

# Pokretanje i regulacija brzine vrtnje asinkronih motora

---

**Kučan, Erik**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:886721>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-29**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**POKRETANJE I REGULACIJA BRZINE VRTNJE  
ASINKRONIH MOTORA**

Rijeka, rujan 2022.

Erik Kućan

0069084114

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**POKRETANJE I REGULACIJA BRZINE VRTNJE  
ASINKRONIH MOTORA**

Mentor: Doc. dr. sc. Rene Prenc

Rijeka, rujan 2022.

Erik Kućan

0069084114

Rijeka, 21. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Električni strojevi**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Erik Kućan (0069084114)**  
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike**

Zadatak: **Pokretanje i regulacija brzine vrtnje asinkronih motora / Starting and speed control of an induction motor**

### Opis zadatka:

U završnom radu će se najprije opisati princip rada i podjela asinkronih motora. Posebno će biti obrađeni načini njihovog pokretanja i regulacije brzine vrtnje. U sklopu toga će se objasniti reverziranje smjera i koncept višebrzinskih motora. Detaljno će se prikazati generatorsko kočenje, protustrujno kočenje i klasičan motorski rad. Konačno, napraviti će se simulacija nekih dinamičkih stanja motora pomoću programskog paketa PLECS.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

*Erik Kućan*

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Doc. dr. sc. Rene Prenc

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



Prof. dr. sc. Viktor Sučić

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike

**IZJAVA**

Sukladno članku 8. pravilnika o završnom ispitu i završetku preddiplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad pod naslovom „ Pokretanje i regulacija brzine vrtnje asinkronih motora“

Rijeka, rujan 2022.

Enl Kucan

Ime i prezime

## ZAHVALA

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Reneu Prencu na savjetovanju i usmjeravanju tijekom izrade ovog završnog rada. Također se zahvaljujem svim profesorima i asistentima Tehničkog fakulteta na prenesenom znanju tijekom studiranja. Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji na podršci i razumijevanju te omogućenom studiranju.

# 1. SADRŽAJ

2. UVOD .....	7
3. PRINCIP RADA ASINKRONIH STROJEVA.....	8
4. PODJELA ASINKRONIH MOTORA.....	11
4.1. Klizno-kolutni asinkroni motor .....	11
4.2. Kavezni asinkroni motor .....	12
5. POKRETANJE ASINKRONIH STROJEVA .....	14
5.1. Pokretanje zvijezda-trokut.....	14
5.2. Pokretanje pomoću autotransformatora.....	15
5.3. Direktno pokretanje .....	16
5.4. Pokretanje pomoću mekog upuštača (soft starter).....	17
5.5. Pokretanje pomoćnom fazom – jednofazni motor.....	19
6. REGULACIJA BRZINE VRTNJE .....	21
6.1. Regulacija brzine vrtnje promjenom otpora u rotorskom krugu .....	21
6.2. Regulacija brzine vrtnje promjenom napona.....	22
6.3. Regulacija brzine vrtnje promjenom frekvencije .....	25
6.4. Višebrzinski motori .....	27
6.5. Reverziranje .....	30
7. PODRUČJA RADA I KOČENJE ASINKRONOG STROJA .....	32
7.1. Područja rada asinkronog stroja .....	32
7.2. Kočenje asinkronim strojem.....	33
7.2.1. Generatorsko kočenje .....	33
7.2.2. Protustrujno kočenje.....	34
8. SIMULACIJA KARAKTERISTIKA .....	35
8.1. Općenito o PLECS-u .....	35
8.2. Simulacija dinamičke i statičke karakteristike .....	35
8.2.1. Promjena karakteristika motora promjenom otpora u rotorskom krugu .....	38
8.2.2. Promjena karakteristika promjenom napona napajanja.....	40
8.2.3. Promjena karakteristika promjenom frekvencije.....	42
8.2.4. Promjena karakteristika promjenom broja pari polova .....	44
9. ZAKLJUČAK .....	46
10. LITERATURA .....	47
11. SAŽETAK.....	48
12. SUMMARY .....	48

## 2. UVOD

Da bi se ljudima olakšao rad kroz povijest su se koristili strojevi s različitim izvorom energije, najčešće su to bili strojevi na paru i vodu. Razvojem novih tehnologija napušta se takva pretvorba energija, a zamjenjuju ih motori s unutarnjim izgaranjem koje u novije vrijeme potiskuju električni strojevi.

Električni strojevi su uređaji za pretvorbu energije. Ako stroj pretvara električnu energiju u mehaničku tada govorimo o motoru, a kada stroj pretvara mehaničku energiju u električnu tada govorimo o generatoru.

1838. godine Jacobi je napravio prvi istosmjerni elektromotorni pogon koji je pokretao čamac s 14 osoba. Razvoj elektromotora kretao se jako brzo pa je 1890. godine udio elektromotora bio 5%, a 1927. godine taj je postotak narastao na 75%, dok je danas taj postotak preko 90%.

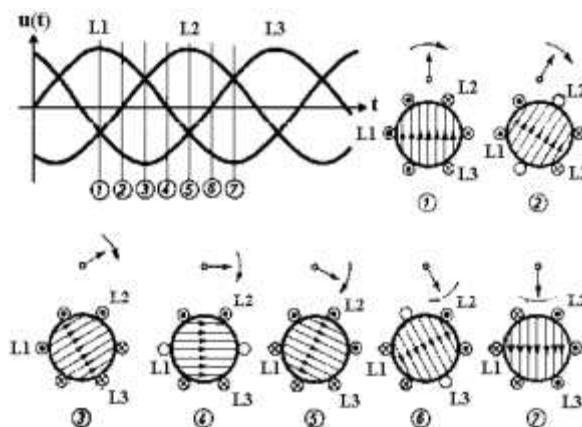
Izmjenični motor koji radi na principu okretnog magnetskog polja patentirao je Nikola Tesla još 1888. godine. Izmjenični strojevi su potpuno zamijenili istosmjerne kod kojih je bio problem transformacija napona što se kod izmjeničnih strojeva rješavalo s transformatorima.

Industrijska postrojenja u 20. stoljeću počela su zahtijevati regulirane elektromotorne pogone što se odnosilo na promjenu brzine vrtnje. Problem se rješavao s istosmjernim strojem kojem se u armaturni krug dodao predotpor, dok se kod izmjeničnih strojeva regulacija brzine vrtnje promjenom napona i frekvencije teže mogla ostvariti i bila je vrlo skupa, pa su se istosmjerni strojevi zadržali cijelo 20. stoljeće kao najbolji način u reguliranim pogonima. Nakon izuma tranzistora i tiristora počeo je nagli razvoj učinske elektronike koji je u prvi plan stavio izmjenične elektromotore ispred istosmjernih.



### 3. PRINCIP RADA ASINKRONIH STROJEVA

Asinkroni motor se razlikuje od ostalih po tome što se ne dovodi napon na rotor već se on inducira pomoću okretnog magnetskog polja statora. Uvjet za nastanak okretnog magnetskog polja je da se na statoru nalaze barem dva namota protjecana izmjeničnom strujom, odnosno tri namota kod trofaznog motora prostorno pomaknuta za  $120^\circ$ . Prilikom prolaska struje kroz namotaje statora oni stvaraju zajedničko magnetsko polje koje je uvijek istog intenziteta, ali mijenja smjer. Silnice okretnog magnetskog polja presijecaju vodiče rotora pa će se u njima inducirati napon zbog relativnog gibanja vodiča u magnetskom polju, pa će inducirani napon na kratkospojenom rotoru protjerati struju. Na vodiče rotora kroz koje teče struja, a nalaze se u magnetskom polju djelovat će sila koja pokreće rotor.



Slika 3.1. Nastanak okretnog magnetskog polja

Asinkroni motor se ne može okretati sinkrono s okretnim magnetskim poljem jer ne bi došlo do induciranja napona na rotorskim namotajima. Rotor i okretno magnetsko polje statora međusobno bi mirovali. Promotrimo sada situaciju da se rotor i okretno magnetsko polje vrte sinkronom brzinom. Kada bi se rotor i okretno magnetsko polje vrtjeli istom brzinom tada ne bi bilo relativnog gibanja vodiča s obzirom na okretno magnetsko polje, odnosno relativna brzina  $v$  iznosila bi nula. Tada bi inducirani napon  $E$  bio jednak nuli, pa bi struja na rotoru bila nula kao i sila na vodič što se može vidjeti iz sljedećih relacija:

$$E = B \cdot l \cdot v \quad (3.1)$$

gdje je:

$E$  – inducirani napon na vodiču [V]

$B$  – gustoća magnetskog toka [T]

$l$  – duljina vodiča [m]

$v$  – brzina gibanja vodiča (razlika između brzine gibanja vodiča i okretnog mag. polja) [m/s]

$$F = B \cdot I \cdot l \quad (3.2)$$

gdje je:

$F$  – sila na vodič [Nm]

$B$  – gustoća magnetskog toka [T]

$l$  – duljina vodiča [m]

Ako na vodiče koji se nalaze u magnetskom polju djeluje sila, tada ta sila stvara zakretni moment prema izrazu:

$$M = k \cdot I_2 \cdot \Phi \cdot \cos\varphi \quad (3.3)$$

gdje je:

$M$  – moment motora [Nm]

$k$  - konstanta motora

$\Phi$  - magnetski tok [Wb]

$I_2$  - struja rotora [A]

$\varphi$ -kut između struje i magnetskog toka [°]

