tako javlja i kod statorskog namota. Taj otpor se mijenja s promjenom temperature, ali to opet ovisi o opterećenju, konstrukciji i ostalim uvjetima stroja. Ako ne postoje detaljniji podaci o temperaturi namota u pogonu uzima se vrijednost otpora pri temperaturi od 75°C. Mjerenjem otpora između stezaljki namota statora može se i izračunati ovisno o spoju statora (trokut ili zvijezda).

$$\text{Spoj zvijezda: } R_{ST} = 2R_s \rightarrow R_s = \frac{R_{ST}}{2} \quad (2.25)$$

$$\text{Spoj trokut: } R_{ST} = \frac{2R_s \cdot R_s}{3R_s} \rightarrow R_s = \frac{3}{2}R_{ST} \quad (2.26)$$

Gdje je:

R_s - nadomjesni otpor faze statora

R_{ST} - otpor između stezaljki namota statora

Reaktancija koja predstavlja rasipni tok statorskog namota, $X_{\sigma 1}$:

Ova reaktancija ovisi o frekvenciji, broju vodiča i magnetskom otporu, te je određena rasipnim tokom. Postoje tri osnovne komponente rasipne statorske reaktancije: utorsko rasipanje, rasipanje glave namota i dvostruko ulančeno rasipanje.

Utorsko rasipanje se može podijeliti na tri dijela:

- a) rasipanje slobodnog dijela utora. To je rasipanje na području utora koji ne sadrži vodič,
- b) rasipanje dijela utora u kojemu se nalaze vodiči. Također će se rasipna vodljivost povećati sa visinom utora a smanjiti sa širinom utora,
- c) rasipanje među glavama zubi.

Rasipanje glava namota ovisi o duljini dijela vodiča koji se nalaze u glavama. Također ovisi o obliku glave i konstrukciji stroja.

Dvostruko ulančeno rasipanje je razlika između ukupne reaktancije glavnog toka određenog namota i reaktancije koja pripada osnovnom harmoničkom članu glavnog toka. Iz toga slijedi da razliku naprave viši harmonički članovi koji induciraju napone koje se izraze kao padovi napona na reaktanciji dvostruko ulančenog rasipanja.

Reaktancija koja predstavlja glavni tok, X_m :

Induktivni otpor uslijed glavnog polja je reaktancija koja predstavlja glavni magnetski tok motora, odnosno komponentu toka koja obuhvaća stator i rotor.

Radni otpor gubitaka u željezu motora, R_{Fe} :

Radni otpor predstavlja gubitke u željezu motora koji nastaju uslijed vrtložnih struja, koje ovise o debljini i svojstvima limova, i petlje histereze koja ovisi o svojstvu limova.

Radni otpor rotorskog namota reduciran na stator, R_2' :

Otpor jedne faze će se izračunati tako da se izračuna otpor štapa i njemu pridodaju otpori segmenata prstena kaveza koji čine kratki spoj, te reduciraju na stranu statora. Radni otpor igra vrlo važnu ulogu kod poteznog momenta motora, tj. što je radni otpor rotora veći to je i potezni moment motora veći.

Reaktancija koja predstavlja rasipni tok rotorskog namota, $X_{\sigma 2}$:

Ovisi o frekvenciji, faktoru namota, broju vodiča i magnetskom otporu. Određena je rasipnim tokom, ali se razlikuje od statorske reaktancije zbog same razlike između statora i rotora.

Fiktivni otpor koji predstavlja ekvivalent mehaničke snage, $R_2 \frac{1-s}{s}$:

Ovaj otpor nastao je zbog pojednostavljenja da se lakše odvoji stvarni, realni otpor od otpora ovisnog o klizanju.

2.4.1. Pokus praznog hoda

Pokus praznog hoda vrši se tako, da se kod različitih vrijednosti narinutog napona napajanja izmjeri struja praznog hoda i snaga koju asinkroni motor vuče iz mreže [2]. Pritom je osovina motora neopterećena, brzina vrtnje je bliska sinkronoj brzini a klizanje je blisko nuli. Iz podataka dobivenih mjerenjem može se izračunati faktor snage prema slijedećem izrazu:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_0 \cdot I_0} \quad (2.27)$$

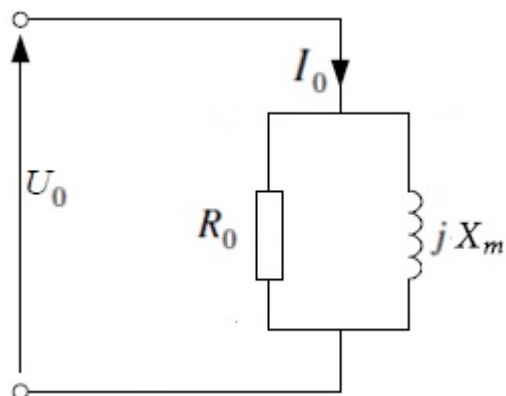
gdje je:

P_0 - snaga praznog hoda

U_0 - narinuti napon, napon mreže

I_0 - struja praznog hoda.

S obzirom da je kod pokusa praznog hoda struja mala a samim time i pad napona na parametrima uzdužne grane je vrlo mali u odnosu na padove napona na elementima poprečne grane, kod pokusa praznog hoda elementi uzdužne grane se zanemaruju pa nadomjesna shema izgleda kao na slici 2.12:

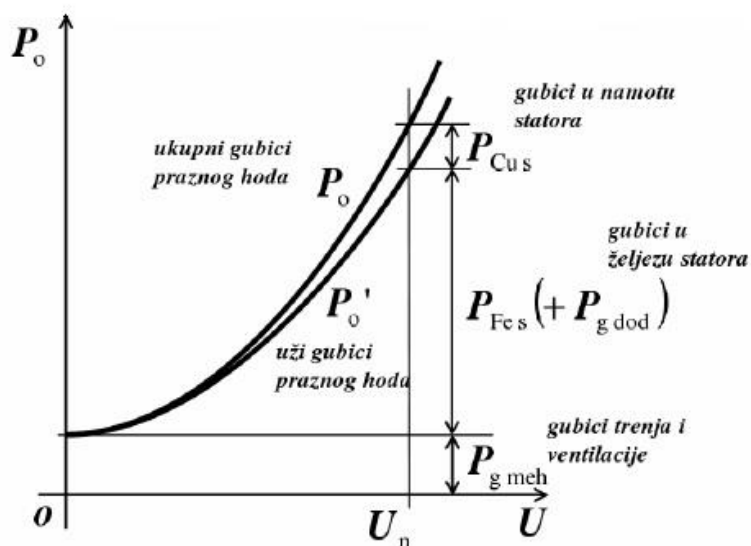


Slika 2.12 Nadomjesna shema praznog hoda asinkronog motora

Pokus praznog hoda ima za cilj odrediti gubitke praznog hoda i rastaviti ih na mehaničke gubitke i gubitke u željezu. Ukupni gubitci praznog hoda određeni su izrazom:

$$P_0 = P_{Fe} + P_{Cu0} + P_{tr,v} , \quad (2.28)$$

Gubici u željezu posljedica su vrtložnih struja i histereze, gubici u namotu nastaju zbog struje praznog hoda koja teče statorskim namotom, dok mehanički gubici nastaju kao posljedica trenja u ležajevima motora i strujanja zraka ventilacije.



Slika 2.13 Raspodjela gubitaka praznog hoda asinkronog motora

Gubici u željezu i mehanički gubici konstantni su za konstantan napon i frekvenciju napajanja. Da bi se odredili gubici trenja i ventilacije potrebno je najprije odvojiti strujne gubitke u praznom hodu, koji nastaju u namotu statora, a oni se određuju prema izrazu

$$P_{Cu0} = 1,5 \cdot R_s \cdot I_0^2, \quad (2.29)$$

gdje je:

R_s - otpor namota statora

I_0 - struja praznog hoda.

Nakon odvajanja strujnih gubitaka nastalih u statoru, prema slici 2.13 dobivaju se uži gubici praznog hoda, izraz 2.30. Oni se sastoje od gubitaka trenja i ventilacije i gubitaka u željezu [3].

$$P'_0 = P_0 - P_{Cu0} = P_{Fe} + P_{tr,v} \quad (2.30)$$

Gubici trenja i ventilacije su stalni jer se motor tijekom pokusa praznog hoda vrti stalnom brzinom, što je prikazano na slici 2.13. Gubici u željezu statora koji su uzrokovani histerezom i vrtložnim strujama, približno su proporcionalni kvadratu napona na stezaljkama motora, sve dok magnetski krug motora ne uđe u zasićenje [4]. Iz jednadžbe 2.30 i slike 2.13 koja pokazuje da su gubici trenja i ventilacije stalni mogu se odrediti gubici u željezu:

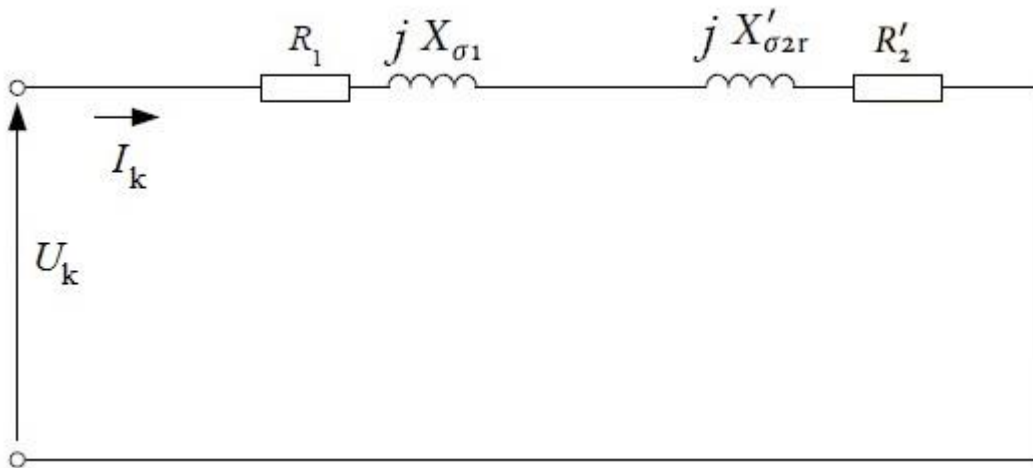
$$P_{Fe} = P'_0 - P_{tr,v}. \quad (2.31)$$

2.4.2. Pokus kratkog spoja

Pokus kratkog spoja je pogonsko stanje kod kojeg je motor priključen na napon, a rotor je zakočen, odnosno miruje. Stroj priključen na neki napon uzima struju iz mreže, razvija neki moment a s obzirom da se rotor ne vrti klizanje je jednako jedan.

Prema literaturi [2] i [3] pokus kratkog spoja vrši se pri smanjenom naponu, kako struja kratkog spoja ne bi bila prevelika zbog čega bi došlo do pregrijavanja namota. Tako se pokus obično izvodi pri 15-30% nominalnog napona za strojeve veće snage i 30-100% nominalnog napona za strojeve manje snage. Pritom motor iz mreže uzima nominalnu struju. Veličine koje

mjerimo pokusom jesu struja kratkog spoja i gubitke kratkog spoja. Kod pokusa kratkog spoja stroj radi u linearnom, nezasićenom dijelu krivulje magnetiziranja što ima za posljedicu da je struja u poprečnoj grani nadomjesne sheme vrlo mala, zanemariva u odnosu na struju u uzdužnoj grani. Prema tome elementi poprečne grane mogu se zanemariti, pa nadomjesna shema izgleda kao na slici 2.14:



Slika 2.14 Nadomjesna shema kratkog spoja asinkronog motora

Elementi nadomjesne sheme prikazani na slici 2.14 izračunavaju se prema slijedećim izrazima [2], [4]:

$$Z_K = \frac{U_{kn}}{\sqrt{3} \cdot I_{kn}} \quad (2.32)$$

$$\cos \varphi_{kn} = \frac{P_{kn}}{\sqrt{3} \cdot U_{kn} \cdot I_{kn}} \quad (2.33)$$

$$R_k = Z_k \cdot \cos \varphi_{kn} \quad (2.34)$$

$$R_s = \frac{R_{st}}{2} \quad (2.35)$$

$$R'_2 = R_k - R_s \quad (2.36)$$

$$X_k = Z_k \cdot \sin \varphi_{kn} \quad (2.37)$$

$$X_{\sigma 1} = X'_{\sigma 2} = \frac{X_k}{2} \quad (2.38)$$

Pri tome su:

Z_k - impedancija jedne faze nadomjesne zvijezde u kratkom spoju,

R_{st} - izmjereni otpor između stezaljki statora,

R_s - otpor jedne faze nadomjesne zvijezde statora,

R'_2 - otpor jedne faze nadomjesne zvijezde rotora, preračunat na statorsku stranu,

$X_{\sigma 1}$ - rasipna reaktancija jedne faze nadomjesne zvijezde statora,

$X'_{\sigma 2}$ - rasipna reaktancija jedne faze nadomjesne zvijezde rotora, preračunata na statorsku stranu.

2.5. Bilanca snage i korisnost kaveznog asinkronog motora

Bilanca snage pokazuje gubitke u asinkronom stroju. Prema literaturi [2] za raspodjelu snage u stroju može nam poslužiti i nadomjesna shema prema slici 2.11 koja pokazuje strujne i naponske prilike u stroju. Važno je za istaknuti da nadomjesna shema prikazuje jednu fazu stroja dok se kod prikaza i proračuna raspodjele snage u obzir uzimaju sve faze statora i rotora stroja.

Prema literaturi [2] i [5], motor uzima iz mreže radnu električnu snagu:

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi \quad (2.39)$$

gdje je:

m_1 - broj faza statora

U_1 - fazna vrijednost napona

I_1 - fazna vrijednost struje

$\cos \varphi$ - faktor snage motora.

Najviše gubitaka stvara se u tzv. aktivnim dijelovima motora u koje spadaju statorski i rotorski paket, te statorski i rotorski namot. Gubici u željezu statorskog paketa određuju se pokusom praznog hoda i njegove karakteristike što je obrađeno u poglavlju 2.4.1. Gubici u željezu rotorskog paketa se zbog male frekvencije induciranog napona mogu zanemariti. Dio snage koju motor uzima iz mreže troši se i na pokrivanje gubitaka u statorskom namotu, a koji se računaju prema izrazu:

$$P_{Cu1} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \quad (2.40)$$

gdje je:

I_1 - izmjerena vrijednost struje jedne faze statora

R_1 - otpor statorskog namota izmjeren između stezaljki motora.

Prema literaturi [1] preostala snaga prenosi se okretnim magnetskim poljem preko zračnog raspora na rotor i dijeli se na mehaničku snagu i gubitke u namotu rotora. Mehanička snaga koju razvija motor može se prikazati preko struje rotora i otpora koji predstavlja ekvivalent mehaničke snage :

$$P_{meh} = m_2 \cdot I_2'^2 \cdot R_2' \frac{1-s}{s}, \quad (2.41)$$

Kako namot rotora ima po fazi omski otpor, gubici u namotu rotora reducirani na stator iznose:

$$P_{Cu2} = m_2 \cdot I_2'^2 \cdot R_2' \quad (2.42)$$

Iz omjera snaga (2.41) i (2.42) dobiva se izraz:

$$\frac{P_{meh}}{P_{Cu2}} = \frac{m_2 \cdot I_2'^2 \cdot R_2' \frac{1-s}{s}}{m_2 \cdot I_2'^2 \cdot R_2'} = \frac{1-s}{s} \quad (2.43)$$

iz kojeg proizlazi da će kod većeg klizanja gubici u namotima rotora biti veći, a mehanička snaga manja. Snaga okretnog polje može se izraziti pomoću svojih dijelova:

$$P_{okr} = P_{Cu2} + P_{meh} = P_{Cu2} + P_{Cu2} \frac{1-s}{s} = \frac{P_{Cu2}}{s} \quad (2.44)$$

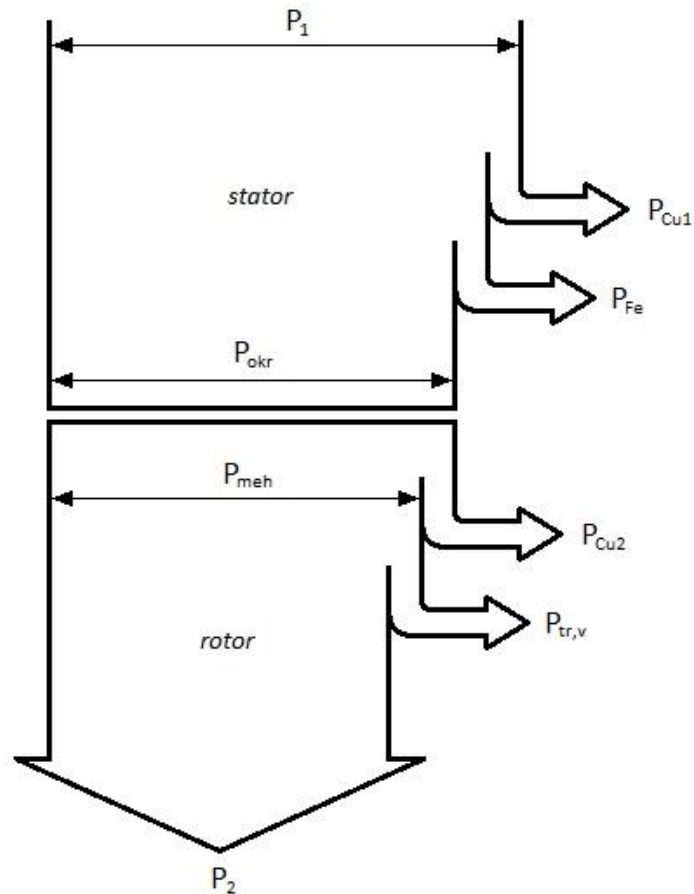
iz čega slijedi da je:

$$P_{meh} = (1 - s)P_{okr} \quad (2.45)$$

Također, zbog vrtnje rotora nastaju mehanički gubici trenjem u ležajevima, kao i gubici ventilacije koji nastaju zbog trenja ventilacijskog zraka. Ti gubici određuju se iz karakteristike

praznog hoda što je opisano u poglavlju 2.4.1. Oduzimanjem gubitaka trenja i ventilacije od mehaničke snage dobiva se korisna radna snaga koju motor razvija na osovini:

$$P_2 = P_{meh} - P_{tr,v} \quad (2.46)$$



Slika 2.15 Energetski dijagram, gubici asinkronog motora

Na temelju poznavanja svih gubitaka u asinkronom motoru, može se odrediti i korisnost motora. Korisnost motora definirana je kao omjer ulazne, odnosno električne snage koju motor uzima iz mreže i izlazne snage, odnosno mehaničke snage razvijene na osovini motora.

Korisnost motora izračunava se prema izrazu:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_g}{P_1} \quad (2.47)$$

gdje su:

P_g - ukupni gubitci u motoru.

2.6. Momentna karakteristika kaveznog asinkronog motora

Kod motornih pogona je karakteristika tereta gotovo uvijek dana karakteristikom momenta tereta u ovisnosti o brzini vrtnje [2].

$$M_t = f(n)$$

Za rješavanje elektromotornih pogona je iz tog razloga važno, da prikažemo i moment motora u ovisnosti o brzini vrtnje ili o klizanju, što je isto[2]:

$$M = f(n) = f_1(s)$$

Ova karakteristična ovisnost momenta motora o brzini vrtnje naziva se i vanjskom karakteristikom motora.

Iz zakona mehanike je poznato da se moment stroja može prikazati kao omjer snage i mehaničke kutne brzine stroja:

$$M = \frac{P_{meh}}{\omega}, \quad (2.48)$$

gdje je:

ω - mehanička kružna brzina.

Budući da je:

$$\omega = (1 - s)\omega_s, \quad (2.49)$$

pomoću jednadžbe (2.43) dobijemo:

$$M = \frac{(1-s)P_{okr}}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_{okr}}{\omega_s} \quad (2.50)$$

gdje je:

ω_s - sinkrona kutna brzina.

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_s}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_n}{p} \quad (2.51)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (2.42) u jednadžbu (2.44) dobiva se izraz za snagu okretnog polja:

$$P_{okr} = \frac{P_{Cu2}}{s} = \frac{m_2 \cdot I_2'^2 \cdot R_2'}{s} \quad (2.52)$$

Korištenjem jednadžbe (2.52) dobiva se izraz za moment:

$$M = \frac{P_{okr}}{\omega_s} = \frac{p \cdot m_2 \cdot E_{20}^2 \cdot R_2'}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot s \cdot \left[\left(\frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{\sigma 2}'^2 \right]} \quad (2.53)$$

Ova jednadžba momenta temelji se na pretpostavci da je inducirani napon u rotoru konstantan, što je točno samo u idealiziranom slučaju kada u statoru nema padova napona, odnosno zanemaruju se statorski otpori. Zanemarivanjem statorskih otpora dovodi do određene pogreške pri računanju, koja je kod normalnih motora vrlo mala, neznatna, a uvelike pojednostavljuje izračun [2].

Ako želimo u izraz (2.53) umjesto inducirano napona u rotoru uvrstiti fazni napon doveden na stator, i ako ne zanemarimo padove napona na statoru, tada izraz za moment glasi:

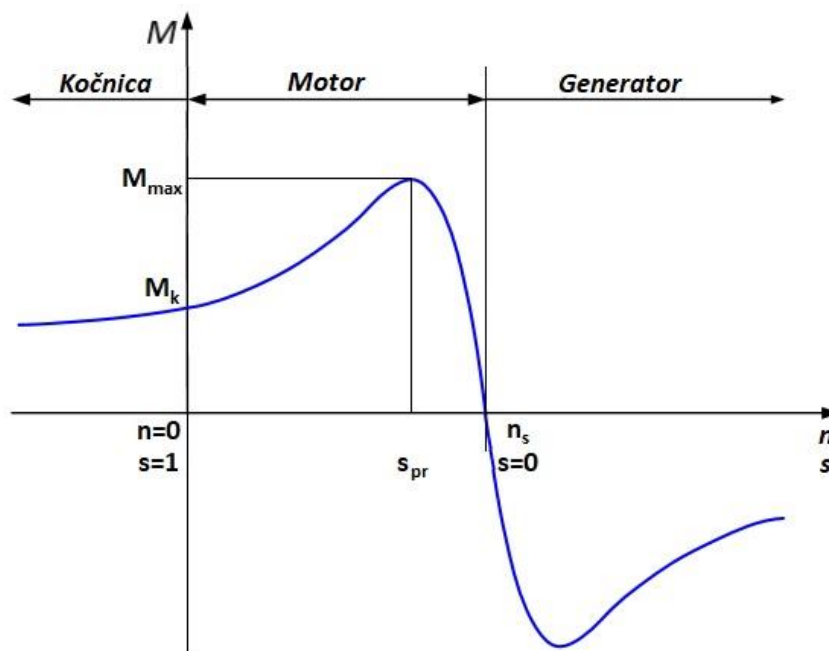
$$M = \frac{p \cdot m_2}{2 \cdot \pi \cdot f_n} \cdot \frac{U_1^2}{\left[\left(R_1 + \sigma \cdot \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(X_{\sigma 1} + \sigma \cdot X_{\sigma 2}' \right)^2 \right]} \cdot \frac{R_2'}{s} \quad (2.54)$$

gdje je:

σ - faktor ulančenja

Faktor ulančenja ili rasipanja se računa prema slijedećem izrazu:

$$\sigma = \frac{X_{\sigma 1} + X_m}{X_m} \quad (2.55)$$



Slika 2.16 Momentna karakteristika asinkronog stroja za sva područja rada

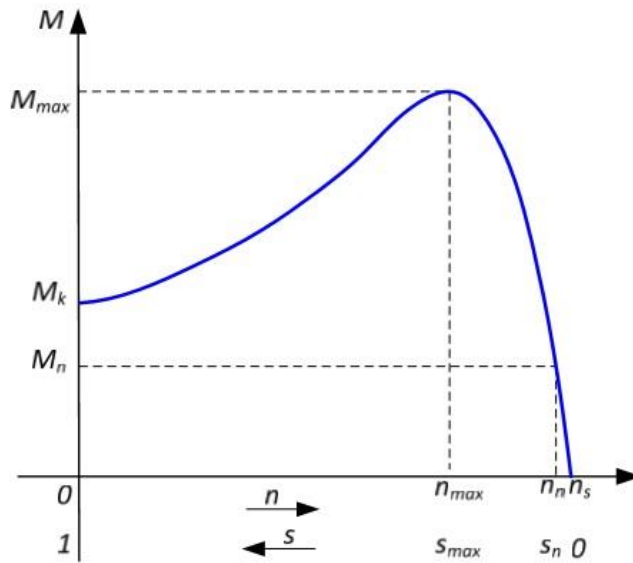
Prema slici 2.16 vidljivo je da asinkroni motor ima tri različita područja rada, koja su određena njegovim klizanjem:

Motorski režim rada, $0 < s < 1$ - motor električnu energiju preuzetu iz mreže pretvara u mehaničku energiju na osovini

Generatorski režim rada, $s < 0$ - motor mehaničku energiju pretvara u električnu i šalje je u mrežu

Protustrujno kočenje, $s > 1$ - kinetička energija gibanja mehanizma i energija iz mreže koče motor

Kod odabira motora za pojedini elektromotorni pogon, najbitniji je i većinom se prikazuje motorski dio karakteristike i specifične vrijednosti koje su prikazane na slici 2.17.



Slika 2.17 Najčešći oblik prikazivanja momentne karakteristike motora

Kako je vidljivo iz jednadžbe (2.54) postoji samo jedna vrijednost momenta za svako klizanje uz određeni napon mreže i uz određene primarne i sekundarne impedancije [2]. Moment motora je za bilo koje klizanje proporcionalan kvadratu napona. Prema slici 2.17 motor razvija maksimalni moment pri tzv. prekretnom klizanju. Prekretno klizanje dobiva se iz uvjeta:

$$\frac{dM}{ds} = 0$$

Tako se dobije da je prekretno klizanje jednako:

$$s_{pr} = \pm \frac{\sigma \cdot R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1}^2 + \sigma \cdot X_{\sigma 2}')^2}} \quad (2.56)$$

Predznak (+) u jednadžbi vrijedi za motorsko, a predznak (-) za generatorsko područje krivulje. Ako izraz (2.56) za prekretno klizanje uvrstimo u izraz (2.54) za moment motora, dobivamo izraz za maksimalni ili prekretni moment:

$$M_{max} = \pm \frac{m_2 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_s \cdot \sigma \left[\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1}^2 + \sigma \cdot X_{\sigma 2}')^2} \right]} \quad (2.57)$$

Na početku zaleta motora, kada motor iz stanja mirovanja počinje ubrzavati razvija tzv. potezni moment ili moment kratkog spoja. To je bitan podatak za prosuđivanje pogonskih osobina motora, jer govori koliki moment tereta na osovini motor može savladati kako bi postigao nazivnu brzinu vrtnje. Kod pokretanja motora, prema slici 2.17, vidljivo je da kod mirovanja rotora, odnosno kad je brzina motora jedna nuli, klizanje motora je maksimalno. Tako se za određivanje poteznog momenta u izraz (2.54) uvijek stavlja da je klizanje jednako jedan.

Za praktične svrhe pokazalo se vrlo prikladnim da se kod prikazivanja momentne krivulje umjesto funkcije $M = f(s)$ koristi funkcija koja prikazuje omjer nazivnog i maksimalnog momenta [2]:

$$\frac{M}{M_{max}} = f(s)$$

Taj omjer poznatiji je kao Kloss-ova jednadžba i u potpunom obliku glasi:

$$\frac{M}{M_{max}} = \frac{2 + \beta \cdot s_{pr}}{\frac{s}{s_{pr}} + \frac{s_{pr}}{s} + \beta \cdot s_{pr}}, \quad (2.58)$$

gdje je:

$$\beta = \frac{2 \cdot R_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + \sigma \cdot X'_{\sigma 2})^2}} \quad (2.59)$$

Kod malih klizanja moment motora proporcionalan je klizanju. Ako se izrazu (2.58) pojednostavni, odnosno ako se zanemari član $\beta \cdot s_{pr}$ radi svoje relativno male vrijednosti dobiva se [2]:

$$\frac{M}{M_{max}} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_{pr}} + \frac{s_{pr}}{s}} \quad (2.60)$$

Izraz (2.60) predstavlja pojednostavljeni oblik Kloss-ove jednadžbe i koristi se za računanje tamo gdje se ne zahtijeva velika točnost. Ima vrlo veliku primjenu jer omogućuje proračun linije momenta motora uz vrlo malo podataka o motoru. Iako smanjene točnosti, još uvijek udovoljava velikoj većini tehničkih proračuna momenta asinkronog stroja.

3. Matematički model stroja

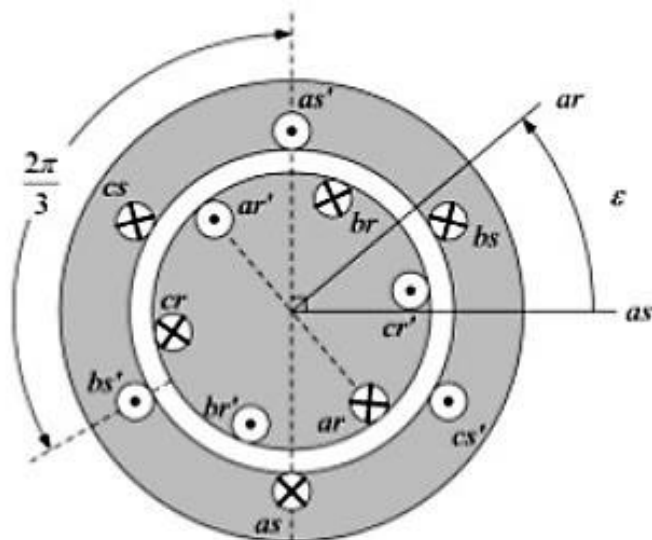
Za analizu i razumijevanje električnih strojeva, pa tako i asinkronog motora, od izuzetne je važnosti tzv. dvoosna teorija električnih strojeva, odnosno dvofazni sustav. Radi se o tome da se, bez obzira na broj faza, jednačbe višefaznog simetričnog stroja uvijek mogu svesti na ekvivalentni dvofazni sustav na statoru i rotoru. Pritom fizikalna svojstva motora ostaju ne promijenjena. Odgovarajućom transformacijom varijabli dvofaznog modela stroja uvodi se jedinstveni koordinatni sustav za varijable statora i rotora. Transformacijom se svi namoti stroja, od kojih su neki stvarni a neki mogu biti fiktivni, smještaju u dvije međusobno okomite osi, tzv. d-q koordinatnog sustava. Detaljniji postupak izvođenja općeg modela električnog stroja, transformacije koordinata, dvoosne teorije električnih strojeva i izvođenja matematičkog modela asinkronog motora opisan je u [6].

3.1. Matematički model asinkronog motora

Najprije se trebaju definirati jednačbe trofaznog stroja koje prikazuju stvarnu fizikalnu sliku asinkronog motora. Kod izrade matematičkog modela asinkronog stroja uvode se određene pretpostavke i zanemarenja, koja su uobičajena u analizi električnih strojeva [6]:

- Stator stroja čine tri fazna namota spojena u zvijezdu, fazni namoti međusobno su identični i prostorno pomaknuti za 120° , te sinusno raspodijeljeni
- Rotor stroja čine tri fazna kratko spojena namota, koji su međusobno identični i prostorno pomaknuti za 120° , te sinusno raspodijeljeni
- Utjecaj magnetskog zasićenja, vrtložnih struja i gubici u željezu se zanemaruju
- Utjecaj potiskivanja struje u štapovima rotora se zanemaruje
- Viši harmonici protjecanja se ne razmatraju, tj. raspodjela protjecanja je sinusna

Matematički model asinkronog motora izvodi se na temelju razmatranja opće ili idealizirane izvedbe izmjeničnog trofaznog stroja čiji je presjek prikazan na slici 3.1.



Slika 3.1 Poprečni presjek idealizirane izvedbe asinkronog motora

Naponske jednačbe za pojedine faze statora glase:

$$u_{as} = R_s \cdot i_{as} + \frac{d\psi_{as}}{dt} \quad (3.1)$$

$$u_{bs} = R_s \cdot i_{bs} + \frac{d\psi_{bs}}{dt} \quad (3.2)$$

$$u_{cs} = R_s \cdot i_{cs} + \frac{d\psi_{cs}}{dt} \quad (3.3)$$

gdje su:

u_{as}, u_{bs}, u_{cs} – trenutni statorski naponi

i_{as}, i_{bs}, i_{cs} – trenutne statorske struje

$\psi_{as}, \psi_{bs}, \psi_{cs}$ – ulančeni tokovi statora koje stvaraju struje pojedinih faza.