Dakle, da bi došlo do pokretanja asinkronog motora mora postojati razlika u brzinama koju definiramo kao klizanje. Klizanje je razlika između sinkrone i stvarne brzine vrtnje rotora izražena u jediničnoj ili postotnoj vrijednosti sinkrone brzine, a definira se kao:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3.4)$$

gdje je:

s – klizanje

$n_s$  – brzina okretnog magnetskog polja (sinkrona brzina) [o/min]

n – brzina rotora [o/min]

Brzinu okretnog magnetskog polja možemo izračunati iz relacije:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (3.5)$$

gdje je:

$n_s$  - brzina okretnog magnetskog polja [o/min]

f - frekvencija mreže [Hz]

p -broj pari polova

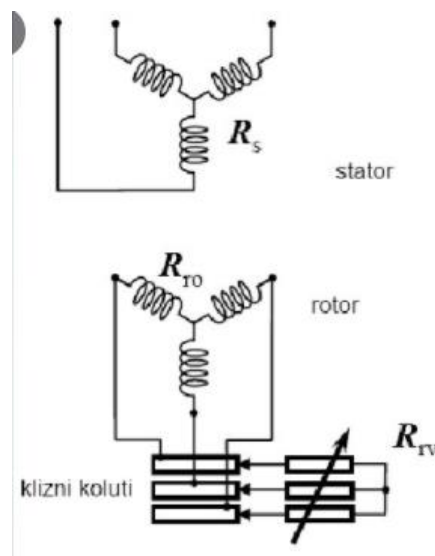
Kada bi na asinkroni motor priključili neki teret tada bi brzina motora počela padati. Zatim bi razlika brzina između rotora i okretnog magnetskog polja rasla pa bi rastao inducirani napon. Posljedica tome će biti porast struje, a kao posljedica porasta struje raste i sila na vodič što možemo vidjeti iz formula 3.1 i 3.2. To se događa tako dugo sve dok se ne izjednači moment motora i moment tereta. Klizanje pri praznom hodu motora je jako malo, a pri nazivnom opterećenju iznosi 3-5%. Što je motor veći to će klizanje biti manje.

## 4. PODJELA ASINKRONIH MOTORA

Asinkrone motore možemo podijeliti prema broju faza na jednofazne i trofazne, a s obzirom na izvedbu rotora na klizno-kolutne i kavezne.

### 4.1. Klizno-kolutni asinkroni motor

Sastoji se od rotora na koji je u pravilu smješten trofazni namot. Počeci namotaja spojeni su u zvijezdu, a krajevi namota izvedeni su do kliznih koluta. Klizni kolutovi se nalaze na osovini rotora i svaki klizni kolut je odvojen pomoću nekog izolacijskog materijala. Pomoću kliznih koluta i četkica može se na rotorski namot spojiti dodatni otpor. Dodavanjem vanjskog otpora utječemo na karakteristiku momenta klizno-kolutnog motora.



Slika 4.1. Shema klizno-kolutnog motora

Priključivanjem vanjskog otpora  $R_{rv}$  mijenja se ukupan radni otpor u krugu rotora  $R_r$  koji je jednak zbroju otpora  $R_{r0}$  i otpora  $R_{rv}$ .

$$R_r = R_{r0} + R_{rv} \quad (4.1)$$

Gdje je:

$R_r$  – otpor rotora [ $\Omega$ ]

$R_{r0}$  – otpor faze namota [ $\Omega$ ]

$R_{rv}$  – priključeni vanjski otpor [ $\Omega$ ]

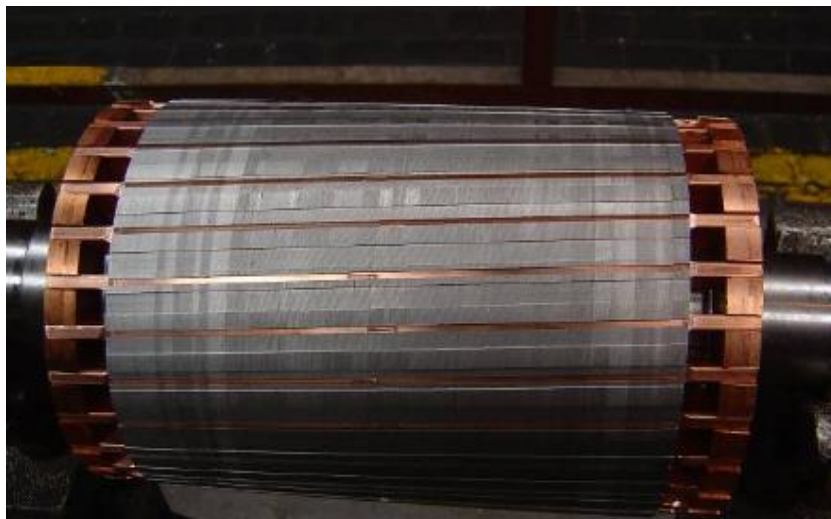
## 4.2. Kavezni asinkroni motor

Kavezni motori sastoje se od statora koji je isti kao i kod klizno-kolutnih motora i rotora koji sadrži utore u kojima se nalaze vodiči u obliku štapa, koji su na svojim krajevima kratko spojeni te čine višefazni namot. Takav namot bez željezne jezgre ima oblik kaveza po čemu su i dobili ime. Ako su svi namoti jednako raspoređeni tada je taj namot simetričan, ako je namot simetričan tada možemo imati proizvoljan broj faza. Prednost kaveznog motora je jednostavna izrada njegovog rotora jer nema namatanja namota i ne treba ih izolirati, već se postave u utore i na krajevima kratko spoje. Nema kliznih koluta i kliznih kontakata pa nema i dijelova koji se mehanički troše. Koriste se dvije vrste kaveznog namota: uložni i lijevani. Uložni namoti koriste se kod motora srednjih i velikih snaga, a izrađuje se od posebno oblikovanih bakrenih profila i bronce. Takvi profili provučeni su kroz utore te se zavare na prstene s druge strane. Lijevani namot koristi se kod motora manjih snaga, a izrađuje se tako da se rotorski paket stavi u kalup za lijevanje pa se lijev ubrizga u utore. Najčešće se izrađuju od aluminija i silumina.



*Slika 4.2. Rotorski paket*

Kavezni motor ne sadrži uputnik, pa je za promjenu brzine vrtnje potreban frekvencijski pretvarač. Postoje različite izvedbe kaveza (jedan, dva ili više kaveza na rotoru), što nam daje različite karakteristike motora.

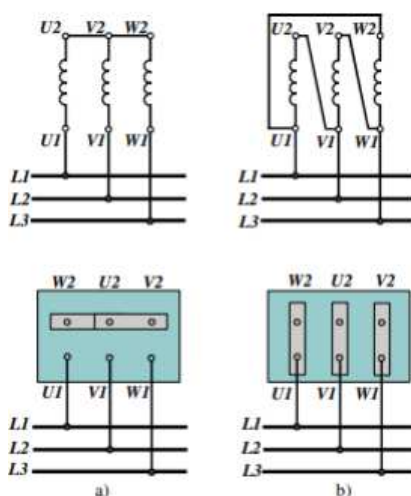


*Slika 4.3. Rotor sa uložnim namotom*

## 5. POKRETANJE ASINKRONIH STROJEVA

### 5.1. Pokretanje zvijezda-trokut

Pokretanje asinkronog motora pomoću spoja zvijezda-trokut koristi se za pokretanje motora manjih snaga. Spoj zvijezda trokut koristi se da bi se smanjila potezna struja koja je veća od nazivne struje čime bi se ublažio strujni udarac na mrežu koji može izazvati neželjene posljedice u mreži.



Slika 5.1. Spoj namotaja i stezaljki asinkronog motora u a) zvijezdu i b) trokut

Ako je motor konstruiran za rad pri nazivnom naponu i spojen je u zvijezdu, na njega ne smijemo priključiti isti napon u spoju trokut, jer bi došlo do pregrijavanja motora zbog  $\sqrt{3}$  puta većeg napona od nazivnog. Motor predviđen za rad u spoju trokut može se spojiti u spoj zvijezda, ali će tada napon biti za  $\sqrt{3}$  puta manji što se može vidjeti iz izraza:

$$U_Y = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3}} \quad (5.1)$$

gdje je:

$U_Y$  - napon u spoju zvijezda [V]

$U_{\Delta}$  - napon u spoju trokut [V]

Kada se motor pokreće prvo se prespaja u zvijezdu, tada je napon na namotima pojedinih faza  $\sqrt{3}$  puta manji nego pri spoju trokut, a struja će tada biti  $\sqrt{3}$  puta manja i jednaka linijskoj struji. Kada se prespoji u trokut linijska struja će biti  $\sqrt{3}$  puta veća od fazne struje u spoju trokut, odnosno 3 puta veća od fazne (i linijske) u spoju zvijezda.

$$I_Y = \frac{I_{\Delta}}{3} \quad (5.2)$$

gdje je:

$I_Y$  – linijska struja u spoju zvijezda [A]

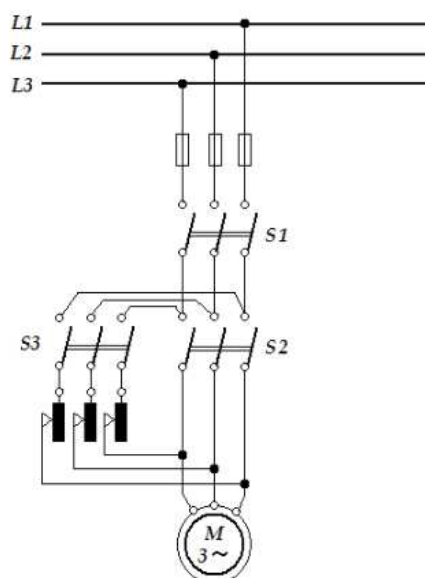
$I_{\Delta}$ - linijska struja u spoju trokut [A]

Prespajanjem statorskog namota u spoj zvijezda može se smanjiti potezna (linijska struja) 3 puta, ali će se smanjiti moment motora s kvadratom faznog napona za 3 puta.