Naponske jednačbe za pojedine faze rotora glase:

$$u_{ar} = R_r \cdot i_{ar} + \frac{d\psi_{ar}}{dt} = 0 \quad (3.4)$$

$$u_{br} = R_r \cdot i_{br} + \frac{d\psi_{br}}{dt} = 0 \quad (3.5)$$

$$u_{cr} = R_r \cdot i_{cr} + \frac{d\psi_{cr}}{dt} = 0 \quad (3.6)$$

gdje su:

u_{ar}, u_{br}, u_{cr} – trenutni rotorski naponi koji su zbog kavezne izvedbe rotora, tj. kratko spojenih namota jednaki nuli

i_{ar}, i_{br}, i_{cr} – trenutne rotorske struje

$\psi_{ar}, \psi_{br}, \psi_{cr}$ – ulančeni tokovi rotora koje stvaraju struje pojedinih faza

Zbog pretpostavke simetričnosti stroja po fazama u jednadžbama (3.1) - (3.8) za otpore pojedine faze statora vrijedi:

$$R_s = R_{as} = R_{bs} = R_{cs}.$$

Isto vrijedi i za otpor pojedine faze rotora:

$$R_r = R_{ar} = R_{br} = R_{cr}.$$

Naponske jednadžbe statora i rotora (3.1) – (3.6) mogu se zapisati i u skraćenom matričnom obliku:

$$\mathbf{u}_{abcs} = \mathbf{R}_s \cdot \mathbf{i}_{abcs} + \frac{d\psi_{abcs}}{dt} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{u}_{abcr} = \mathbf{R}_r \cdot \mathbf{i}_{abcr} + \frac{d\psi_{abcr}}{dt} \quad (3.8)$$

gdje su:

$\mathbf{R}_s, \mathbf{R}_r$ – matrice otpora statora i rotora

$\mathbf{i}_{abcs}, \mathbf{i}_{abcr}$ – jedinične matrice trećeg reda struja statora i rotora

Elemente vektora varijabli u gornjim jednadžbama čine trenutačne vrijednosti faznih veličina. Tako se za vektor struje statora može napisati[6]:

$$\mathbf{i}_{abcs} = [i_{as} i_{bs} i_{cs}]^T$$

Zbog simetričnosti trofaznog namota statora i rotora te pretpostavke da je zračni raspored rotora konstantan, vrijedi da su samoindukcije namota jednake. Samoindukcija namota uključuje rasipni induktivitet od rasipnog toka i induktivitet od glavnog toka.

$$l_s = L_{\sigma s} + l_m .$$

Matrica induktiviteta statora nakon uvrštavanja vrijednosti ima strukturu:

$$\mathbf{L}_{abcs} = \begin{bmatrix} L_{\sigma s} + l_{ms} & -\frac{1}{2}l_{ms} & -\frac{1}{2}l_{ms} \\ -\frac{1}{2}l_{ms} & L_{\sigma s} + l_{ms} & -\frac{1}{2}l_{ms} \\ -\frac{1}{2}l_{ms} & -\frac{1}{2}l_{ms} & L_{\sigma s} + l_{ms} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

gdje je:

$L_{\sigma s}$ – rasipni induktivitet jedne faze koji pripada rasipnom magnetskom polju statora
odnosno rotora i ne sudjeluje u elektromehaničkoj pretvorbi energije

l_{ms} – glavni induktivitet jedne faze statora

Kako su trofazni namoti statora i rotora simetrični, struktura matrice induktiviteta rotora je identična matrici 3.9:

$$\mathbf{L}_{abcr} = \begin{bmatrix} L_{\sigma r} + l_{mr} & -\frac{1}{2}l_{mr} & -\frac{1}{2}l_{mr} \\ -\frac{1}{2}l_{mr} & L_{\sigma r} + l_{mr} & -\frac{1}{2}l_{mr} \\ -\frac{1}{2}l_{mr} & -\frac{1}{2}l_{mr} & L_{\sigma r} + l_{mr} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Članovi submatrice induktiviteta u (3.9) i (3.10) proporcionalni su kosinusu kuta među osima odnosnih namota. Zbog simetrije koja vlada među faznim namotima na statoru i rotoru, te uzimajući u obzir konstantni zračni raspored, vrijedi[6]:

$$L_{asar} = L_{bsbr} = L_{cscr}$$

Prema slici 3.1 može se napisati:

$$L_{asar} = l_{sr} \cos \varepsilon \quad (3.11)$$

gdje je:

l_{sr} – međuinuktivitet između faze statora i rotora kada im se osi poklapaju

Također vrijedi:

$$L_{asbr} = L_{bscr} = L_{csar} \text{ i } L_{ascr} = L_{bsar} = L_{csbr}$$

gdje oznake induktiviteta koje pripadaju glavnom magnetskom krugu imaju dvostruke indekse. Prvi indeks odnosi se na namot koji ulančuje magnetski tok, a drugi na namot koji tok stvara, tj. uzbuđuje[6]. Na temelju slike 3.1 za navedene međuinuktivitete vrijedi:

$$L_{asbr} = l_{sr} \cos\left(\varepsilon + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.12)$$

$$L_{ascr} = l_{sr} \cos\left(\varepsilon - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.13)$$

Prema definiranim elementima (3.11) – (3.13) submatrica međuinuktiviteta glasi:

$$\mathbf{L}_{abcsr} = l_{sr} \begin{bmatrix} \cos \varepsilon & \cos\left(\varepsilon + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\varepsilon - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\varepsilon - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \varepsilon & \cos\left(\varepsilon + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\varepsilon + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\varepsilon - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \varepsilon \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

Na temelju matrica induktiviteta statora i rotora, te matrice međuinuktiviteta između statora i rotora mogu se zapisati jednadžbe za ulančane tokove namota statora i rotora:

$$\boldsymbol{\psi}_{abcs} = \mathbf{L}_{abcs} \mathbf{i}_{abcs} + \mathbf{L}_{abcsr} \mathbf{i}_{abcr} \quad (3.15)$$

$$\boldsymbol{\psi}_{abcr} = (\mathbf{L}_{abcsr})^T \mathbf{i}_{abcs} + \mathbf{L}_{abcr} \mathbf{i}_{abcr} \quad (3.16)$$

gdje su:

$\mathbf{L}_{abcs}, \mathbf{L}_{abcr}$ – submatrice induktiviteta statora i rotora

$(\mathbf{L}_{abcsr})^T$ – transponirana submatrica međuinuktiviteta

Jednadžbe (3.1) – (3.6) zajedno s jednadžbama (3.15) i (3.16) čine osam jednadžbi s kojima je opisan električni dio asinkronog motora.

Da bi matematički model asinkronog motora bio potpun, osim prethodno izvedenih jednažbi koje opisuju elektromagnetske veličine u stroju, u obzir se mora uzeti i mehaničko vladanje stroja. Mehanička jednažba stroja, odnosno jednažba gibanja dana je slijedećim izrazom:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M_e - M_t \quad (3.17)$$

gdje je:

J – moment inercije na rotoru motora,

ω_m – kutna brzina rotora,

M_e – elektromagnetski moment motora,

M_t – moment tereta.

Ovakav opći model asinkronog motora nije pogodan za praktičnu analizu. Razlog tome je što u jednažbama kojima je opisan opći model, većina članova matrice induktiviteta je ovisna o kutu zakreta rotora, što je opet nužan uvjet za elektromehaničku pretvorbu.

Primjenom prikladne zamjene, odnosno transformacije rotorskih varijabli ta ovisnost se može ukloniti.

3.2. Transformacija trofaznih varijabli

Izvođenje jednažbi transformacija trofaznih varijabli trofaznog abc sustava u dvofazni dq sustav razmatra se uz pretpostavku da su ti sustavi međusobno nepomični, što je detaljno opisano u [6]. Zbog općenitosti neka oba sustava rotiraju proizvoljnom brzinom ω_k kao na slici 3.1. Za rezultirajući vektor izražen pomoću dvofaznih i trofaznih varijabli vrijedi zapis:

$$\bar{f}^k = f_d^k + j f_q^k = \frac{2}{3} (f_a^k + \bar{a} f_b^k + \bar{a}^2 f_c^k) \quad (3.18)$$

gdje su:

\bar{a}, \bar{a}^2 – kompleksni operatori koji imaju značenje jediničnih vektora u smjeru osi b i c .

Izjednačavanjem realnih i imaginarnih dijelova na lijevoj i desnoj strani (3.18) dobiva se veza između dvofaznih i trofaznih varijabli:

$$f_d^k = \frac{2}{3} [f_a^k - \frac{1}{2} (f_b^k + f_c^k)] \quad (3.19)$$

$$f_q^k = \frac{1}{\sqrt{3}} (f_b^k - f_c^k) \quad (3.20)$$

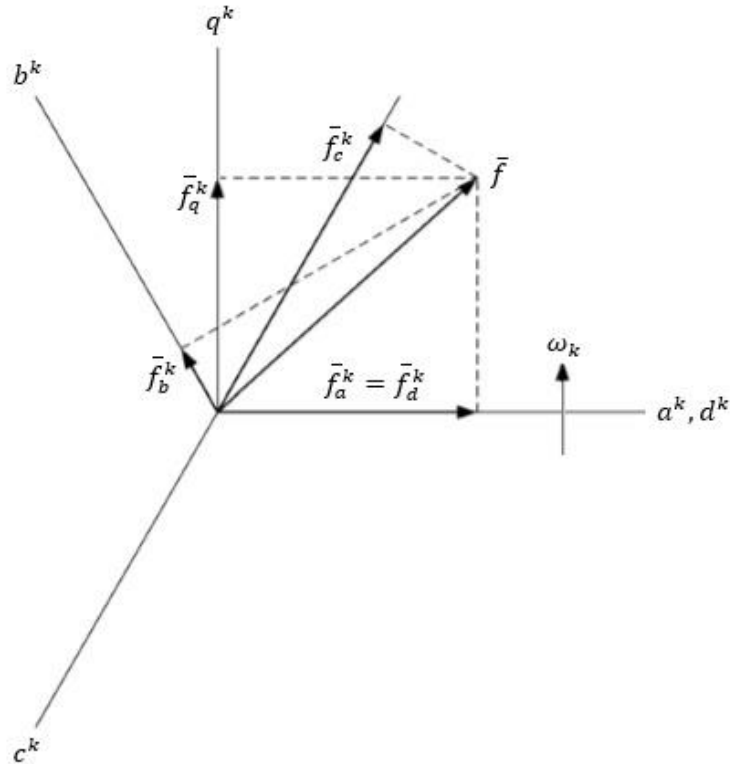
Ako je zadovoljen uvjet:

$$f_a = f_b = f_c = 0 \quad (3.21)$$

dvofazne varijable u cijelosti opisuju izvorni trofazni sustav. Kako bi se zadovoljio taj uvjet, i u transformiranim koordinatama uvodi se treća, tzv. nulta varijabla koja glasi:

$$f_0 = \frac{1}{3} (f_a^k + f_b^k + f_c^k) \quad (3.22)$$

Kako se trofazni asinkroni motor na mrežu većinom spaja bez nulvodiča u daljnjem razmatranju uzima se da je nulta varijabla jednaka nuli, odnosno zanemaruje se treći red u izrazu (3.24).



Slika 3.2 Razlaganje rezultirajućeg vektora na komponente u dvofaznom i trofaznom sustavu

Na temelju prethodnih relacija mogu se izvesti opće jednadžbe transformacije trofaznih varijabli koje povezuju abc i $dq0$ varijable kada su brzine vrtnje koordinatnih sustava različite. Ako trofazni abc sustav rotira nekom kutnom brzinom, a dq sustav nekom različitom kutnom brzinom, veza među varijablama može se izraziti matričnom jednadžbom:

$$\mathbf{f}_{dq0}^y = {}^x \mathbf{K}^y \mathbf{f}_{abc}^x \quad (3.23)$$

gdje je:

${}^x \mathbf{K}^y$ – opća matrica transformacije

x, y – indeksi koji označavaju različite kutne brzine kojima rotiraju trofazni abc sustav i dvofazni $dq0$ sustav, $\omega_x \neq \omega_y$

$${}^x K^y = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\vartheta_y - \vartheta_x) & \cos\left(\vartheta_y - \vartheta_x - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\vartheta_y - \vartheta_x + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\vartheta_y - \vartheta_x) & -\sin\left(\vartheta_y - \vartheta_x - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\vartheta_y - \vartheta_x + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

S obzirom na praktičnu važnost mogu se izdvojiti dva slučaja:

1. $\vartheta_x = 0$, $\vartheta_y = \vartheta_k$ – transformacija trofaznih statorskih (mirujućih) varijabli u dq koordinatni sustav koji rotira proizvoljnom kutnom brzinom ω_k (proizvoljni koordinatni sustav) – oznaka matrice je \mathbf{K}_s

$$\mathbf{K}_s = {}^x \mathbf{K}^y(0, \vartheta_k) \quad (3.25)$$

2. $\vartheta_x = \vartheta$, $\vartheta_y = \vartheta_k$ – transformacija trofaznih rotorskih varijabli u proizvoljni koordinatni sustav – oznaka matrice \mathbf{K}_r

$$\mathbf{K}_r = {}^x \mathbf{K}^y(\vartheta, \vartheta_k) \quad (3.26)$$

Nakon uvrštavanja vrijednosti matrica (3.25) glasi:

$$\mathbf{K}_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \vartheta_k & \cos\left(\vartheta_k - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\vartheta_k + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \vartheta_k & -\sin\left(\vartheta_k - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\vartheta_k + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Matrica (3.27) u literaturi je poznata kao opća matrica transformacije varijabli mirujućeg trofaznog strujnog kruga. Bilo koja realna transformacija trofaznih statorskih varijabli izvodi se iz matrice (3.25), jednostavno izborom kutne brzine $dq0$ sustava. U analizi električnih strojeva najčešće se koriste statorski ($\omega_k = 0$), rotorski ($\omega_k = \omega$) i sinkroni koordinatni sustav ($\omega_k = \omega_e$). Jednakim postupkom izbora brzine vrtnje koordinatnog sustava, iz matrice \mathbf{K}_r mogu se izvesti sve potrebne transformacije trofaznih rotorskih varijabli [6].

3.3. Normiranje jednadžbi dvoosnog modela

U sustavu diferencijalnih jednadžbi (3.38) i (3.39) kojima je opisan prošireni matematičku model motora sve veličine dane su jediničnim vrijednostima. Radi pojednostavljenja u jednadžbama proširenog modela su zanemarene nulte varijable, što je opisano u poglavlju 3.2..

Za ulančane tokove statora i rotora u dvoosnom sustavu može se napisati:

$$\begin{aligned}\frac{d\psi_{ds}}{dt} &= u_{ds} - \frac{1}{T_s} \psi_{ds} + \frac{k_r}{T_s} \psi_{dr} + \omega_k \psi_{qs} \\ \frac{d\psi_{qs}}{dt} &= u_{qs} - \frac{1}{T_s} \psi_{qs} + \frac{k_r}{T_s} \psi_{qr} - \omega_k \psi_{ds} \\ \frac{d\psi_{dr}}{dt} &= \frac{k_s}{T_r} \psi_{ds} - \frac{1}{T_r} \psi_{dr} + (\omega_k - \omega) \psi_{qr} \\ \frac{d\psi_{qr}}{dt} &= \frac{k_s}{T_r} \psi_{qs} - \frac{1}{T_r} \psi_{qr} - (\omega_k - \omega) \psi_{dr},\end{aligned}\tag{3.38}$$

dok jednadžba gibanja glasi:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H} \frac{k_s}{L_r} (\psi_{qs} \psi_{dr} - \psi_{ds} \psi_{qr}) - \frac{M_T}{2H} .\tag{3.39}$$

gdje konstanta tromosti iznosi:

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \cdot \omega_B^2}{p \cdot M_B} .\tag{3.40}$$

Elektromagnetski moment u sustavu jediničnih vrijednosti glasi:

$$M_e = \psi_{ds} \cdot i_{qs} - \psi_{qs} \cdot i_{ds}\tag{3.41}$$

Vidljivo je kako se u izrazu (3.41) u odnosi na (3.36) gubi faktor koji označava broj pari polova stroja.

Primjenom opće matrice transformacije (3.27) na jednadžbu faznog napona statora (3.7) dobiva se napon statora u proizvoljnom koordinatnom sustavu:

$$\mathbf{u}_{dqS} = \mathbf{K}_s \cdot \mathbf{u}_{abcS} \quad (3.42)$$

Implementirani model nalazi se u dvoosnom koordinatnom sustavu koji se vrti proizvoljnom brzinom i za neko vrijeme zakrene se za određeni kut:

$$\frac{d\theta_k}{dt} = \omega_k \quad (3.43)$$

Kako bi se odredile prijelazne vremenske konstante najprije je potrebno odrediti ukupni induktivitet statora i rotora i njihove koeficijente rasipanja. Uz poznavanje parametara stroja dobiva se:

$$L_s = L_m + L_{\sigma s} \quad (3.44)$$

$$L_r = L_m + L_{\sigma r} \quad (3.45)$$

$$k_s = \frac{L_m}{L_m + L_s} \quad (3.46)$$

$$k_r = \frac{L_m}{L_m + L_r} \quad (3.47)$$

Faktor ulančenja između magnetskih tokova statora i rotora iznosi:

$$\sigma = 1 - k_r \cdot k_s \quad (3.48)$$

Prijelazni induktivitet statora i rotora glase:

$$L_s' = \sigma \cdot L_s \quad (3.49)$$

$$L_r' = \sigma \cdot L_r \quad (3.50)$$

Prijelazne vremenske konstante statora i rotora iznose:

$$T_s' = \frac{L_s'}{R_s} \quad (3.51)$$

$$T_r' = \frac{L_r'}{R_r} \quad (3.52)$$

4. Određivanje parametara nadomjesne sheme kaveznog AM

Kako bi dobili parametre nadomjesne mreže asinkronog motora prikazane na slici 2.11 koji su neophodni kako za daljnju analizu motora tako i za računalnu simulaciju, potrebno je izvršiti pokuse praznog hoda i kratkog spoja koji su opisani u poglavlju 2.4..

Navedeni pokusi izvršeni su u laboratoriju za elektromotorne pogone Sveučilišta Sjever. Podaci natpisne pločice ispitivanog kaveznog asinkronog motora nalaze se u tablici 4.1.

4.1. Podaci motora i mjerne opreme

Podaci natpisne pločice ispitivanog kaveznog asinkronog motora nalaze se u tablici 4.1. Dodatni podaci ispitivanog motora koji se ne nalaze na natpisnoj pločici uzeti su iz podatkovnog lista motora koji daje proizvođača Siemens, prilog 1.