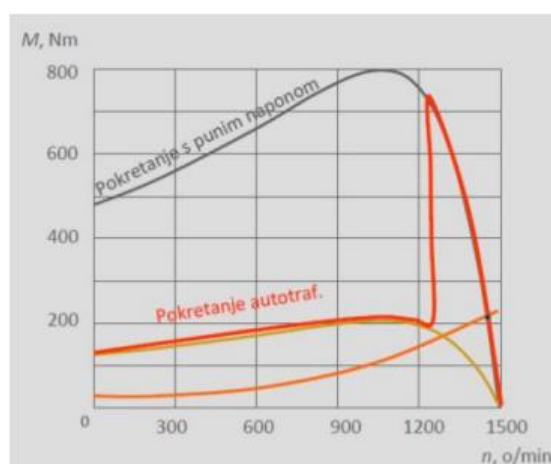
## 5.2. Pokretanje pomoću autotransformatora

Upotrebom autotransformatora za pokretanje asinkronih motora želi se postići smanjenje potezne struje. Ulazne stezaljke autotransformatora se spajaju na mrežu, a izlazne stezaljke na motor. Takvo pokretanje vrši se u nekoliko stupnja. Prvo je spojen kada su sklopka 1 i sklopka 3 zatvorene, a sklopka 2 otvorena. Klizači se pomiču iz početnog položaja u krajnji, odnosno povećava se napon na motoru. Kada napon na motoru dosegne napon mreže tada se uključi sklopka 2, a isključi sklopka 3. Prilikom priključivanja motora na autotransformator on dobiva od 50% do 70% nazivnog napona.





Slika 5.2. Shema pokretanja pomoću autotransformatora

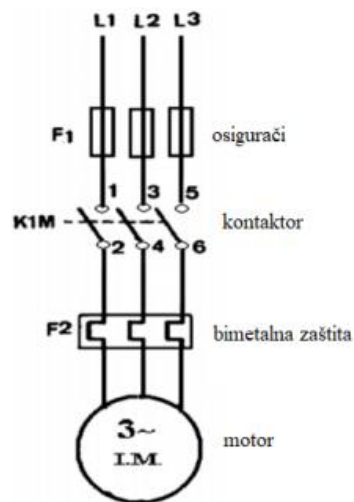


Slika 5.3. Momentna karakteristika motora pokretanog sa autotransformatorom

### 5.3. Direktno pokretanje

Direktno pokretanje motora je najjednostavnija, najjeftinija i najčešće korištena metoda pokretanja asinkronih motora. Koristi se za pokretanje manjih motora do 5kW kod kojih je potezna struja manja, a sastoji se od osigurača, kontaktora i bimetalne zaštite. Prilikom pokretanja motor vuče poteznu struju koja je i do 8 puta veća od nazivne struje, a kako raste brzina vrtnje ta struja pada. Između mreže i motora dodaje se osigurač koji služi za zaštitu elektromotora od dugotrajne potezne struje koja se javlja kada je na motor priključen teret. Bimetalna zaštita sadrži senzore koji primaju informacije o temperaturi. Dakle ako je temperatura veća od zadane kritične temperatura tada isključi motor s mreže. Bimetalna zaštita

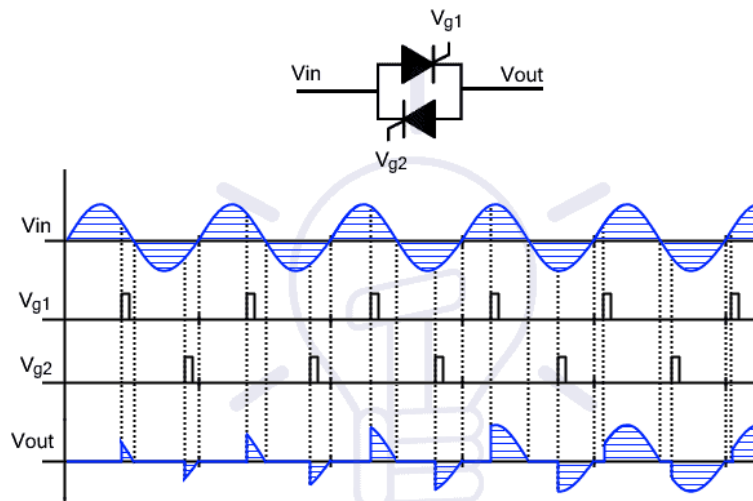
mora dozvoliti preopterećenje motora kroz kratko vrijeme, ali ako je preopterećenje duže tada isključuje motor.



Slika 5.4. Shema direktnog pokretanja motora

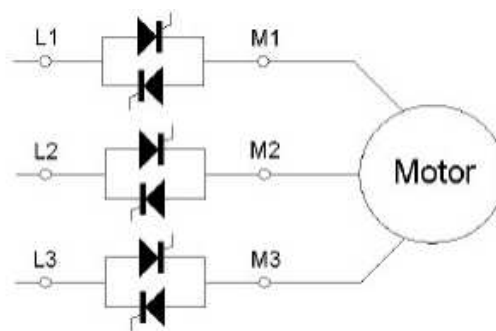
#### 5.4. Pokretanje pomoću mekog upuštača (soft starter)

Pokretanjem asinkronog motora pomoću mekog upuštača osigurava se postepen zalet motora bez velike potezne struje. Prilikom pokretanja napon se povećava od nule do nazivne vrijednosti motora, tako što se mijenja kut vođenja tiristora u antiparalelnom spoju. Na samom početku pokretanja tiristori okidaju s velikim kutom vođenja (kašnjenjem) što znači da do motora dolazi vrlo nizak efektivni iznos napona. Nadalje kada motor ubrzava tiristori okidaju sve ranije, dok brzina ne poraste na nazivnu vrijednost kada okidaju bez kašnjenja što znači da do motora dolazi najveći napon.



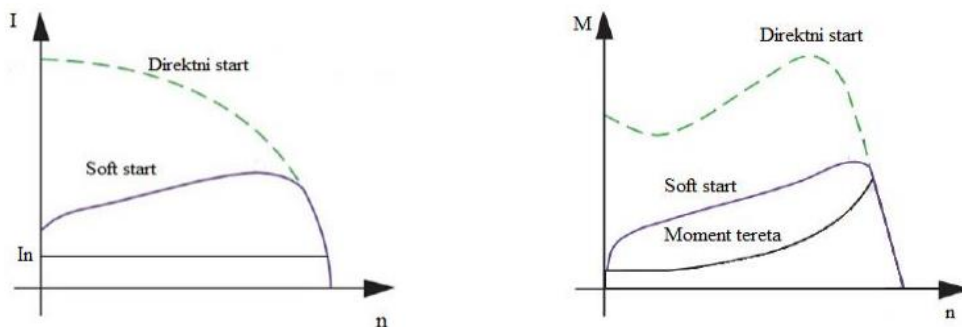
Slika 5.5. Vođenje tiristora u antiparalelnom radu

Pri nazivnoj brzini soft starter se prespaja pomoću sklopnika kako bi se izbjegla disipacija topline na soft starteru i neželjeni gubici. Kod soft startera smanjenjem potezne struje smanjuje se i potezni moment motora čime se produžuje životni vijek motora zbog smanjenja pregrijavanja motora kod čestih pokretanja i zaustavljanja. Smanjenjem momenta smanjuju se i neželjeni udarci na osovinu motora pri pokretanju, pri čemu ležajevi ne trpe velika opterećenja. Prilikom pokretanja potrebno je obratiti pažnju na pokretni moment i moment tereta. U slučaju da soft starter daje prenizak napon tada će pokretni moment biti manji od momenta tereta te neće doći do pokretanja motora.



Slika 5.6. Shema soft startera

Korištenjem soft startera može se regulirati trajanje pokretanja koje najčešće traje do 30 sekundi. Takvim upravljanjem može se ograničiti i maksimalni iznos struje prema motoru koji se podešava na soft starteru ili s nekog udaljenog mjesta.



*Slika 5.7. Ovisnost struje o brzini (lijevo) i ovisnost momenta o brzini vrtnje (desno) kod pokretanja mekim upuštanjem (soft start)*

Soft starteri koriste se za pokretanje motora vrlo velikih snaga, većih od 2MW, najčešće u industrijskim postrojenjima gdje se traži kontrolirano pokretanje. Mogu se koristiti kod trofaznih kaveznih asinkronih motora, trofaznih kolutnih asinkronih motora i za jednofazne asinkrone motore.

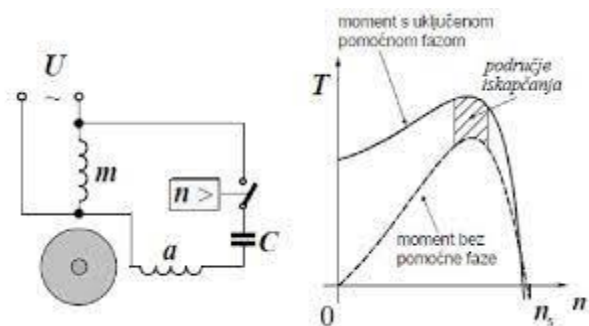


*Slika 5.8. Uređaj za meko pokretanje (soft starter)*

### **5.5. Pokretanje pomoćnom fazom – jednofazni motor**

Jednofazni asinkroni motor sličan je trofaznom motoru samo što ima jednu fazu za rad i drugu (pomoćnu) fazu za pokretanje. Kada bi postojao samo glavni namot, tada bi nastalo polje bilo pulzirajuće, a ne okretno koje je uvjet za pokretanje motora. Namot pomoćne faze smješten je u jednu trećinu utora statora, a glavna faza smještena je u ostale dvije trećine statora. Za nastanak okretnog magnetskog polja potrebno je da su glavni i pomoćni namoti međusobno razmaknuti za  $90^\circ$  i da su struje koje teku u njima fazno pomaknute. Dakle, da bismo dobili fazni pomak struja u seriju sa pomoćnim namotom dodajemo kondenzator, čime ostvarujemo pomak faze za  $90^\circ$  te se stvara okretno magnetsko polje. Postoji nekoliko kombinacija izvedbe s kondenzatorom. Prvi

način je da se pomoćna faza i kondenzator nakon zaleta isključuju, drugi način je da su pomoćna faza i kondenzator trajno uključeni, a treći način je da su pomoćna faza i kondenzator trajno uključeni, a tijekom zaleta je uključen i kondenzator za zalet.



Slika 5.9. Shema motora sa pomoćnom fazom sa kondenzatorom za zalet

Kada motor dosegne 80% nazivne brzine tada se isključuje kondenzator. Kondenzator se može isključiti centrifugalnom sklopkom (smještena na osovini motora), strujnim relejom i elektronički (PTC otpornik ili elektronički tajmer). Način kojim će se pokrenuti motor ovisi o momentu tereta.

## 6.REGULACIJA BRZINE VRTNJE

### 6.1.Regulacija brzine vrtnje promjenom otpora u rotorskom krugu

Regulacija brzine vrtnje promjenom otpora u rotorskom krugu koristi se kod klizno-kolutnih asinkronih motora. Zato što imaju klizne kolute preko kojih je moguće spojiti otpor na rotor motora. Dodavanjem otpora na rotor preko kliznih kolutova mijenja se momentna karakteristika motora, čime se mijenja i brzina vrtnje za neki određeni teret. Takvo upravljanje je jako jednostavno, ali ima neke nedostatke.

Prvi nedostatak su veliki gubici koji se javljaju u rotoru zbog povećanja klizanja prilikom spajanja otpora na rotorski krug. Promjenom brzine vrtnje uz konstantno opterećenje motor uzima iz mreže konstantnu snagu. Pri smanjenoj brzini vrtnje uz konstantno opterećenje klizanje je veće što znači da se dio snage pretvara u gubitke (toplinu). Dakle, ako klizanje iznosi 0,5 tada će gubici iznositi isto koliko i razvijena snaga na osovini motora, što možemo vidjeti iz sljedećeg izraza:

$$P_{dr} = \frac{s}{1-s} \cdot P_{meh} \quad (6.1)$$

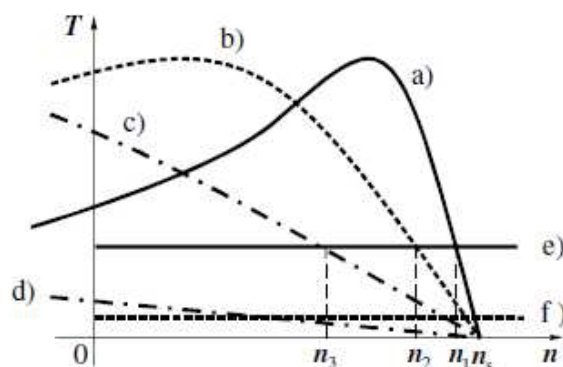
gdje je:

$P_{dr}$  - gubici u radnim otporima u rotorskom krugu [W]

$s$  – klizanje

$P_{meh}$  - mehanička snaga na osovini rotora [W]

Drugi nedostatak je nestabilna radna točka pri malim teretima. Spajanjem dodatnog otpora za veliki moment tereta dobije se velika promjena brzine pri čemu je radna točka stabilna i regulacija se može precizno izvršiti. Nadalje, pri malom momentu tereta s istim priključenim dodatnim otporom dobije se mala promjena brzine, odnosno za veliku promjenu brzine potreban je veliki dodatni otpor. U slučaju s malim priključenim teretom i velikim otporom radna točka nije strogo određena te je teško izvršiti preciznu regulaciju (slika 6.1.).



Slika 6.1. Regulacija dodavanjem otpora u rotorski krug

a), b), c), d) momenti motora i e), f) momenti tereta

## 6.2. Regulacija brzine vrtnje promjenom napona

Regulaciju brzine vrtnje promjenom napona ostvarujemo pomoću tiristorskog pretvarača, koji u svakoj fazi ima antiparalelni spoj dva tiristora. Promjenu napona ostvarujemo promjenom kuta upravljanja tiristorskog pretvarača. Moment asinkronog motora ovisi o kvadratu napona, pa se prema tome mijenja momentna karakteristika. Moment koji razvija motor pri promjeni napona određuje se prema izrazu:

$$M' = \left(\frac{U'}{U}\right)^2 \cdot M \quad (6.2)$$

gdje je:

$M'$  - moment pri promjenjenom naponu [Nm]

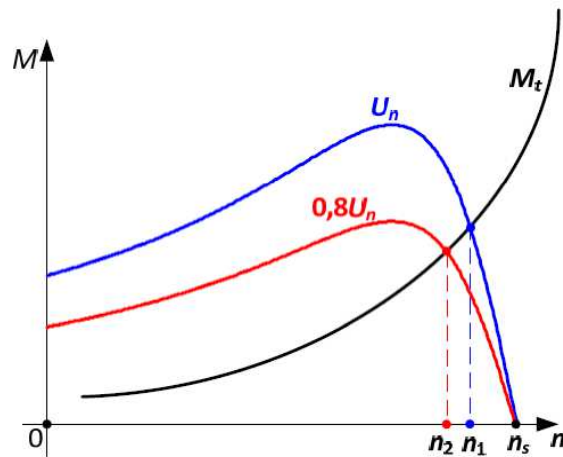
$U'$  - novi napon [V]

$U$  - nazivni napon [V]

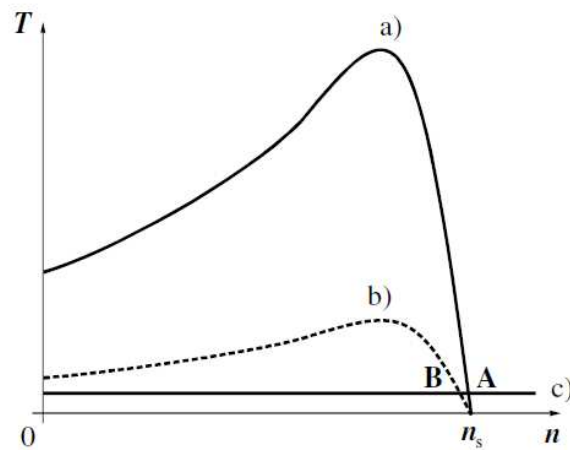
$M$  - moment uz nazivni napon [Nm]

Dakle, ako se na motor dovede upola manji napon od nazivnog, tada će moment motora biti četiri puta manji, pa je i najveći moment koji se može priključiti na motor četiri puta manji od nazivnog. Kada bi moment tereta bio konstantan, a karakteristika motora ima izraženi maksimalan moment kao na slici 6.1, tada promjenom napona ne možemo dobiti značajnu

promjenu brzine, dok je kod kvadratne karakteristike momenta tereta ta promjena brzine izraženija.



Slika 6.2. Momentna karakteristika motora pri promjeni napona uz kvadratnu karakteristiku momenta



Slika 6.3. Momentna karakteristika asinkronog motora pri promjeni napona uz konstantan moment

Prilikom regulacije potrebno je voditi računa da se na motor ne dovede prenizak napon koji će dati pokretni moment manji od momenta tereta. U tom slučaju će motor mirovati. Motor će se pokrenuti samo ako u početnom trenutku vrijedi:

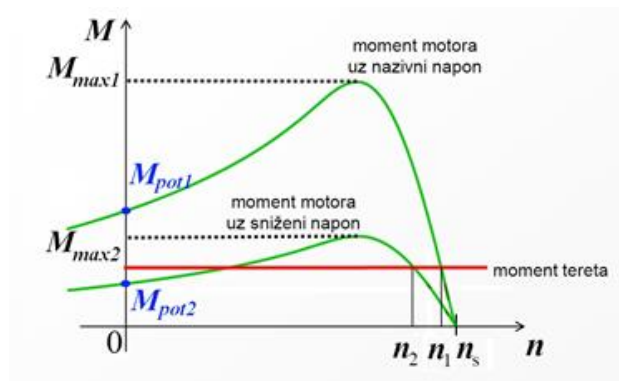
$$M_{\text{pot}} > M_{\text{tereta}}$$



Sa slike 6.4 možemo vidjeti da je pri sniženom naponu potezni moment manji od momenta tereta pa možemo zaključiti da vrijedi:

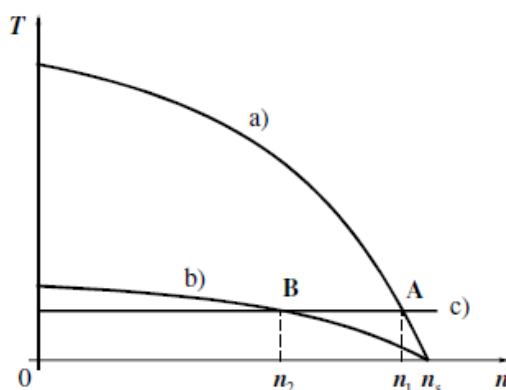
$$M_{pot2} < M_{tereta}$$

U tom slučaju motor se neće pokrenuti, ali će iz mreže uzimati veliku poteznu struju koja će biti i do 8 puta veća od nazivne, a motor će se pregrijavati sve dok zaštita ne proradi.