Proizvođač	SIEMENS
Nazivni napon	230/400 V Δ/Y , 50Hz
Nazivna struja	4.4/2.55 A
Nazivna snaga	1.1 kW
Faktor snage	$\cos \varphi = 0.81$
Nazivna brzina vrtnje	1415 o/min
Stupanj zaštite	IP 55
Veličina	90S
Oblik kućišta	IM B3

Tablica 4.1 Podaci natpisne pločice kaveznog asinkronog motora

Kao mjerna oprema korištena u ispitivanju kaveznog asinkronog motora korišteni su:

- *Trofazni mjerni transformator ugrađen u radni stol laboratorija:*

ISKRA 0 – 450V , korišten kao izvor izmjeničnog napona

- *Ampermetar:*

Korišten multimetar marke FLUKE, $\pm(1.5\% + 3 \text{ znamenke})$ točnosti odabirom strujnog mjernog područja, osjetljivost 0.01 mA

- *Voltmetar:*

Korišten je multimeter marke FLUKE, $\pm(1\% + 3 \text{ znamenke})$ točnosti odabirom naponskog mjernog područja, osjetljivost 0.1 mV

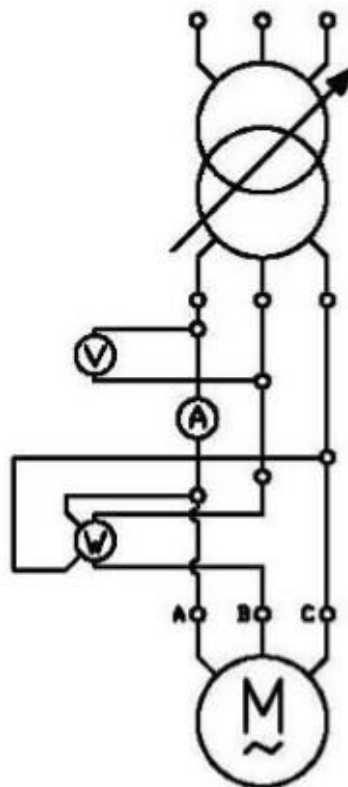
- *Watmetar:*

Korišten je elektrodinamski watmetar model HEWa-b marke GANZ, $\cos\varphi = 1$, klasa 1

4.2. Vrijednosti dobivene pokusom praznog hoda

Postupak ispitivanja asinkronog motora izvodi se na način kako je opisano ranije u poglavlju 2.4.1 i literaturi [3].

Nakon spajanja motora i potrebne mjerne opreme prema slici 4.1, na stezaljke motora dovede se napon približno jednak 1.15 nazivnog napona motora. Nakon toga dovedeni napon postepeno se smanjuje pomoću mjernog transformatora preko kojeg je motor spojen na mrežu. Napon se smanjuje približno do 0.25 nazivnog napona. Paralelno sa smanjivanjem napona na instrumentima se očitava struja praznog hoda i snagu koju motor uzima uzima iz mreže.



Slika 4.1 Shema spoja ispitivanja asinkronog kaveznog motora u praznom hodu

Kako bi se izračunali gubici namotaja statora u praznom hodu potrebno je izmjeriti otpor statorskog namota. U ovom slučaju, otpor je mjereno odmah nakon izvođenja pokusa praznog hoda kad su namoti još topli, odnosno najsličniji onima tijekom trajanja pokusa.

Izmjereni otpor između stezaljki motora iznosi:

$$R_{ST} = 15,9 \Omega$$

Ovisno o vrsti spoja motora u priključnoj kutiji kao na slici 2.4, otpor jedne faze izračunava se prema jednadžbama (2.25) i (2.26).

U ovom slučaju motor je spojen u zvijezdu i otpor faze statora iznosi:

$$R_s = 7,95 \Omega$$

Vrijednosti dobivene za pokus praznog hoda asinkronog kaveznog motora nalaze se u tablici 4.2.

Redni br. mjerjenja	Izmjerene vrijednosti			Proračunate vrijednosti nadomjesne sheme praznog hoda						
	U ₀ [A]	I ₀ [A]	P ₀ [W]	cos φ ₀	P _{Cu0} [W]	P' ₀ [W]	Z ₀ [Ω]	(R _{fe}) R ₀ [Ω]	X _m [Ω]	L _m [H]
1.	450	3,34	383	0,1471	266,1	116,9	77,79	528,72	78,64	0,250
2.	420	2,37	245	0,1421	134,0	111,0	102,32	720,00	103,36	0,329
3.	400	1,96	194	0,1429	91,6	102,4	117,83	824,74	119,05	0,379
4.	380	1,64	170	0,1575	64,1	105,9	133,78	849,41	135,47	0,431
5.	350	1,31	136	0,1713	40,9	95,1	154,25	900,74	156,57	0,498
6.	320	1,12	116	0,1869	29,9	86,1	164,96	882,76	167,91	0,534
7.	300	1,04	105	0,1943	25,8	79,2	166,54	857,14	169,78	0,540
8.	270	0,92	85	0,1976	20,2	64,8	169,44	857,65	172,85	0,550
9.	240	0,78	70	0,2159	14,5	55,5	177,65	822,86	181,94	0,579
10.	210	0,69	63	0,2510	11,4	51,6	175,72	700,00	181,53	0,578
11.	180	0,57	53	0,2982	7,7	45,3	182,32	611,32	191,01	0,608
12.	150	0,48	46	0,3689	5,5	40,5	180,42	489,13	194,11	0,618
13.	110	0,38	32	0,4420	3,4	28,6	167,13	378,13	186,31	0,593
14.	70	0,32	29	0,7475	2,4	26,6	126,30	168,97	190,12	0,605

Tablica 4.2 Izmjerene i izračunate vrijednosti za pokus praznog hoda

Za izračunavanje vrijednosti korištene su slijedeći izrazi [2], [4]:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_0 \cdot I_0} \quad (4.1)$$

$$P_{Cu0} = 1,5 R_{ST} \cdot I_0^2 \quad (4.2)$$

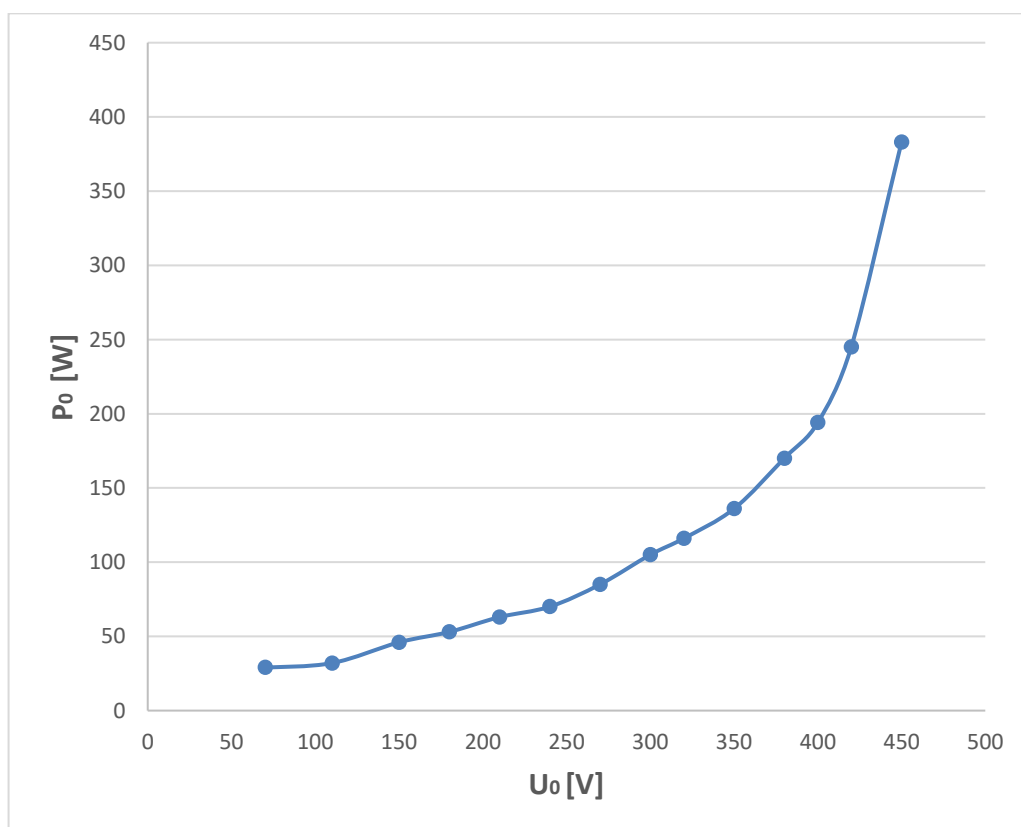
$$Z_0 = \frac{U_0}{\sqrt{3} \cdot I_0} \quad (4.3)$$

$$R_0 = \frac{Z_0}{\cos \varphi_0} \quad (4.4)$$

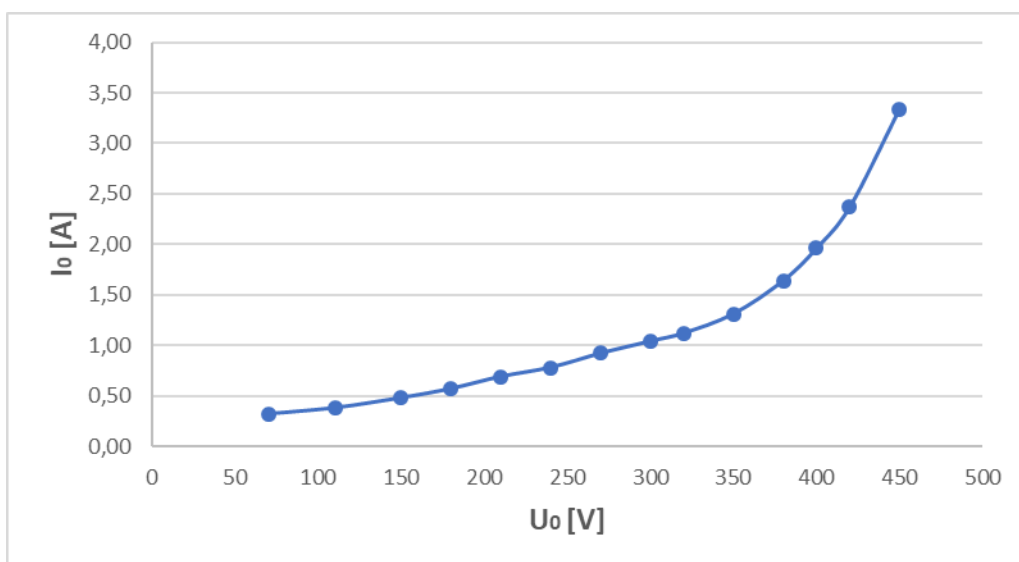
$$X_m = \frac{Z_0}{\sin \varphi_0} \quad (4.5)$$

$$L_m = \frac{X_m}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (4.6)$$

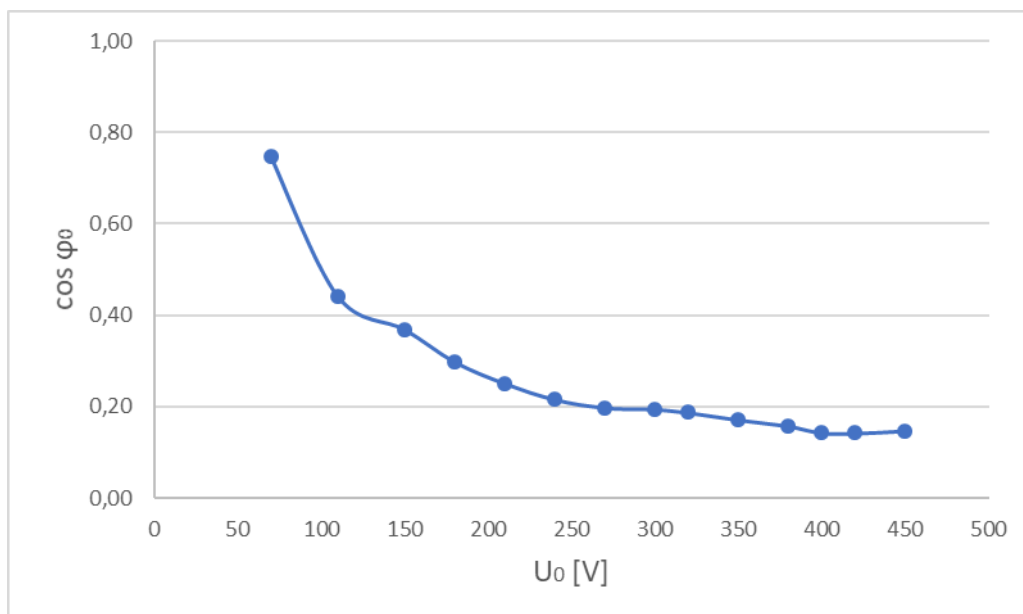
Na temelju izmjerenih i izračunatih podataka iz tablice 4.2 mogu se grafički prikazati međusobne ovisnosti između pojedinih veličina koje su karakteristične za pokus praznog hoda asinkronog motora. Slijedeće karakteristike dobivene su obradom podataka u programu Excel.



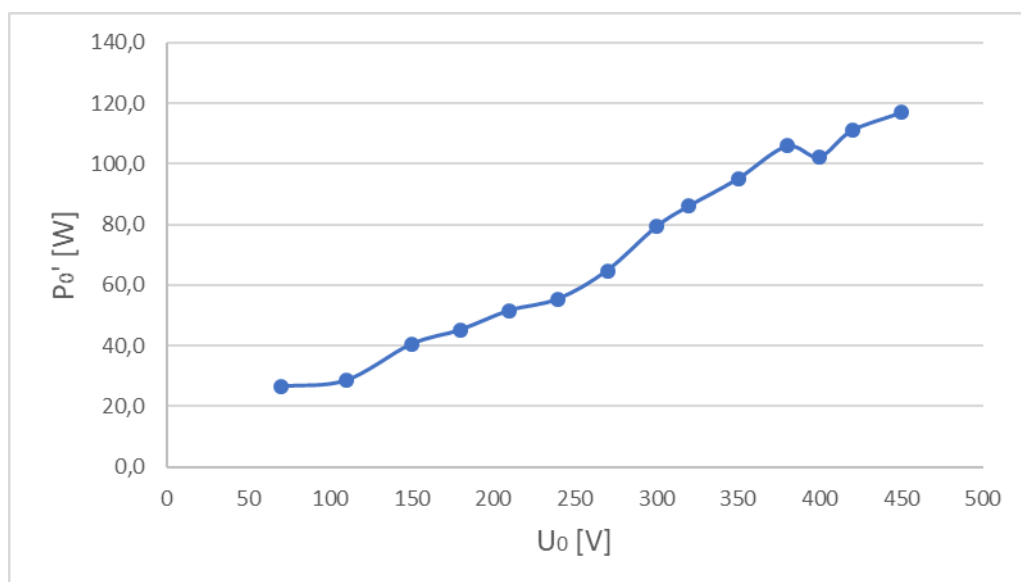
Slika 4.2 Ovisnost gubitaka praznog hoda o naponu



Slika 4.3 Ovisnost struje praznog hoda o naponu



Slika 4.4 Ovisnost faktora snage o naponu



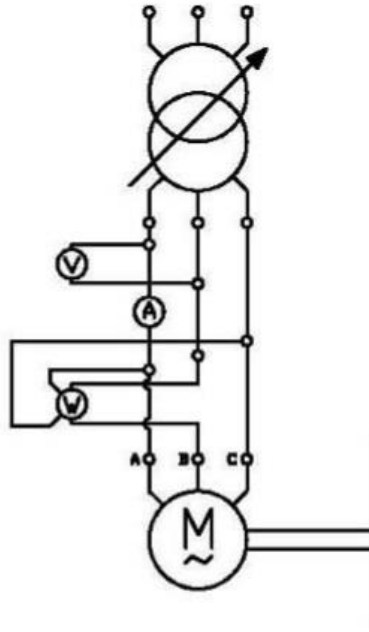
Slika 4.5 Ovisnost užih gubitaka o naponu

Ekstrapolacijom krivulje na slici 4.5 prema ordinatnoj osi dobivaju se gubici trenja i ventilacije koji približno iznose 26 W.

4.3. Vrijednosti dobivene pokusom kratkog spoja

Pokus kratkog spoja i način izvođenja detaljnije je objašnjen ranije u poglavlju 2.4.2. i literaturi [3].

Rotor se mehaničkom polugom zakoči, a na stator se dovede napon koji kod strojeva malih snaga kao što je slučaj u ovom ispitivanju iznosi otprilike 30 do 100% nazivnog napona. Statorski namot spojen je u zvijezdu isto kao i kod pokusa praznog hoda. To je posebno važno kod pokusa kratkog spoja jer time se napon namota smanjuje u omjeru $1/\sqrt{3}$.