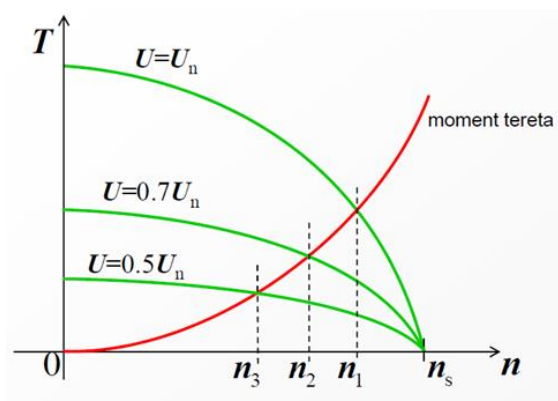
Slika 6.4. Momentna karakteristika sa istaknutim poteznim momentom

Ako momentna karakteristika motora nema izražen maksimalan moment (slika 6.5.), tada se sa smanjenjem napona radna točka pomiče iz A u B, pri čemu se povećava klizanje motora. Povećavanjem klizanja rastu gubici na rotoru koji zagrijavaju motor. Smanjenjem brzine smanjuje se hlađenje motora zato što se ventilator koji služi za hlađenje nalazi na osovini motora. Zbog prekomjernog zagrijavanja uz snižen napon potrebno je smanjiti dozvoljen moment tereta koji je moguće spojiti na motor.



Slika 6.5. Karakteristika motora pogodna za regulaciju: a) moment motora uz nazivni napon, b) moment motora uz sniženi napon, c) moment tereta

Ovakva regulacija brzine vrtnje je pogodna za pogone ventilatora kod kojih je momentna karakteristika kvadratična (slika 6.6). Smanjenjem napona radna točka se pomiče od A do C čime se postiže velika promjena brzine vrtnje. U točki C napon je upola manji, a zbog kvadratične karakteristike smanjio se i moment tereta što smanjuje zagrijavanje motora.



Slika 6.6. Regulacija brzine vrtnje promjenom napona u pogonu ventilatora

### 6.3. Regulacija brzine vrtnje promjenom frekvencije

Regulacija brzine asinkronog motora promjenom frekvencije omogućuje regulaciju u vrlo širokom opsegu. Promjenom frekvencije izvora kod asinkronog motora mijenja se i magnetski tok, što utječe na vanjsku karakteristiku motora. Promjenom frekvencije uz konstantan napon doći će do promjene magnetske indukcije, a time i promjene magnetskog toka. Povećanje magnetskog toka izaziva zasićenje magnetskog kruga što nije dozvoljeno, a smanjenje magnetskog toka smanjuje moment motora što ima negativan utjecaj. Dakle, uz promjenu frekvencije potrebno je i mijenjati iznos napona da bi se dobila odgovarajuća mehanička karakteristika motora. Pri promjeni frekvencije i napona magnetski tok mora ostati konstantan.

$$\Phi = \frac{\sqrt{2}E_s}{2\pi f_s N_s k_{ws}} = konst. \quad (6.3)$$

gdje je:

$\Phi$ -magnetski tok [Wb]

$E_s$ -inducirani napon [V]

$f_s$ -frekvencija [Hz]

$N_s$ -broj zavoja

$k_{ws}$ -konstanta

Iz prethodnog izraza dobivamo:

$$\frac{E_s}{f_s} = konst. \quad (6.4)$$

Promjenom napona i frekvencije mijenjat će se i snaga na osovini motora prema sljedećem izrazu:

$$P_m = M_m \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} \quad (6.5)$$

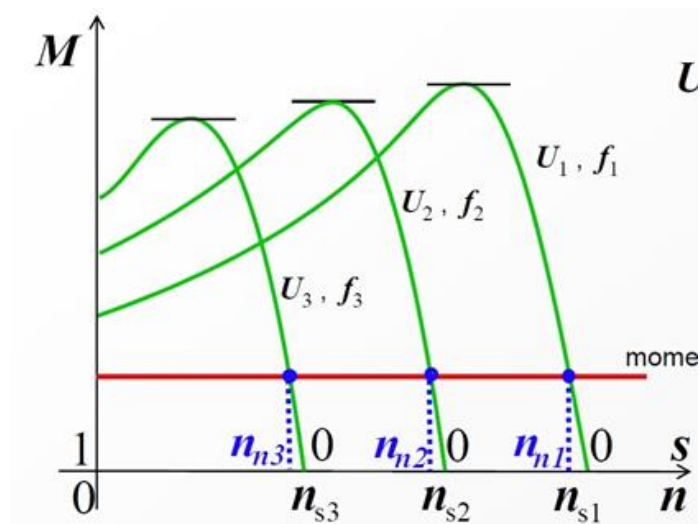
gdje je:

$P_m$  - snaga motora [W]

$M_m$  - moment motora [Nm]

$f$  - frekvencija [Hz]

$p$  - broj pari polova



Slika 6.7 Momentna karakteristika motora u ovisnosti o naponu i frekvenciji

Smanjenjem frekvencije i napona radna točka se pomiče u lijevo, pritom klizanje ostaje malo što znači da ako se točka pomakne iz krivulje s frekvencijom  $f_1$  u krivulju s frekvencijom  $f_2$  tada će brzina iznositi  $n_{m2}$ . To znači da će klizanje biti jako malo jer je mala razlika između nazivne brzine i sinkrone brzine  $n_{s2}$ . U tom slučaju motor ostaje raditi u optimalnom režimu rada zbog malog klizanja te su gubici u rotoru mali, pa je i zagrijavanje malo.

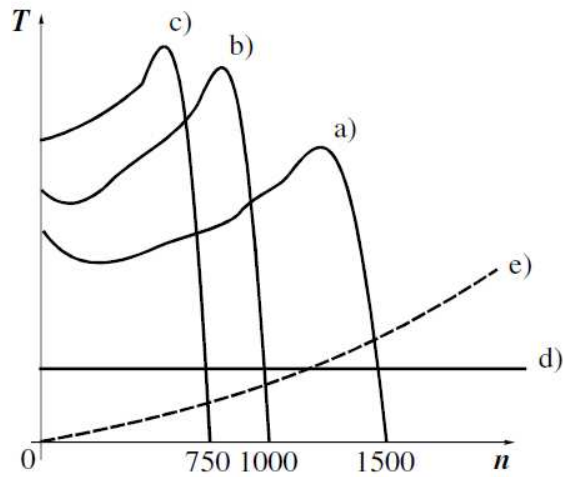
Prilikom regulacije napon možemo mijenjati od nule do nazivne vrijednosti, ako prekoračimo nazivnu vrijednost doći će do velikih naponskih naprezanja i preopterećenja. Povećanje frekvencije iznad nazivne vrijednosti nije dozvoljeno zbog mehaničkih razloga i promjena mehaničke karakteristike motora. Da bi se dobila frekvencija upravljanja iznad nazivne frekvencije uz konstantan magnetski tok jedini način je da povećamo napon iznad nazivne vrijednosti, a to nije dozvoljeno. Pri nazivnom naponu uz povećanje frekvencije dolazi do smanjenja magnetskog toka i momenta motora, to područje zovemo područje konstantne snage. Područje gdje se napon povećava od nule do nazivne vrijednosti uz povećanje frekvencije i konstantan magnetski tok zovemo područje konstantnog toka. Kod ovakvog upravljanja koriste se pretvarači frekvencije i napona.

#### **6.4. Višebrzinski motori**

Višebrzinski motori izvode se s više namotaja na statoru, a zasnivaju se na promjeni sinkrone brzine. Namoti mogu biti smješteni u iste utore na statoru ili u zasebne pri čemu se povećavaju dimenzije motora. Postoji nekoliko izvedbi statora:

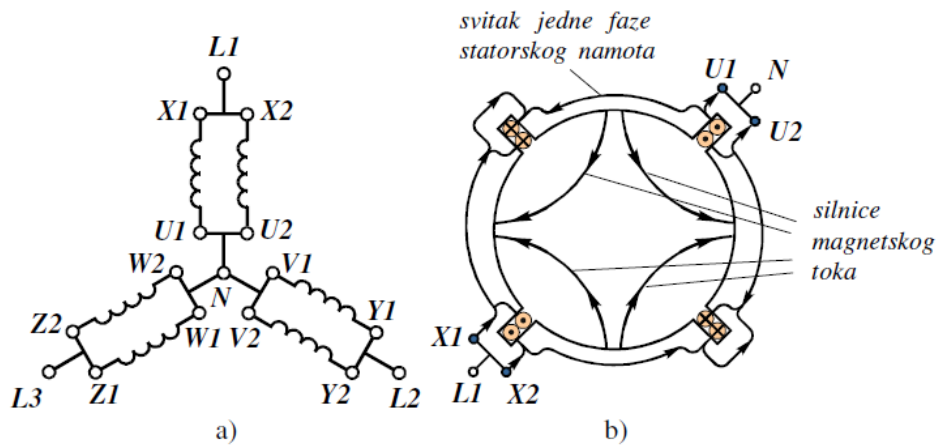
- odvijeni zasebni namoti za svaku brzinu
- Dahlanderov spoj (preklapanjem polova)
- kombinacija zasebnih namota i Dahlanderovog spoja

Kod višebrzinskih motora namot je uvijek kavezni zbog mogućnosti njegovog prilagođavanja na proizvoljni broj polova. Kod motora sa zasebnim namotima za određenu brzinu spaja se određeni namot pri čemu su ostali namoti isključeni.

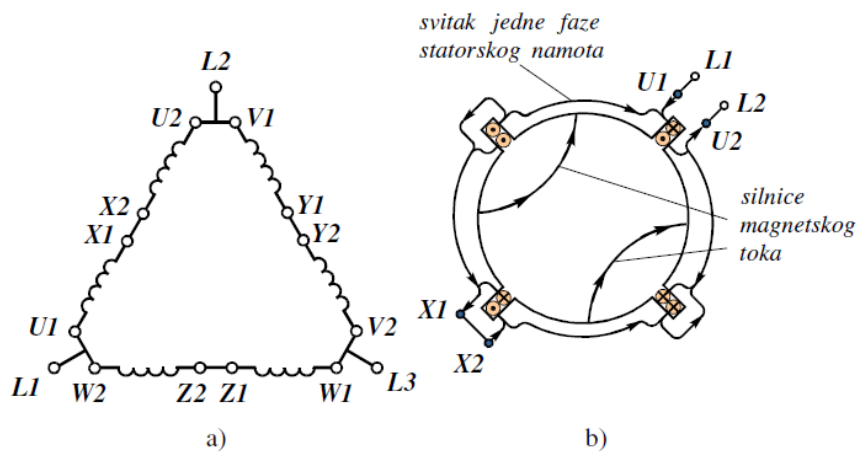


Slika 6.6. Karakteristika višebrzinskog motora a) 4 polni namot b) 6 polni namot c) 8 polni namot d) moment tereta c) moment tereta ventilatora

Motor s preklapanjem polova spaja se po Dahlanderovim spojem. Takav motor ima fazne namote podijeljene na dva dijela koji se spajaju na nekoliko načina: zvijezda, trokut, dvostruka zvijezda. Statorski namot je projektiran tako da se prespajanjem dobiva različiti broj polova. Dahlanderov spoj koji se najčešće koristi, spaja se u omjeru broja polova 1:2. Za četveropolni motor grane moraju biti spojene paralelno, a za dvopolni u seriju.



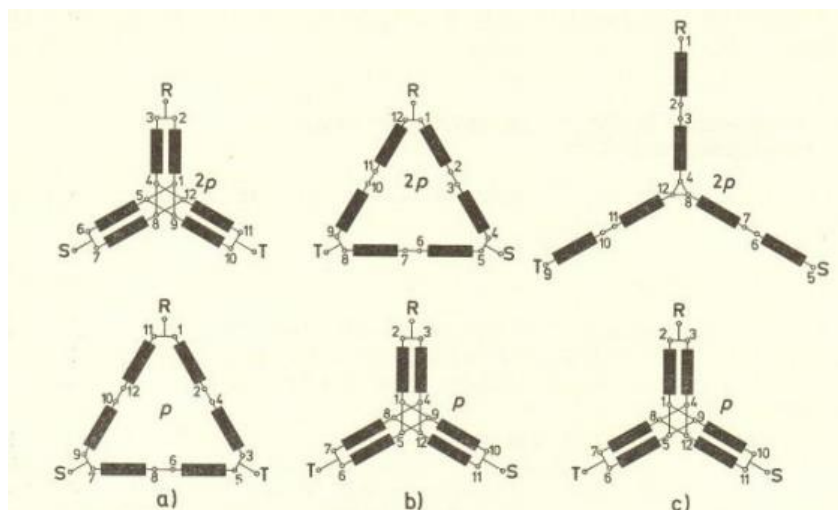
Slika 6.7. Spoj za 4 polni namot a) spoj namota u zvijezdu, b) shema jedne faze namota



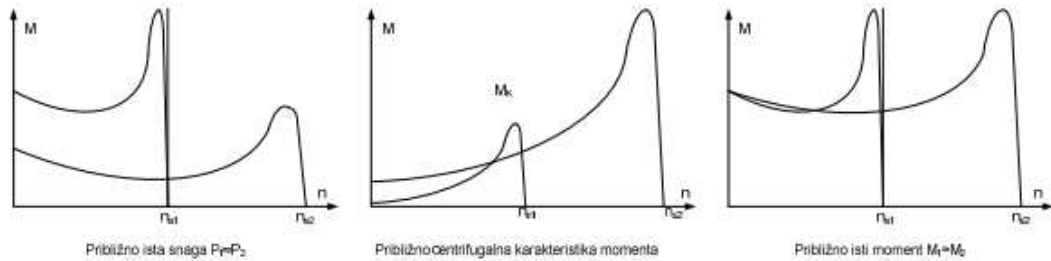
Slika 6.8. Spoj za 2 polni namot a) spoj namota u trokut, b) shema jedne faze namota

Takvi motori koriste se za različite namjene pa tako svaki mehanizam zahtijeva drugačiju momentnu karakteristiku motora koja se postiže različitim spojem namota.

Kada je potrebna približno jednaka snaga tada se namoti spajaju kao na slici(a), za konstantan moment motora potrebno je namote spojiti kao na slici(b), a kada je potrebna približno centrifugalna karakteristika tada se namoti spajaju kao na slici(c).



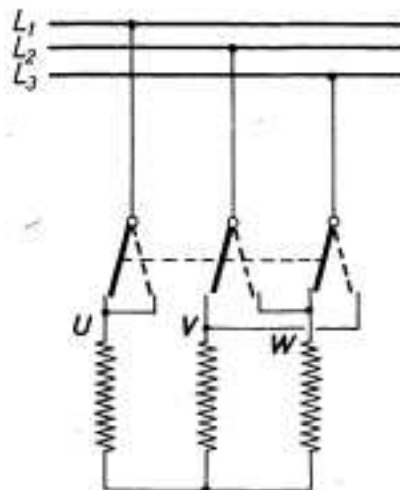
Slika 6.9. Dahlanderov spoj za a) približno jednaku snagu, b) konstantan moment, c) približno centrifugalnu karakteristiku



Slika 6.10. Momentna karakteristika za svaki spoj namota

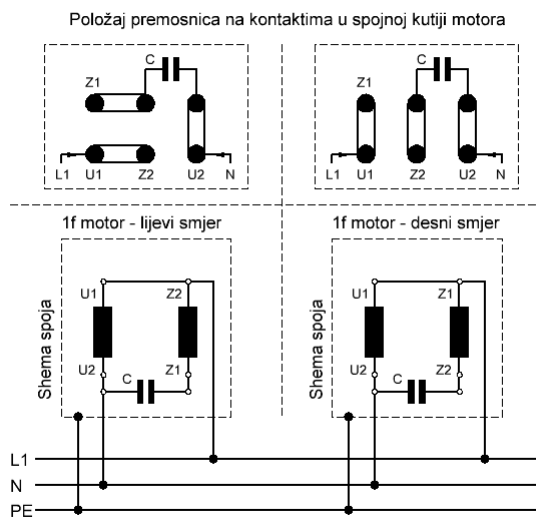
## 6.5.Reverziranje

Reverziranje smjera vrtnje motora ostvaruje se zamjenom redoslijeda faza. Promjenom redoslijeda faza mijenja se smjer vrtnje okretnog magnetskog polja. Naponi mreže uvijek kasne jedan za drugim za  $2\pi/3$ . Okretno magnetsko polje vrti se uvijek od namota u kojem struja prethodi prema namotu u kojem struja zaostaje. Kada se spoje faze L1 sa U, L2 sa V, L3 sa W, tada će se okretno magnetsko polje kretati iz osi namota U u V, a zatim u os namota W. Kada bi se zamijenile faze L2 i L3 tada bi se okretno magnetsko polje kretalo iz osi namota U u os namota W, a zatim u V čime se okrenuo smjer vrtnje okretnog magnetskog polja. Reverziranje ostvarujemo sklopkom za reverziranje prikazane na slici 6.11.



Slika 6.11. Prikaz reverziranja smjera trofaznog asinkronog motora

Kod jednofaznog asinkronog motora promjena smjera vrtnje ostvaruje se tako da se jednom od dva namota (glavni i pomoćni) zamjene priključci kao što je prikazano na slici 6.12.