Slika 4.6 Shema spoja ispitivanja asinkronog kaveznog motora u kratkom spoju

Isto kao i nakon pokusa praznog hoda izmjeren je otpor između stezaljki motora koji iznosi:

$$R_{ST} = 17,2 \Omega$$

Namoti statora također su spojeni u zvijezdu, te se korištenjem izraza (2.25) dobiva vrijednost otpora po fazi statora:

$$R_s = 8,6 \Omega$$

Redni br. mjerjenja	Izmjerene vrijednosti		
	U _k [A]	I _k [A]	P _k [W]
1.	10	0,29	4,6
2.	20	0,58	14,9
3.	40	1,15	61
4.	60	1,71	143
5.	80	2,29	229
6.	100	2,81	399
7.	120	3,41	589
8.	140	4,07	789
9.	160	4,68	987
10.	180	5,46	1242
11.	200	6,50	1764

Tablica 4.3 Izmjerene vrijednosti za pokus kratkog spoja

Redni br. mjerjenja	Proračunate vrijednosti nadomjesne sheme praznog hoda							
	$\cos \varphi_k$	$Z_k [\Omega]$	$R_k [\Omega]$	$X_k [\Omega]$	$R'_2 [\Omega]$	$L_\sigma [H]$	$L_{os}=L_{or} [H]$	$M_k [Nm]$
1.	0,9158	19,91	18,23	8,00	9,63	0,025	0,013	0,015
2.	0,7416	19,91	14,76	13,36	6,16	0,043	0,021	0,040
3.	0,7656	20,08	15,37	12,92	6,77	0,041	0,021	0,171
4.	0,8047	20,26	16,30	12,03	7,70	0,038	0,019	0,430
5.	0,7217	20,17	14,56	13,96	5,96	0,044	0,022	0,597
6.	0,8198	20,55	16,84	11,77	8,24	0,037	0,019	1,243
7.	0,8310	20,32	16,88	11,30	8,28	0,036	0,018	1,840
8.	0,7995	19,86	15,88	11,93	7,28	0,038	0,019	2,302
9.	0,7610	19,74	15,02	12,81	6,42	0,041	0,020	2,686
10.	0,7296	19,03	13,89	13,02	5,29	0,041	0,021	3,010
11.	0,7834	17,76	13,92	11,04	5,32	0,035	0,018	4,290

Tablica 4.4 Izračunate vrijednosti za pokus kratkog spoja

Za izračunavanje vrijednosti u tablici 4.4 korišteni su izrazi (2.32) – (2.38).

Na temelju podataka dobivenih pokusom kratkog spoja mogu se računski odrediti potezni moment i potezna struja.

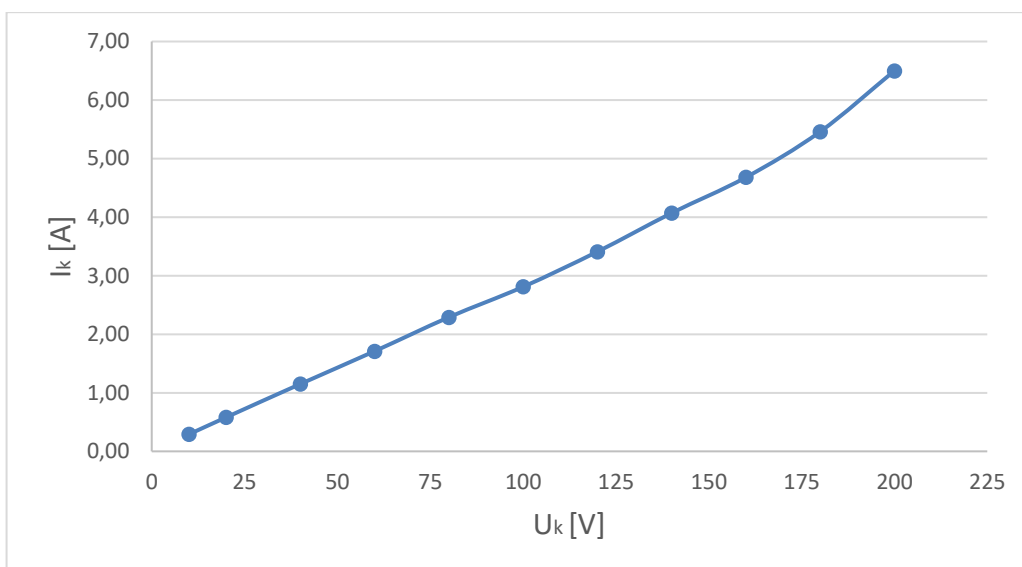
Potezni moment računa se za vrijednosti petog mjerjenja u tablici 4.4 jer je tada struja koja teče namotima statora najbliža nazivnoj struji motora. Prema tome, korištenjem izraza (4.7) i uvrštavanjem vrijednosti dobiva se potezni moment motora.

$$M_k = \left(\frac{U_n}{U_{kmj}} \right)^2 \cdot M_{kmj} = \left(\frac{400}{80} \right)^2 \cdot 0,597 = \mathbf{14,91 [Nm]} \quad (4.7)$$

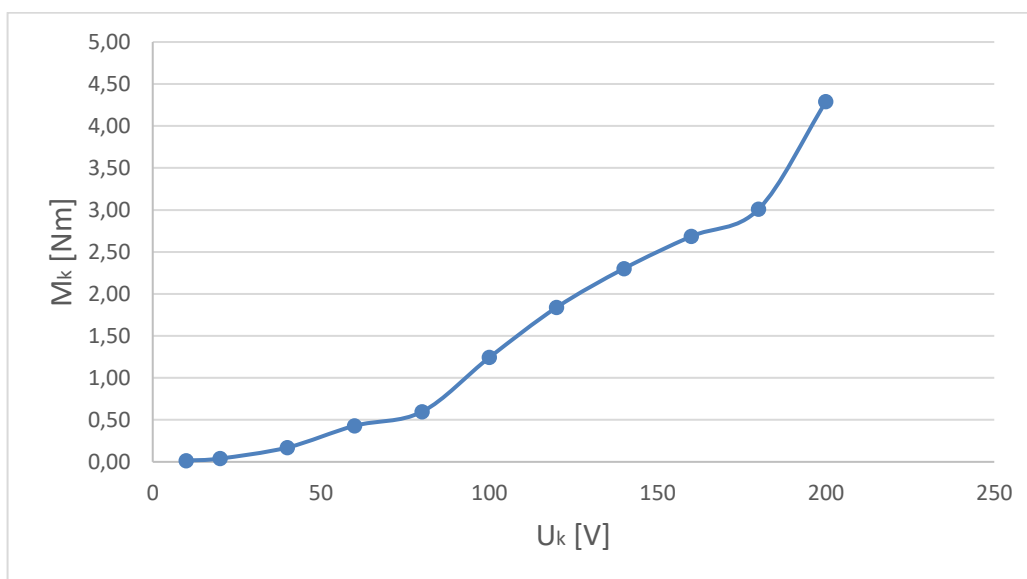
Potezna struja dobije se uvrštavanjem vrijednosti u izraz (4.8).

$$I_k = \frac{U_n}{U_{kmj}} \cdot I_{kmj} = \frac{400}{200} \cdot 6,50 = \mathbf{13 [A]} \quad (4.8)$$

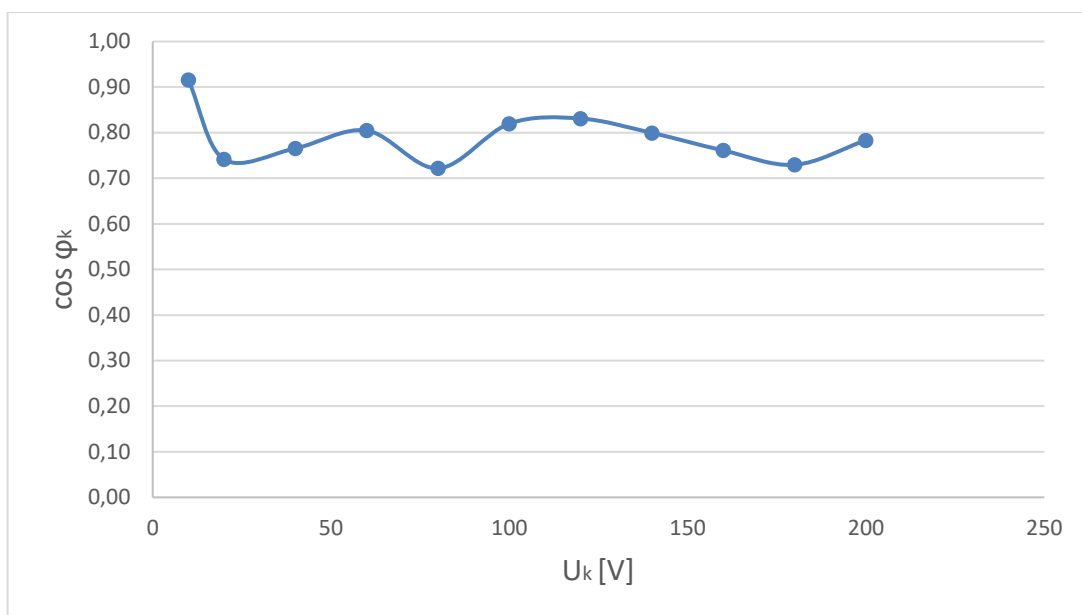
Iz podataka u tablici 4.3 i 4.4 mogu se grafički prikazati međusobne ovisnosti pojedinih veličina koje su karakteristične za kratki spoj. Slijedeće karakteristike dobivene su obradom podataka u programu Excel.



Slika 4.7 Ovisnost struje kratkog spoja o naponu mreže



Slika 4.8 Ovisnost poteznog momenta o naponu mreže



Slika 4.9 Ovisnost faktora snage o naponu mreže

4.4. Proračun statičke momentne karakteristika

Momentna karakteristika asinkronog motora opisana je u poglavlju 2.6. Prema slici 2.17 vidljivo je kako statička karakteristika momenta ima tri karakteristične vrijednosti što je opisano u samom poglavlju. Statička karakteristika momenta prikazana na slici 2.17 dobiva se uvrštavanjem vrijednosti parametara nadomjesne sheme u izraz 2.54.

Potezni moment motora je vrijednost momenta u trenutku pokretanja motora kad je brzina motora jednaka nuli, odnosno kad je maksimalno klizanje motora. Uvrštavanjem vrijednosti parametara nadomjesne sheme dobivenih u poglavlju 4.1. - 4.3. u izraz 2.54 dobiva se

$$M_k = f(s=1) = \frac{p \cdot m}{2 \cdot \pi \cdot f_n} \cdot \frac{U_s^2 \cdot R_r'}{\left[(R_s + \sigma \cdot R_r')^2 + (X_{\sigma s} + \sigma \cdot X'_{\sigma r})^2 \right]} \quad (4.9)$$

$$= \mathbf{14.19 \text{ Nm}}$$

Maksimalni ili prekretni moment motora je vrijednost momenta kod maksimalnog ili prekretnog klizanja koje se dobiva deriviranjem izraza 2.54 po klizanju i izjednačavanjem tog izraza sa nulom. Tako se klizanje pri maksimalnom momentu dobiva uvrštavanjem parametara nadomjesne sheme dobivenih u poglavlju 4.1. – 4.3. u izraz:

$$s_{\max} = \frac{\sigma \cdot R_r'}{\sqrt{R_s^2 + (X_{\sigma} + \sigma \cdot X'_{\sigma})^2}} = \mathbf{0.3795} \quad (4.10)$$

Uvrštavanjem izraza 4.10 u izraz 2.54 dobiva se maksimalni ili prekretni moment motora:

$$M_{\max} = f(s_{\max}) = \frac{p \cdot m}{2 \cdot \pi \cdot f_n} \cdot \frac{U_s^2}{\left[\left(R_s + \sigma \cdot \frac{R_r'}{s_{\max}} \right)^2 + (X_{\sigma} + \sigma \cdot X'_{\sigma})^2 \right]} \cdot \frac{R_r'}{s_{\max}} = \mathbf{18.94 \text{ Nm}} \quad (4.11)$$

Nazivni moment motor razvija pri nazivnoj brzini vrtnje odnosno pri nazivnome klizanju. Iz podataka na natpisnoj pločici motora poznato je da je nazivna brzina motora 1415 o/min. Uz poznate podatke motora, nazivnu frekvenciju i broj pari polova motora koji se nalaze na natpisnoj pločici, prema izrazu 2.3 izračuna se sinkrona brzina motora koja iznosi 1500 o/min. Nazivno klizanje izračunava se prema izrazu 4.12 i iznosi:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \mathbf{0.0567} \quad (4.12)$$

Uz poznato nazivno klizanje i već prije spomenute i izračunate parametre motora dobiva se nazivni moment motora:

$$M_n = f(s_n) = \frac{p \cdot m}{2 \cdot \pi \cdot f_n} \cdot \frac{U_s^2}{\left[\left(R_s + \sigma \cdot \frac{R_r'}{s_n} \right)^2 + (X_{\sigma} + \sigma \cdot X'_{\sigma})^2 \right]} \cdot \frac{R_r'}{s_n} = \mathbf{7.3 \text{ Nm}} \quad (4.13)$$

5. Pokus zaleta kaveznog asinkronog motora u laboratoriju

Pokus zaleta motora u laboratoriju izveden je na motoru s podacima prema tablici 4.1. Dio mjerne opreme opisan je u poglavlju 4.1. a za pokus zaleta korištena je i dodatna oprema:

- *DC motor:*

Korišten je motor marke SIEMENS, model 1GG5102-0EC40-6VV1-Z

- *DC izvor napona*

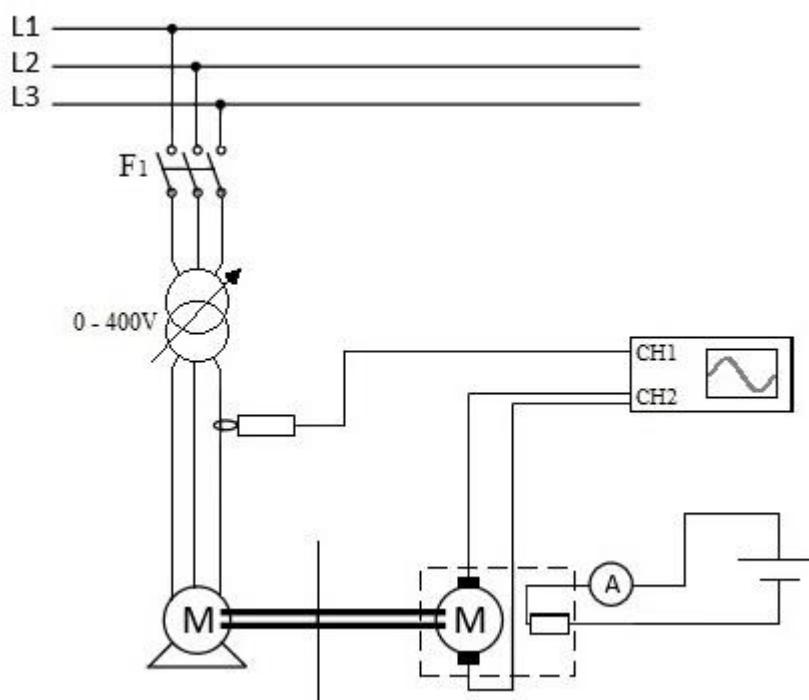
- *Osciloskop:*

Korišten je digitalni osciloskop marke TEKTRONIX, model TDS2014B, propusnost do 100MHz, točnost $\pm 3\%$, 4 kanala

- *Strujna kliješta:*

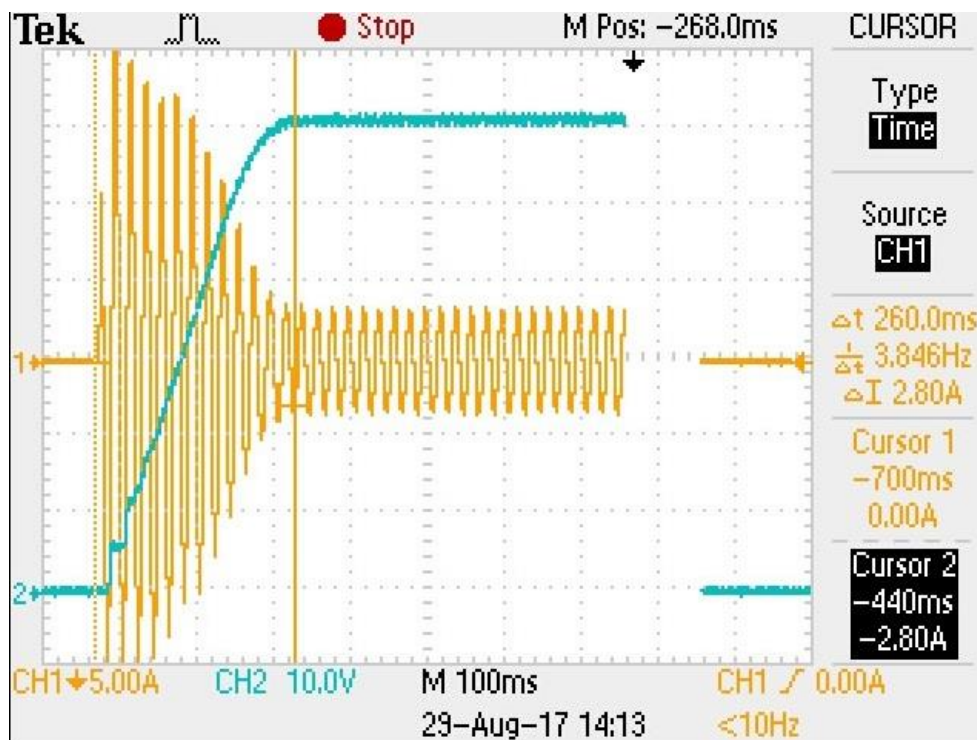
Korištena strujna kliješta marke TEKTRONIX, model A622, Input 100A, Frekvencije do 100 kHz, Izlaz 10m V/A i 100 mV/A

Shema spoja pokusa zaleta asinkronog kaveznog motora prikazana je na slici 5.1.