Slika 6.12. Shema reverziranja smjera vrtnje jednofaznog motora

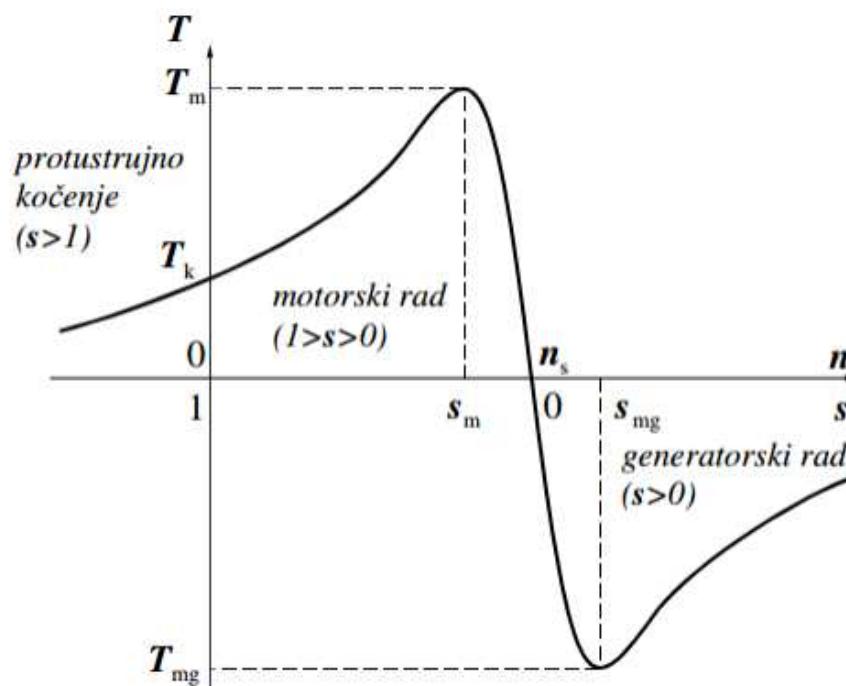


## 7. PODRUČJA RADA I KOČENJE ASINKRONOG STROJA

### 7.1. Područja rada asinkronog stroja

U pogonima s asinkronim strojevima često se zahtijevaju različiti režimi rada. Tako razlikujemo:

- motorski rad
- generatorski rad
- protustrujno kočenje



Slika 7.1. Područja rada asinkronog stroja

Kada asinkroni stroj uzima električnu energiju iz mreže i pretvara je u mehaničku na osovini stroja tada on radi kao motor. U motorskom režimu rada klizanje iznosi  $0 < s < 1$ . Tada se rotor vrti u smjeru okretnog magnetskog polja i manjom brzinom od sinkrone.

Ako asinkroni stroj spojimo na krutu mrežu te ga pokrećemo nekim vanjskim momentom tada će raditi nadsinkrono odnosno tada će brzina vrtnje biti veća od sinkrone brzine te će stroj raditi u generatorskom načinu rada. Klizanje će u tom slučaju biti veće od nule ( $s > 0$ ). Stroj će i dalje uzimati induktivnu jalovu energiju iz mreže da bi se moglo stvoriti magnetsko polje, ali će davati u mrežu radnu snagu.

Ako stroj vrtimo u suprotnom smjeru, a moment je pozitivan, ali djeluje suprotno od vrtnje stroja, tada će se sva snaga koju motor uzima iz mreže potrošiti na gubitke u stroju. Stroj u tom slučaju radi u protustrujnom kočenju uz klizanje veće od 1 ( $s > 1$ ).

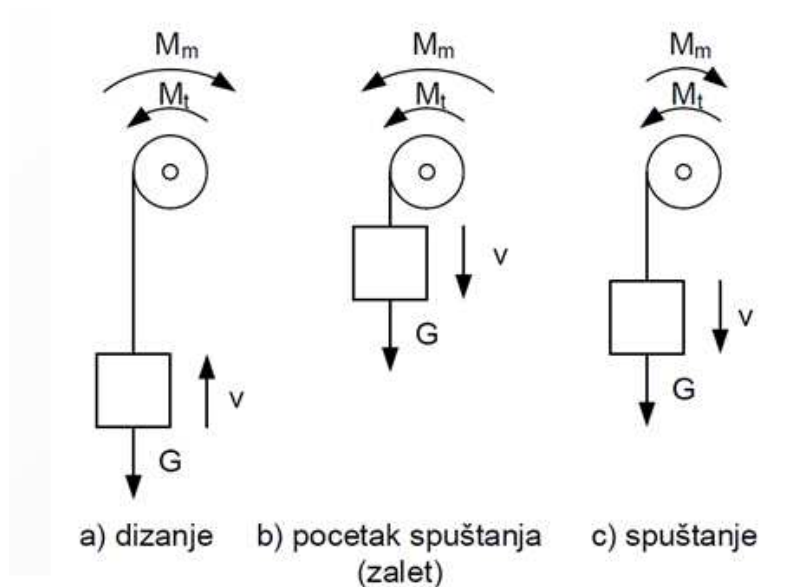
## 7.2. Kočenje asinkronim strojem

Asinkroni stroj može kočiti u dva režima rada, a to su:

- generatorski rad (generatorsko kočenje)
- protustrujno kočenje

### 7.2.1. Generatorsko kočenje

Kod generatorskog kočenja stroj se pokreće nekim vanjskim momentom preko osovine, vrti se nadsinkrono te pretvara mehaničku energiju u električnu. Primjer takvog kočenja je dizalica ili električni automobil na nizbrdici. Kod kretanja automobila uzbrdo moment motora savladava moment automobila koji su suprotnog smjera, pa automobil ubrzava do neke određene brzine kada je ona konstantna. Kada se automobil kreće nizbrdo tada se brzina stroja povećava, a kada ta brzina prijeđe sinkronu brzinu stroja, tada će stroj prijeći u generatorski način rada (generatorsko kočenje) i počinje negativnim momentom kočiti automobil, pa će davati energiju u mrežu. Isti princip generatorskog kočenja vrijedi i za dizanje (uzbrdica) i spuštanje (nizbrdica) tereta.



Slika 7.2. Primjer generatorskog režima rada kod dizanja i spuštanja tereta

### 7.2.2. Protustrujno kočenje

Protustrujno kočenje je iz energetskog stajališta nepovoljno jer stroj uzima električnu snagu iz mreže i mehaničku energiju na osovini i pretvara tu energiju u gubitke odnosno toplinu. Najveći dio energije troši se na gubitke na rotorskom namotu i na dodatnim otporima. Primjer ovakvog kočenja je kada se stroju promjeni smjer vrtnje. Ako neki pogon zahtijeva promjenu smjera vrtnje potrebno je najprije isključiti motor iz mreže te pričekati da se zaustavi i onda ga priključiti s promijenjenim redoslijedom faza. Kada bi se suprotni smjer vrtnje uključio prije nego se motor zaustavi tada će se zbog promjene redoslijeda faza novonastalo okretno magnetsko polje vrtjeti na jednu stranu, a motor na drugu stranu što znači da je stroj u protustrujnom kočenju. To će se događati tako dugo dok se motor ne zaustavi, nakon čega će promijeniti smjer vrtnje. Kod protustrujnog kočenja brzina rotora bit će negativna a klizanje veće od 1.