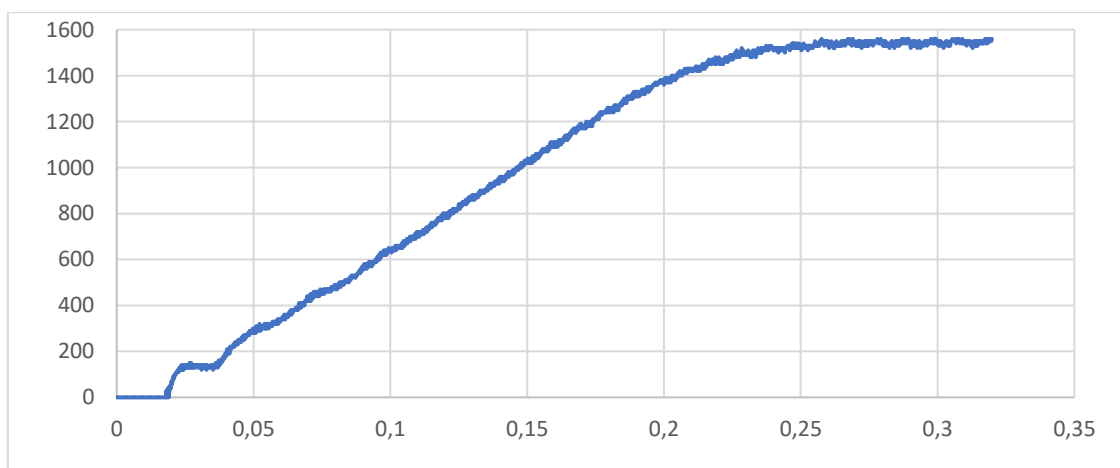
Slika 5.1 Shema spoja pokusa zaleta asinkronog kaveznog motora

Karakteristika zaleta snimana je na osciloskopu pomoću. Snimani su struja i napon na armaturi istosmjernog motora a koji je ekvivalent brzine vrtnje ispitivanog kaveznog asinkronog motora. Snimljeni su zaleti motora pri različitim naponima napajanja, u rasponu od 110V do 230V po fazi.



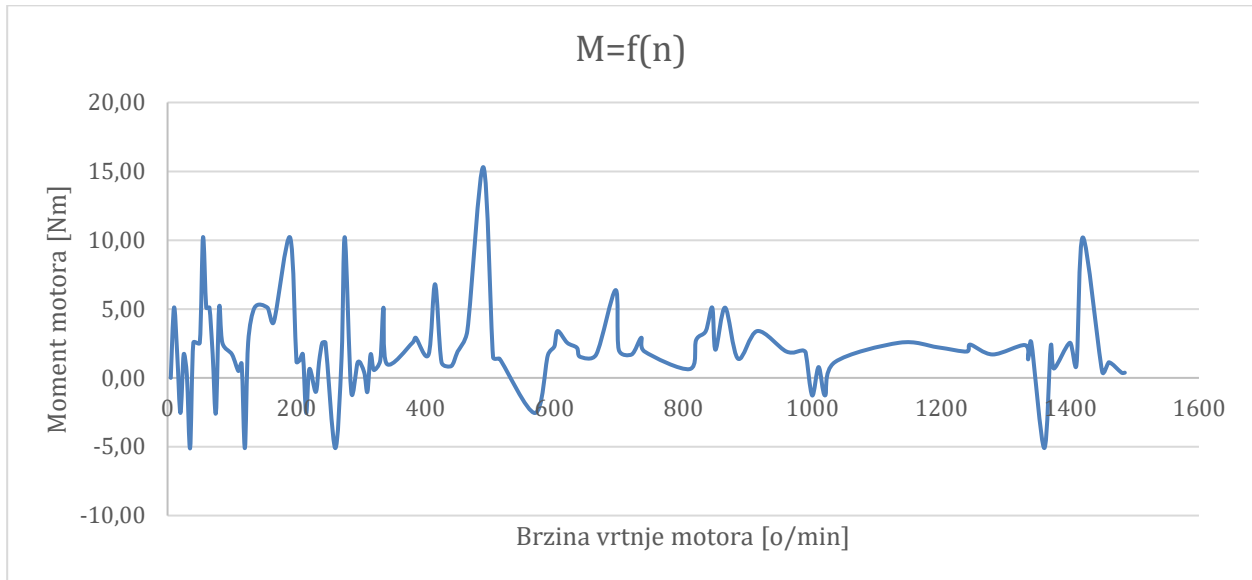
Slika 5.2 Struja i brzina vrtnje motora tijekom pokusa zaleta s nazivnim podacima motora

Iz podataka koji su s osciloskopa spremljeni na računalo u obliku tablice s brojčanim vrijednostima te njihovom obradom dobiva se ovisnost brzine vrtnje o vremenu prema slici 5.3.



Slika 5.3 Ovisnost brzine vrtnje motora o vremenu tijekom pokusa zaleta u laboratoriju

Momentna karakteristika dobije se derivacijom brzine u vremenu prema izrazu 3.17. Zbog tromosti mjerne opreme i šumova u signalu tokom mjerenja iz dobivenih podataka nije se dobila zadovoljavajuća karakteristika momenta motora iz koje bi se mogli točnije procijeniti potezni i maksimalni moment. Slika 5.3 prikazuje karakteristiku dobivenu derivacijom krivulje brzine po vremenu (slika 5.2) i množenjem sa konstantom $J \cdot \frac{\pi}{30} \approx 0.000408$.



Slika 5.4 Karakteristika momenta motora dobivena obradom podataka dobivenih pokusom zaleta motora u laboratoriju

Vrijednost momenta tromosti sustava dobivena je zbrojem svih momenata tromosti koji su u sustavu. U ovom slučaju to su moment tromosti ispitivanog kaveznog motora i istosmjernog motora s nezavisnom uzbudom koji je spojen na njegovu osovinu. Vrijednost za moment tromosti ispitivanog motora očitana je iz kataloga proizvođača koji se nalazi u prilogu. Isto tako je učitana i vrijednost za korišteni istosmjerni motor.

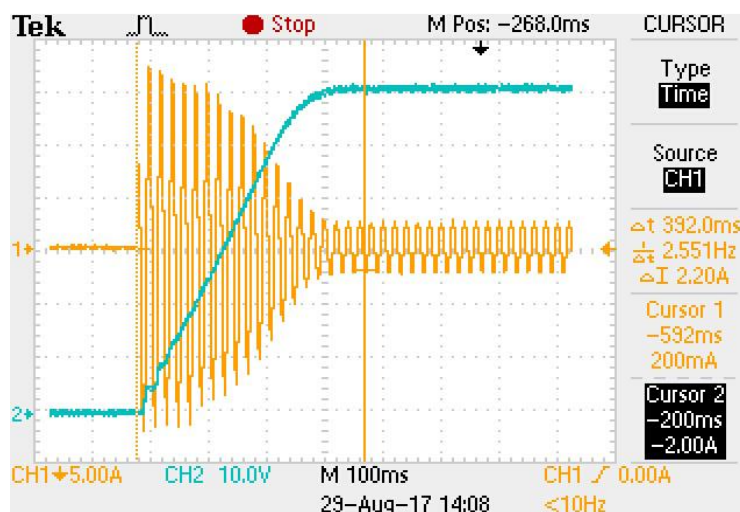
$$J_{AC} = 0.0024 \text{ kgm}^2$$

$$J_{DC} = 0.013 \text{ kgm}^2$$

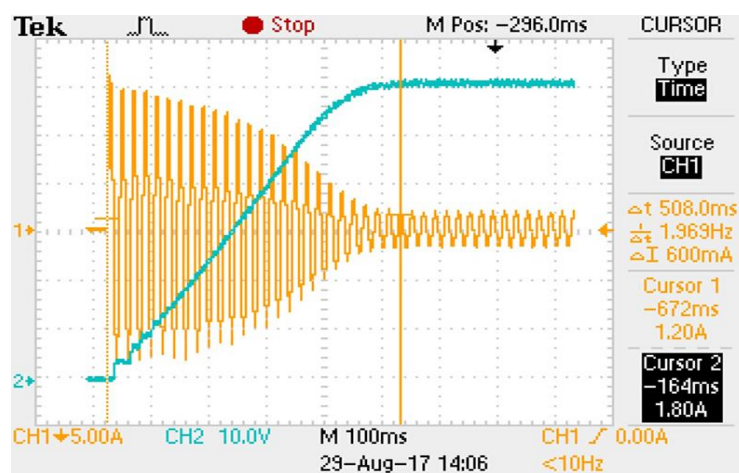
Ukupna vrijednost momenta tromosti sustava iznosi:

$$J_{uk} = J_{AC} + J_{DC} = 0.0024 + 0.013 = 0.0154 \text{ kgm}^2$$

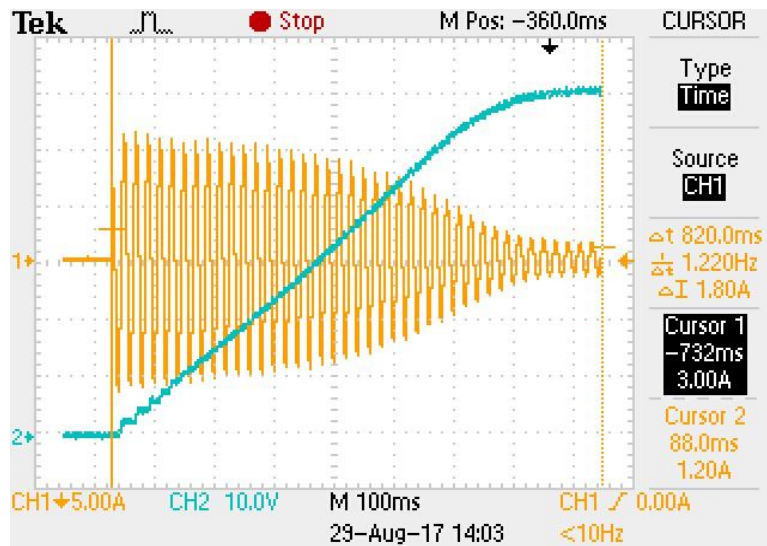
Pokus zaleta ponovljen je za različite vrijednosti smanjenjem napona napajanja motora te su očitana sljedeća stanja na osciloskopu:



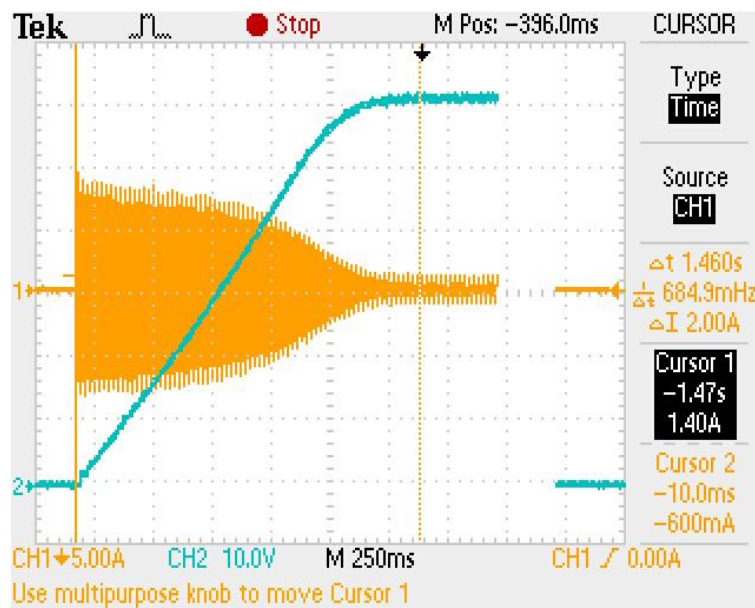
Slika 5.5 Struja i brzina vrtnje motora tijekom pokusa zaleta s naponom napajanja $U = 200\text{ V}$



Slika 5.6 Struja i brzina vrtnje motora tijekom pokusa zaleta s naponom napajanja $U = 170\text{ V}$



Slika 5.7 Struja i brzina vrtnje motora tijekom pokusa zaleta s naponom napajanja $U = 140\text{ V}$



Slika 5.8 Struja i brzina vrtnje motora tijekom pokusa zaleta s naponom napajanja $U = 110\text{ V}$

Iz dobivenih očitavanja s osciloskopa koja su prikazana slikama 5.2 i 5.5 – 5.8 vidljivo je kako se smanjenjem napona, smanjuje potezna struja motora i povećava se vrijeme potrebno da se motor zaleti na nazivnu brzinu.

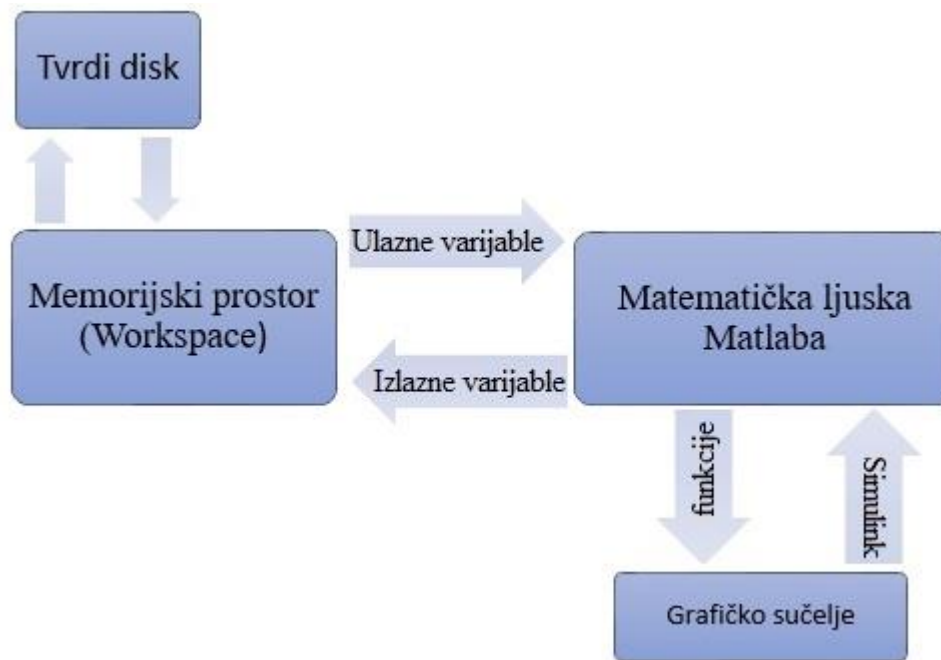
6. Računalni model motora

Kako je navedeno u poglavlju 3., ponašanje asinkronih strojeva u dinamičkim režimima rada opisano je sustavom nelinearnih diferencijalnih jednačbi. Zahvaljujući pojavi i razvoju mogućnosti računala, danas rješavanje nelinearnih diferencijalnih jednačbi koje opisuju asinkroni stroj ne predstavlja veliki problem. S vremenom su razvijeni razni računalni programi u kojima se na temelju rezultata simuliranja analiziraju dinamički režimi rada stroja kao zalet, reverziranje ili ponovno uklapanje. Jedan od takvih računalnih programa je Matlab, koji je korišten za simulaciju i analizu motora u ovome radu.

6.1. Osnove Matlaba

Prema literaturi [7] gdje je detaljno opisano korištenje i mogućnosti Matlab programskog paketa, osnovnu jezgru Matlaba čini matrični kalkulator s mogućnošću izvršavanja niza naredaba grupiranih u skriptu ili funkciju. Matlab se sastoji o niza specijaliziranih programskih paketa s mogućnošću upisivanja funkcija u iste. Razlog popularnosti ovog programa je u činjenici da je otvoren za definiranje novih paketa te se tako korisniku pruža mogućnost za nadogradnju. Programski paket Matlab većinom se koristi u području tehničkih znanosti.

Rad Matlaba zasniva se na radu s varijablama. Prvo se definiraju ulazne varijable na koje se primjenjuju matematičke operacije i funkcije. Kao rezultat toga dobiju se izlazne varijable. Način rada Matlaba prikazan je njegovom funkcionalnom strukturom na slici 6.1.



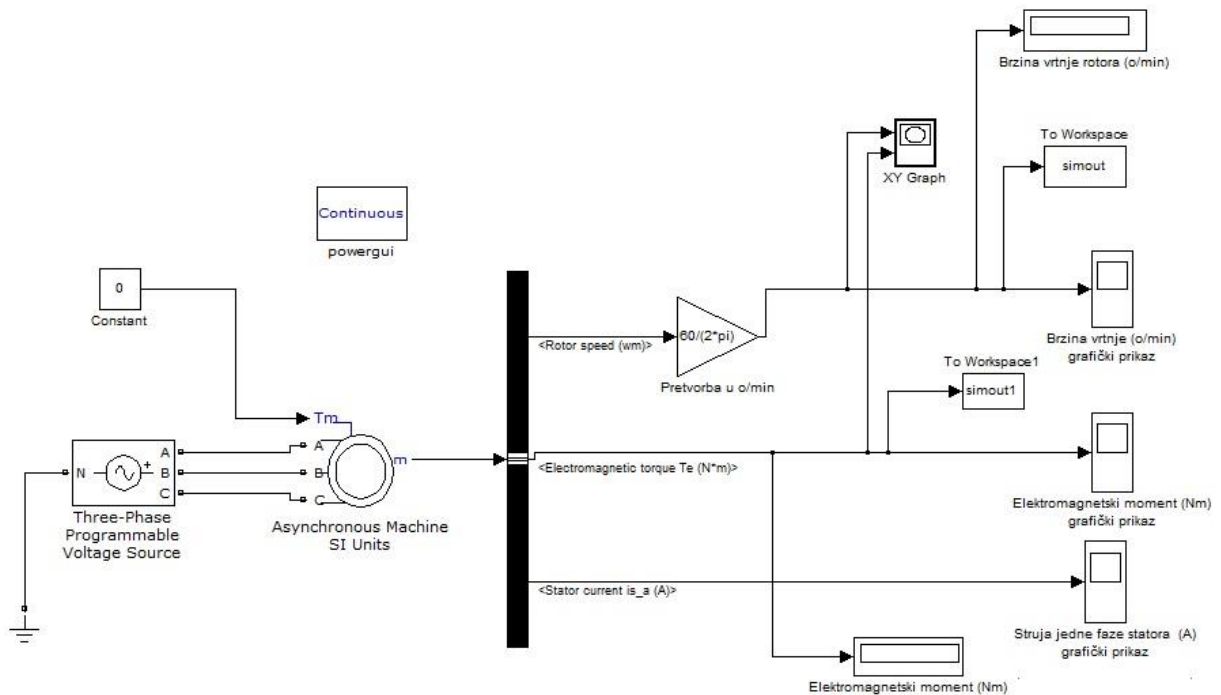
Slika 6.1 Funkcionalna struktura Matlaba

Ono što Matlab čini vrlo popularnim programom koji je vrlo korišten kako u industriji tako i u obrazovnoj zajednici jest njegovo grafičko sučelje, odnosno programski paket Simulink koji se razvijen kao nadogradnja Matlaba.

Simulink unutar svog programskog paketa omogućuje korisnicima definiranje matematičkog modela odnosno simulacijske sheme sustava pomoću grafičkih blokova. Simulink za izvođenje simulacija dinamičkih sustava koristi matematičku ljusku Matlaba. Također u Simulinku postoji biblioteka gotovih grafičkih blokova čijim odabirom u grafičkom pregledniku korisnik vrlo jednostavno može izgraditi od jednostavnijih pa do najsloženijih simulacijskih modela dinamičkog sustava. Izvođenje simulacije izrađenog simulacijskog modela odvija se u tri faze, slijedećim redoslijedom: prevođenje simulacijskog modela, povezivanje simulacijskog modela i rješavanje simulacijskog modela. Detaljan opis rada Simulink programskog paketa kao i njegove mogućnosti opisani su u literaturi [7].

6.2. Izrada simulacijske sheme mreže i kaveznog asinkronog motora pomoću grafičkih blokova u programskom paketu Simulink

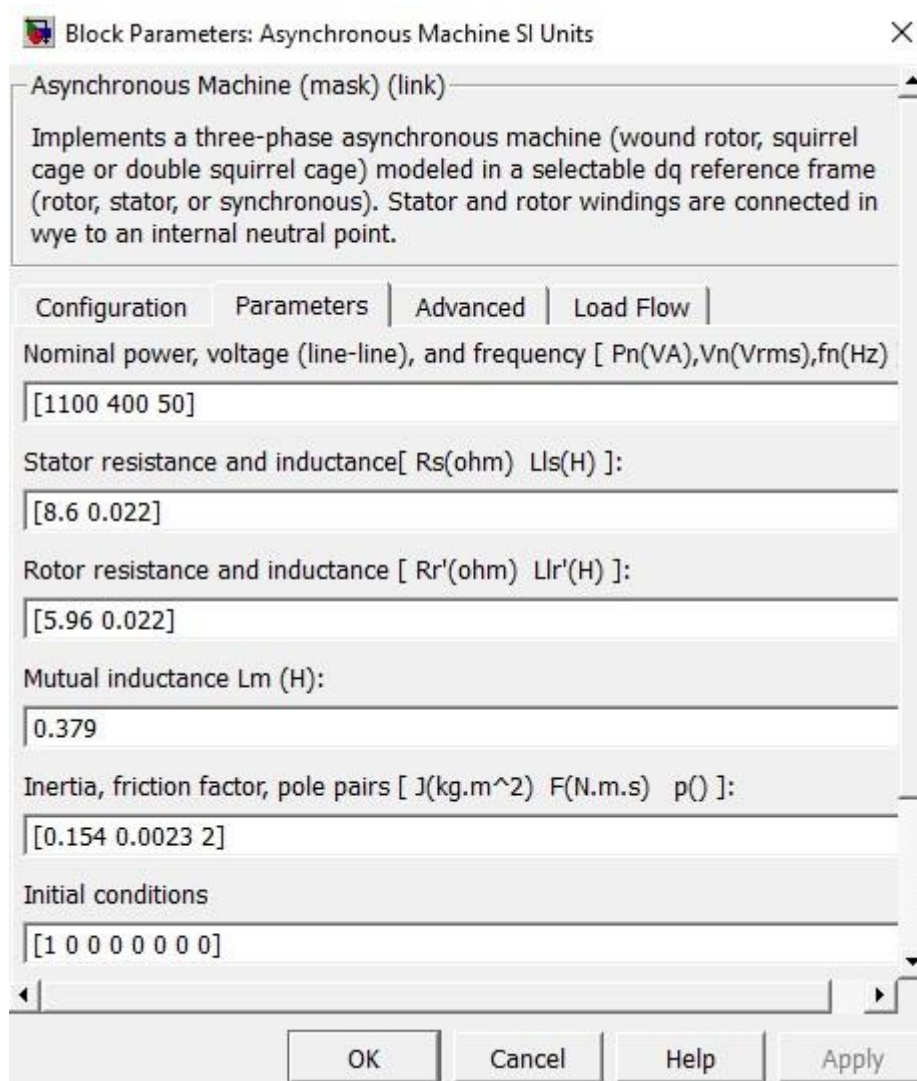
Pri izradi simulacijske sheme korištena je pogodnost programskog paketa Simulink i gotovih grafičkih blokova koji se nalaze u njegovoj biblioteci. Nakon pokretanja Simulinka direktno iz Matlaba otvara se Simulinkova biblioteka s popisom grafičkih blokova. Otvaranjem biblioteke u njezinom gornjem lijevom kutu nalazi se opcija za otvaranje novog simulacijskog modela (engl. File > New). Nakon toga tzv. „drag and drop“ opcijom se vrlo jednostavno odabrani grafički blokovi uzimaju iz biblioteke i stavljaju u simulacijski model. Izgled sheme spoja za simulaciju u Simulinku prikazan na je na slici 6.2.



Slika 6.2 Shema simulacije zaleta kaveznog asinkronog motora direktnim uključivanjem na mrežu u Matlab Simulinku

U simulaciji kao izvor trofaznog napona odabran je gotovi grafički blok unutar kojeg je moguće mijenjati parametre mreže, frekvenciju i napon. Isto tako za model motora odabran je odgovarajuću gotovi grafički blok. Grafički blok “Asynchronous Machine SI Units “ sa svojim mogućnostima zadovoljava potrebe ispitivanja problematike koja se obrađuje u ovom radu. Unutar samog bloka moguće je proizvoljno podesiti parametre nadomjesne mreže motora koji su izračunati u poglavlju 4. Izgled grafičkog sučelja bloka prikazan je na slici 6.3. Sam grafički blok čine više podsustava koji čine jedan zajednički sustav koji u sebi sadrži matematički model motora opisan diferencijalnim jednadžbama u poglavlju 3. Pokretanjem simulacije uz zadane parametre mreže i motora, unutar grafičkog bloka koji predstavlja asinkroni kavezni motor izvršavaju se matematičke operacije kojima je opisan matematički model asinkronog motora i na izlazu se

dobije signal koji predstavlja karakteristike motora. U pregledniku „Configuration“ unutar bloka, odabran je u ovom slučaju asinkroni stroj s kaveznim tipom rotora.



Slika 6.3 Grafičko sučelje bloka „Asynchronous Machine SI Units“ za podešavanje parametra motora

Prikazivanje željenih karakteristika motora moguće je spajanjem izlaza motora na tzv. “Bus Selector“ grafički blok koji se nalazi unutar biblioteke. Unutar samog bloka moguće je odabrati više parametara motora koje se žele prikazati grafički. U ovom slučaju odabrani su brzina vrtnje rotora, elektromagnetski moment motora i fazna struja statora. Potvrdom odabrani parametri motora prikazuju se kao izlazi iz bloka “Bus Selector“. Spajanjem tih izlaza na blok „Scope“ koji je uzet iz biblioteke, dobije se grafički prikaz rezultata simulacije.

Vrlo važan element svake simulacije pa tako i ove je simulacijski blok „Continuous“. Bez njega nije moguće pokrenuti simulaciju na što će korisnika i program upozoriti ukoliko se zaboravi

dati u simulacijski model. U ovom bloku moguće je podešavati mnoštvo parametara za samu simulaciju, a jedan od bitnijih je svakako vrijeme trajanja simulacije.

6.3. Simulacija zaleta kaveznog asinkronog motora na računalu

Simulacija je odrađena u programskom paketu Matlab Simulink. Za parametre motora u simulaciji koriste se vrijednosti parametara koje su dobivene pokusima praznog hoda i kratkog spoja motora opisanih u poglavlju 4.2. i 4.3.. Vrijednosti parametara korištene u simulaciji motora nalaze se u tablici 6.1.

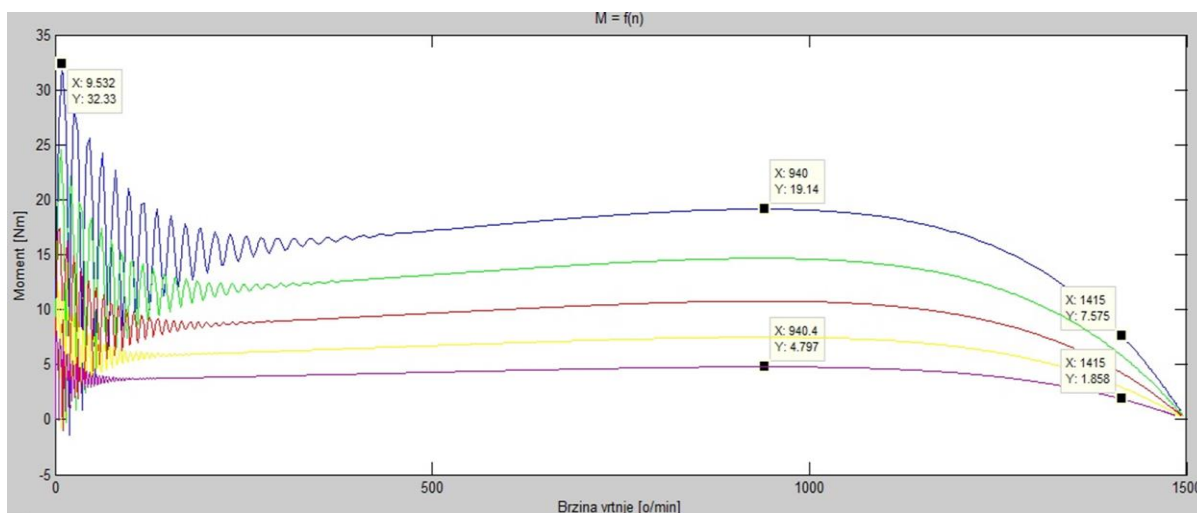
$R_s [\Omega]$	$R'_r [\Omega]$	$L_{\sigma s} [H]$	$L'_{\sigma r} [H]$	$L_m [H]$
8,6	5,96	0,022	0,022	0,379

Tablica 6.1 Parametri nadomjesne sheme motora korišteni za računalnu simulaciju zaleta motora

Nazivni parametri motora snaga, napon i frekvencija uzeti su iz tablice 4.1 a prethodno su očitani s natpisne pločice motora.

6.4. Dinamička momentna karakteristika

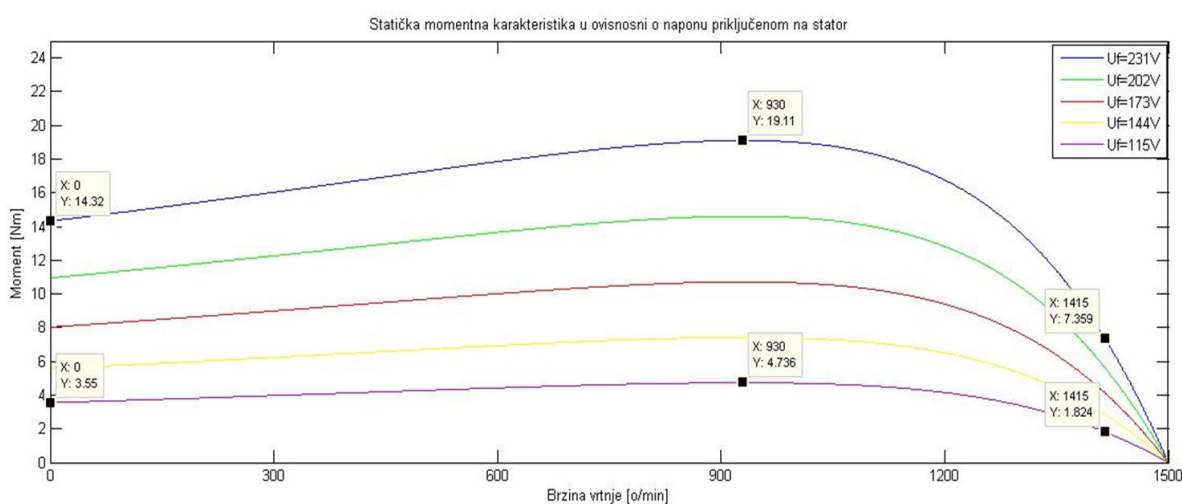
Upisom vrijednosti parametara nadomjesne sheme motora dobivenih u poglavlju 4. i pokretanjem simulacije dobiva se dinamička karakteristika elektromagnetskog momenta koja je prikazana na slici 6.4.



Slika 6.4 Dinamička karakteristika momenta i karakteristične vrijednosti momenta za različite vrijednosti napona

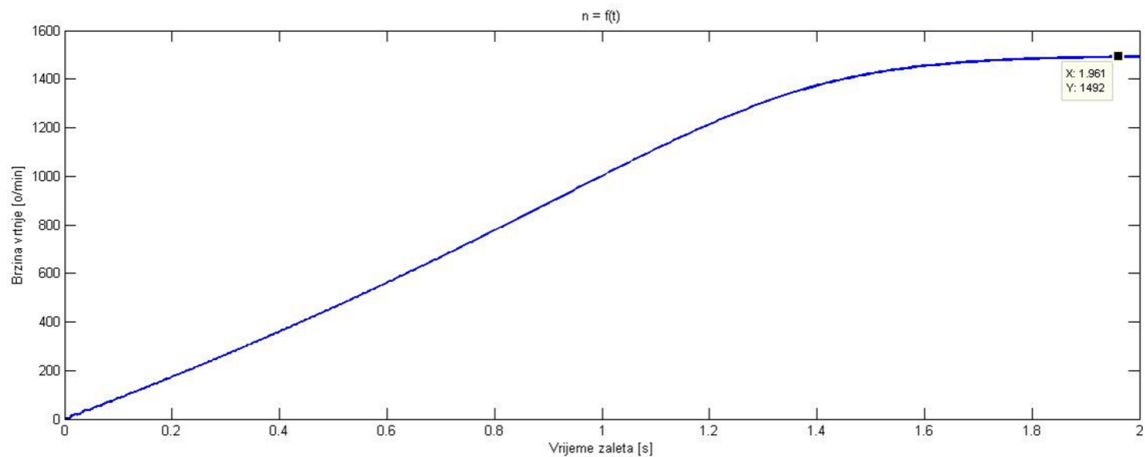
Vrijednost napona napajanja u simulaciji smanjivana je od nazivne, 400V (plava linija), pa do 200V (ljubičasta linija) s korakom promjene od 50V. Prema slici 6.4 vrijednost momenta pada s kvadratom napona što je u skladu sa teorijom obrađenom u poglavlju 2.6.

Na slici 6.5 prikazana je statička momentna karakteristika u ovisnosti o naponu dobivena simulacijom u Matlab Simulinku. Dobivena je uvrštavanjem vrijednosti parametara motora dobivenih u poglavlju 4.2 i 4.3 u izraz (2.54). Statička momentna karakteristika služi za preciznije određivanje poteznog momenta.



Slika 6.5 Statička momentna karakteristika zaleta motora u ovisnosti o naponu priključenom na stator

Iz slike 6.4 i 6.5 vidljivo je također kako točka u kojoj motor postiže maksimalni ili prekretni moment ne ovisi o naponu dovedenom na stezaljke statora, što je vidljivo i iz izraza (2.56).



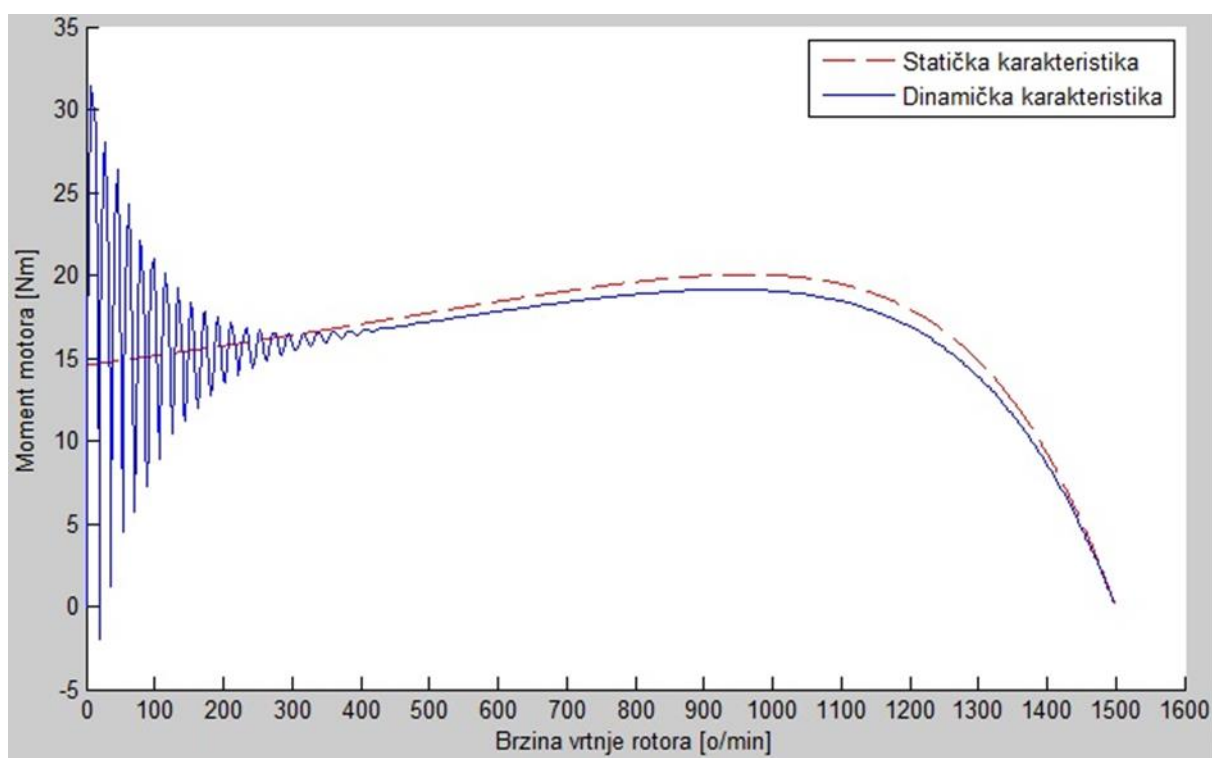
Slika 6.6 Brzina vrtnje rotora tijekom zaleta motora bez tereta na osovini

Na slici 6.6 vidljivo je kako brzina vrtnje motora teži sinkronoj brzini ali zbog gubitaka trenja i ventilacije motor neće postići sinkronu brzinu. Motoru je potrebno 1.961 s da se zaleti do maksimalne brzine.

Vrijeme zaleta motora dobiveno pokusom zaleta motora u laboratoriju koje je opisano u poglavlju 5. koje iznosi 260 ms, te vrijeme zaleta motora dobivenog pokusom zaleta u programskom paketu Matlab Simulink koje iznosi 1.961 s razlikuju se zbog različitih momenta tromosti. Kako bi dobili jasniju karakteristiku momenta a time i preciznije vrijednosti momenta potrebno je produljiti vrijeme trajanja zaleta motora u računalnoj simulaciji zaleta. To je učinjeno povećanjem momenta tromosti motora na deset puta veću vrijednost.

7. Analiza i usporedba dobivenih rezultata

Prema slici 7.1 vidljivo je kako se dinamička i statička karakteristika gotovo preklapaju što ukazuje na ispravnost metoda i točnost provođenja simulacije. Razlika između ove dvije karakteristike je jedino u početku zaleta, do brzine 400 o/min. Razlog tome je što se kod statičke karakteristike momenta uzimaju u obzir samo parametrima nadomjesne sheme motora, napon napajanja i parametri određeni konstrukcijom motora dok se kod dinamičke karakteristike momenta uzima u obzir i postojanje prijelaznih pojava električnih, magnetskih, mehaničkih i toplinskih veličina čije je vrijeme trajanja različito. Te pojave javljaju se na samom početku zaleta, u ovom slučaju kao na slici 7.1 do 400 o/min nakon čega isčezavaju te se statička i dinamička karakteristika nakon toga podudaraju.



Slika 7.1 Usporedba statičke i dinamičke karakteristike momenta kod nazivne vrijednosti napona napajanja

	Vršna vrijednost momenta [Nm]	Potezni moment [Nm]	Maksimalni moment [Nm]	Nazivni moment [Nm]	Vrijeme zaleta motora [s]
Tvornički podaci vrijednosti momenta motora	-	17.02	17.76	7.4	-
Statička momentna karakteristika dobivena proračunom	-	14.19	18.94	7.3	-
Statička momentna karakteristika dobivena simulacijom	-	14.32	19.11	7.36	-
Dinamička momentna karakteristika dobivena simulacijom	32.33	-	19.14	7.58	1.961
Dinamička karakteristika momenta dobivena pokusom zaleta	Ne može se odrediti iz rezultata	Ne može se odrediti iz rezultata	Ne može se odrediti iz rezultata	Ne može se odrediti iz rezultata	0.260

Tablica 7.1 Vrijednosti specifičnih točaka momentne karakteristike dobiveni različitim metodama i pokusima

Usporede li se vrijednosti iz tablice 7.1 vidljivo je kako postoje određena odstupanja vrijednosti momenta dobivenih pokusima i proračunima u odnosu na tvorničke vrijednosti momenta. Razlozi odstupanja su netočnost mjerne opreme korištene pri mjerenjima, pogreške mjerenja i mjerne metode kao i određena pojednostavljenja pri matematičkoj analizi motora koja je kasnije korištena kod računalne simulacije zaleta.

Može se reći kako su odstupanja od tvorničkih vrijednosti u granicama dozvoljenih što potvrđuje uspješnost provođenja pokusa računalnom simulacijom kao i mjerenja i pokus proveden u laboratoriju Sveučilišta Sjever.

8. Zaključak

U završnom radu cilj je bio prikazati promjenu momenta u ovisnosti o naponu mreže na koju se motor priključuje u slučaju direktnog zaleta što je uglavnom slučaj kod motora manjih snaga. Direktni zalet motora štetan je kako za motor tako i za mrežu na koju se priključuje, ali s obzirom da kod motora manjih snaga gubici nisu preveliki to je najjednostavniji i ekonomično prihvatljiv način zaleta motora.

Potrebno je poznavanje karakteristika koje zahtjeva elektromotorni pogon kako bi se mogao odabrati motor s odgovarajućim parametrima koji udovoljavaju zahtjevima pogona u koji će se motor ugraditi. Ovisno o svrsi za koju će se motor koristiti određuje se kakvu će karakteristiku momenta imati motor, odnosno koliki će biti omjer njegovog poteznog i nazivnog momenta.

Isto tako vrlo je važno poznavati uvjete koji vladaju u mreži na koju se motor priključuje. U obzir se mora uzeti da napon mreže može varirati i do 10%, a s obzirom da se moment mijenja s kvadratom napona, treba paziti da se ne odabere premali potezni moment motora s obzirom na moment tereta koji mora svladati pri zaletu kao što je to riječ npr. kod liftova, dizalica i sl. gdje se pri zaletu motora nalazi moment na osovini motora.

U Varaždinu, 29. rujna 2017.

Potpis studenta:

9. Literatura

- [1] Božidar Skalicki, Josip Grilec: Električni strojevi i pogoni, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.
- [2] Antun Dolenc, Asinhroni strojevi, Sveučilište u Zagrebu, Elektrotehnički fakultet, Sveučilišna naklada. Zagreb, 1990.
- [3] France Avčin, Peter Jereb, Ispitivanje električnih strojeva i njihove osobine, Tehniška založba Slovenije, Ljubljana, 1968.
- [4] Bilješke s predavanja iz kolegija Električni strojevi, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2012.
- [6] Martin Jadrić, Božidar Frančić, Dinamika električnih strojeva, Sveučilište u Splitu, Graphis, Zagreb, 1977.
- [7] Željko Ban, Jadranko Matuško, Ivan Petrović, Primjena programskog sustava Matlab za rješavanje tehničkih problema, Sveučilište u Zagrebu, Graphis, Zagreb, 2008.
- [8] Radenko Wolf, Osnove električnih strojeva, Školska knjiga, Zagreb, 1995.

Internet izvori:

- [5] https://www.fer.unizg.hr/download/repository/ELESUS_predavanje3_2.pdf , dostupno 09.08.2017.
- [9] https://www.fer.unizg.hr/download/repository/LabESIT1_Vjezba_9.pdf , dostupno 11.08.2017.

Popis slika

Slika 2.1 Konstrukcija asinkronog motora Izvor: http://www.sherlocks.com.au/understand-the-working-principle-of-ac-induction-motors/ , dostupno 09.06.2017	2
Slika 2.2 Presjek rotora Izvor: http://zone4info.com/articles/307/ac-motor , dostupno 09.06.2017.	3
Slika 2.3 Konstrukcija statora Izvor: http://zone4info.com/articles/307/ac-motor , dostupno 09.06.2017	3
Slika 2.4 Shema spoja namota i odgovarajući izgled spoja namota u priključnoj kutiji za spoj trokut i spoj zvijezda Izvor: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/EEPE_2014_2015_AM.pdf , dostupno 23.05.2017	4
Slika 2.5 Namot asinkronog kaveznog motora Izvor: https://www.slideshare.net/DejvidVarga/diplomski-rad-2012 , dostupno 29.05.2017	5
Slika 2.6 Kliznokolutni asinkroni motor Izvor: https://documents.tips/documents/asinkroni-strojevi.html , dostupno 03.06.2017	6
Slika 2.7 Prikaz odnosa sinkrone brzine vrtnje magnetskog polja i brzine vrtnje motora Izvor: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/EEPE_2014_2015_AM.pdf , dostupno 24.05.2017.....	7
Slika 2.8 Odnos između klizanja i sinkrone brzine Izvor: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/EEPE_2014_2015_AM.pdf , dostupno 24.05.2017	8
Slika 2.9 Nadomjesna shema asinkronog motora, statorski krug (lijevo) i rotorski krug (desno) Izvor: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/EEPE_2014_2015_AM.pdf , dostupno 26.05.2017	10
Slika 2.10 Nadomjesna shema za rotorski krug modificiran s promjenjivim otporom rotora Izvor: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/EEPE_2014_2015_AM.pdf , dostupno 26.05.2017	12
Slika 2.11 Potpuna nadomjesna shema asinkronog motora Izvor: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/EEPE_2014_2015_AM.pdf , dostupno 26.05.2017	14
Slika 2.12 Nadomjesna shema praznog hoda asinkronog motora Izvor: vlastita slika	17
Slika 2.13 Raspodjela gubitaka praznog hoda asinkronog motora Izvor: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/LabESIT1_Vjezba_9.pdf , dostupno	

07.06.2017	17
Slika 2.14 Nadomjesna shema kratkog spoja asinkronog motora Izvor: vlastita slika	19
Slika 2.15 Energetski dijagram, gubici asinkronog motora Izvor: vlastita slika	22
Slika 2.16 Momentna karakteristika asinkronog stroja za sva područja rada Izvor: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/EEPE_2014_2015_AM.pdf , dostupno 29.05.2017	25
Slika 2.17 Najčešći oblik prikazivanja momentne karakteristike motora Izvor: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/EEPE_2014_2015_AM.pdf , dostupno 29.05.2017	26
Slika 3.1 Poprečni presjek idealizirane izvedbe asinkronog motora Izvor: [6]	29
Slika 3.2 Razlaganje rezultirajućeg vektora na komponente u dvofaznom i trofaznom sustavu Izvor: [6]	35
Slika 4.1 Shema spoja ispitivanja asinkronog kaveznog motora u praznom hodu Izvor: https://moodle.vz.unin.hr/moodle/file.php/296/laboratorijske_vjezbe_2016/vjezbe1.pdf , dostupno 24.07.2017.....	41
Slika 4.2 Ovisnost gubitaka praznog hoda o naponu Izvor: vlastita slika	43
Slika 4.3 Ovisnost struje praznog hoda o naponu Izvor: vlastita slika	44
Slika 4.4 Ovisnost faktora snage o naponu Izvor: vlastita slika	44
Slika 4.5 Ovisnost užih gubitaka o naponu Izvor: vlastita slika	45
Slika 4.6 Shema spoja ispitivanja asinkronog kaveznog motora u kratkom spoju Izvor: https://moodle.vz.unin.hr/moodle/file.php/296/laboratorijske_vjezbe_2016/vjezbe2.pdf , dostupno 24.07.2017	46
Slika 4.7 Ovisnost struje kratkog spoja o naponu mreže Izvor: vlastita slika	48
Slika 4.8 Ovisnost poteznog momenta o naponu mreže Izvor: vlastita slika	48
Slika 4.9 Ovisnost faktora snage o naponu mreže Izvor: vlastita slika	49
Slika 5.1 Shema spoja pokusa zaleta asinkronog kaveznog motora Izvor: vlastita slika	51
Slika 5.2 Struja i brzina vrtnje motora tijekom pokusa zaleta s nazivnim podacima motora	52
Slika 5.3 Ovisnost brzine vrtnje motora o vremenu tijekom pokusa zaleta Izvor: vlastita slika	52
Slika 5.4 Karakteristika momenta motora dobivena obradom podataka dobivenih pokusom zaleta motora u laboratoriju Izvor: vlastita slika	53
Slika 5.5 Struja i brzina vrtnje motora tijekom pokusa zaleta s naponom napajanja $U = 200\text{ V}$ Izvor: vlastita slika	54
Slika 5.6 Struja i brzina vrtnje motora tijekom pokusa zaleta s naponom napajanja $U = 170\text{ V}$ Izvor: vlastita slika	54

Slika 5.7 Struja i brzina vrtnje motora tijekom pokusa zaleta s naponom napajanja $U = 140 \text{ V}$ Izvor: vlastita slika	55
Slika 5.8 Struja i brzina vrtnje motora tijekom pokusa zaleta s naponom napajanja $U = 110 \text{ V}$ Izvor: vlastita slika	55
Slika 6.1 Funkcionalna struktura Matlaba Izvor:[7].....	57
Slika 6.2 Shema simulacije zaleta kaveznog asinkronog motora direktnim uključivanjem na mrežu u Matlab Simulinku Izvor: vlastita slika	58
Slika 6.3 Grafičko sučelje bloka „Asynchronous Machine SI Units“ za podešavanje parametra motora Izvor: vlastita slika	59
Slika 6.4 Dinamička karakteristika momenta i karakteristične vrijednosti momenta za različite vrijednosti napona Izvor: vlastita slika	61
Slika 6.5 Statička momentna karakteristika zaleta motora u ovisnosti o naponu priključenom na stator Izvor: vlastita slika	61
Slika 6.6 Brzina vrtnje rotora tijekom zaleta motora bez tereta na osovini Izvor: vlastita slika .	62
Slika 7.1 Usporedba statičke i dinamičke karakteristike momenta kod nazivne vrijednosti napona napajanja Izvor: vlastita slika	63



IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, MARIO VUSIĆ pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor završnog rada pod naslovom UTJECAJ NARAVNA KRJEŽE NA KARAKTERISTIKU MOMENTA KAVEZNOG ASINKRONOG MOTORA te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:

Mario Vusić

(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, MARIO VUSIĆ neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom završnog rada pod naslovom UTJECAJ NARAVNA KRJEŽE NA KARAKTERISTIKU MOMENTA KAVEZNOG ASINKRONOG MOTORA čiji sam autor.

Student:

Mario Vusić

(vlastoručni potpis)

Data sheet for three-phase Squirrel-Cage-Motors



Ordering data : **1LA7090-4AA10**

without (standard)

Client order no. :
Order no. :
Offer no. :
Remarks :

Item no. :
Consignment no. :
Project :

<i>Electrical data:</i>				<i>General data:</i>			
Rated motor voltage : (1) 230 VDI400 VY, 50 Hz, 460 VY, 60 Hz				Frame size : 090 S			
Frequency :	50 Hz			60 Hz	Type of construction : (0) IM B3 / B6 / B7 / B8 / V5 without canopy		
Rated power :	1.10 kW			1.30 kW	Weight in kg, without optional accessories : 13.00 kg		
Rated motor speed :	1415 1/ min			1715 1/ min	Frame material : Aluminum		
Rated motor torque :	7.4 Nm			7.2 Nm	Degree of protection : IP 55		
Rated motor current (IE) :	VD 4.52 A	VY 2.60 A			WY 2.45 A	Method of cooling, TEFC : IC 411	
Starting / rated motor current :	4.6			5.0	Vibration class : A (Standard)		
Breakdown / rated motor	2.4			2.4	Insulation : 155(F) to 130(B)		
Starting / rated motor torque :	2.3			2.3	Duty type : S1 - continuous duty		
Efficiency %	4/4 75.0%	3/4 75.0%	2/4 72.0%	4/4 79.0%	3/4 79.5%	2/4 77.0%	Direction of rotation : Bi-directional
Power factor :	0.81	0.76	0.66	0.82	0.77	0.67	
Efficiency class :	IE1			IE1			
<i>Mechanical data:</i>				<i>Terminal box:</i>			
Sound pressure level 50Hz/60Hz (load) :				48 dB(A)	52 dB(A)		
Moment of inertia :				0.0024 kg*m ²			
Bearing DE :				6205 2ZC3			
Bearing NDE :				6004 2ZC3			
Type of bearing :				Floating bearings pre-loaded DE (standard)			
Condensate drainage holes :				No			
Regreasing device :				No			
Lubricants :				Esso Unirex N3			
Grease lifetime/Relubrication interval :				40000 h			
Quantity of grease for relubrication :				null g			
External earthing terminal :				No			
Coating :				Special paint finish RAL 7030 stone gray			
<i>Environmental conditions:</i>				<i>Special design:</i>			
Ambient temperature :				-20 °C - +40 °C			
Altitude above sea level :				1000 m			
Standards and specifications :				IEC, DIN, ISO, VDE, EN			