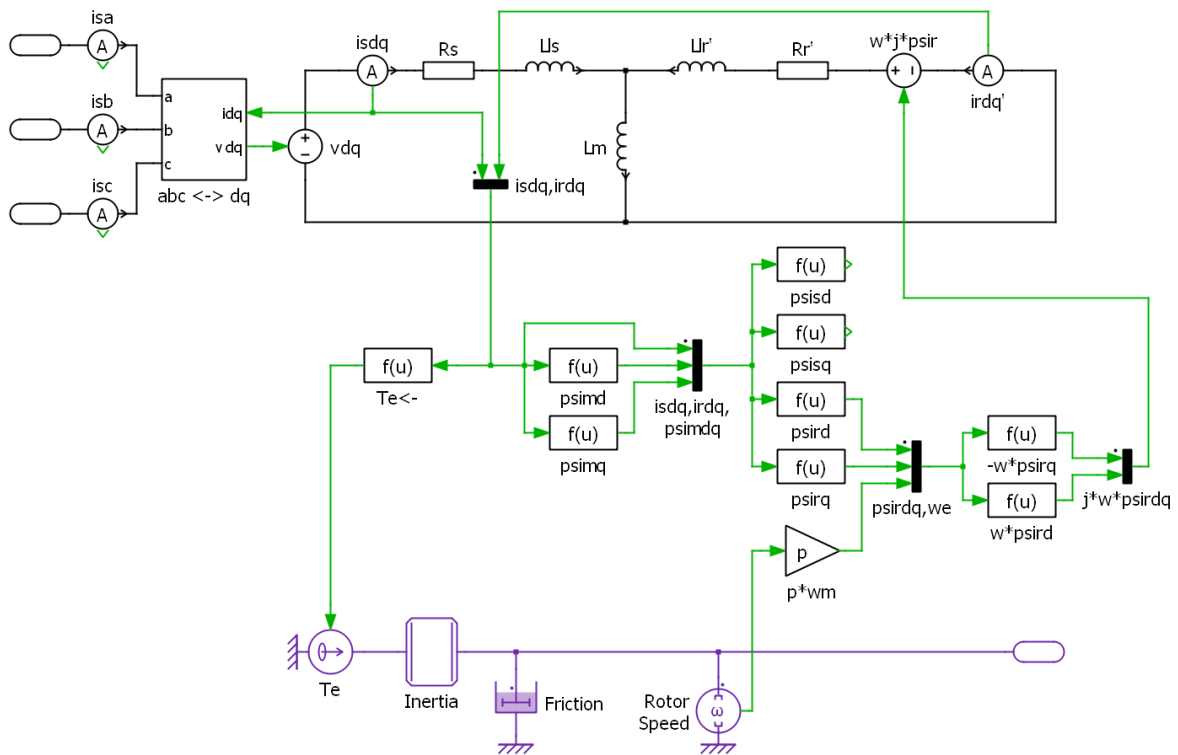
## **8. SIMULACIJA KARAKTERISTIKA**

### **8.1. Općenito o PLECS-u**

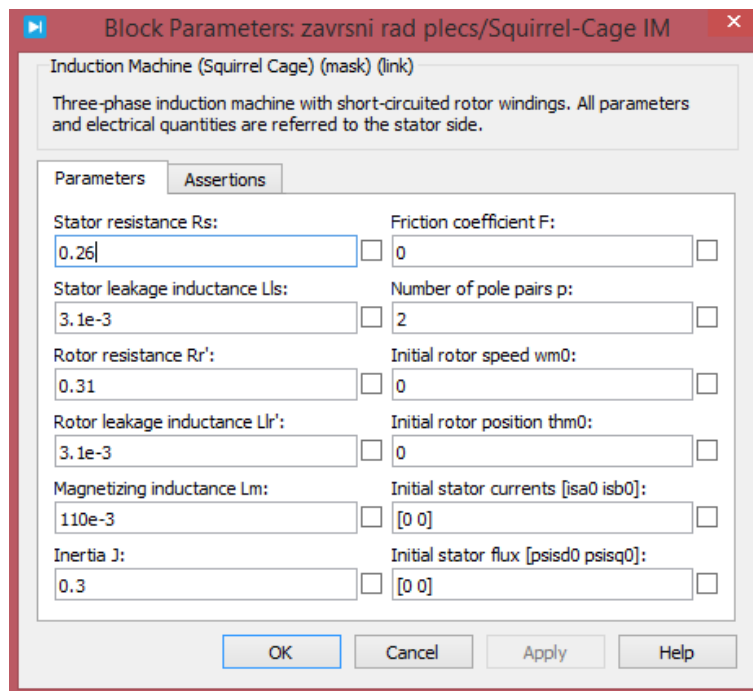
PLECS (Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation) je alat za simulaciju električnih sustava, a posebno za sustave energetske elektronike. U PLECS-u je još moguće simulirati mehanička i toplinska stanja sustava, ali prvenstveno je dizajniran za simulaciju u elektrotehnici. Dostupna su dva izdanja softvera: PLECS Blockset i PLECS Standalone. PLECS Blockset je dizajniran tako da se koristi zajedno sa MATLAB/Simulink-om, dok je PLECS Standalone neovisan o drugim softverima. Kod PLECS Blockset upravljačke petlje se kreiraju u Simulinku, a električni krugovi se modeliraju u PLECS-u.

### **8.2. Simulacija dinamičke i statičke karakteristike**

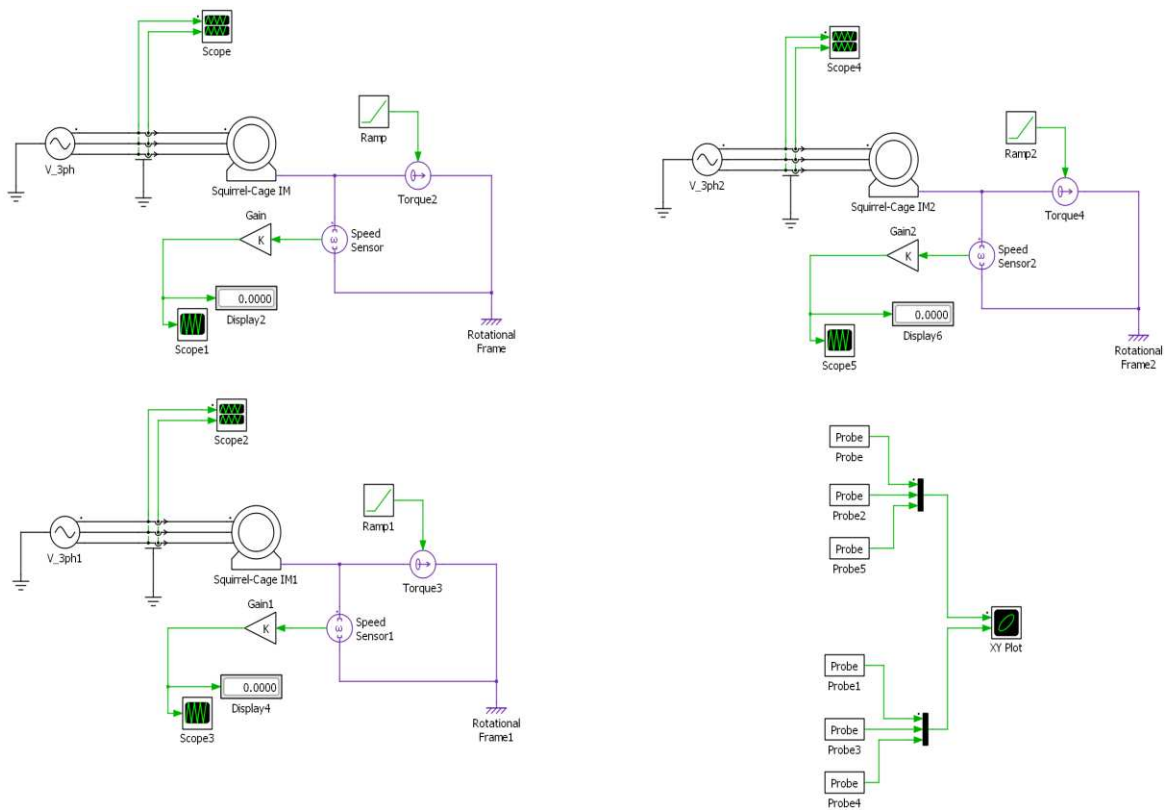
Simulacija karakteristika će se izvršiti u programskom paketu PLECS. Simulacija će obuhvatiti sve navedene vrste regulacije brzine vrtnje. Za svaku će biti prikazana dinamička i statička karakteristika, te će se ukratko objasniti što se događa s karakteristikom. Vrijednosti parametara mreže i asinkronog motora s kojima će se izvršiti simulacija dani su u nastavku. Asinkroni motor sa sheme ima instaliran regulacijski krug što je prikazano na slici (8.1.). Sa slike je vidljivo da je motor već spojen na regulacijski sustav. Ljubičastom bojom na shemi označen je mehanički dio stroja, odnosno moment koji se dovodi na motor. Na dinamičkoj karakteristici moguće je vidjeti prijelazne pojave koje se javljaju prilikom pokretanja motora.



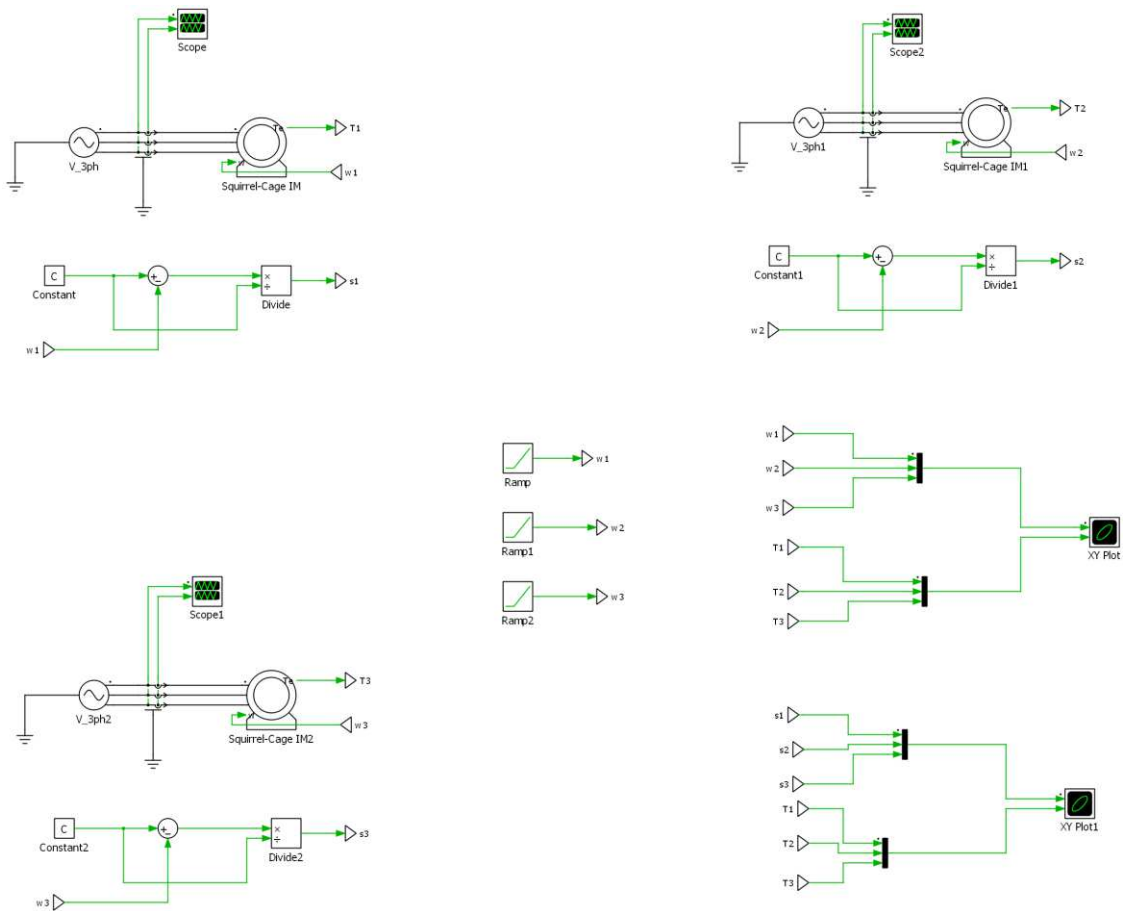
Slika 8.1. Nadomjesna shema asinkronog motora u programskom paketu PLECS



Slika 8.2. Parametri asinkronog motora korišteni u simulaciji



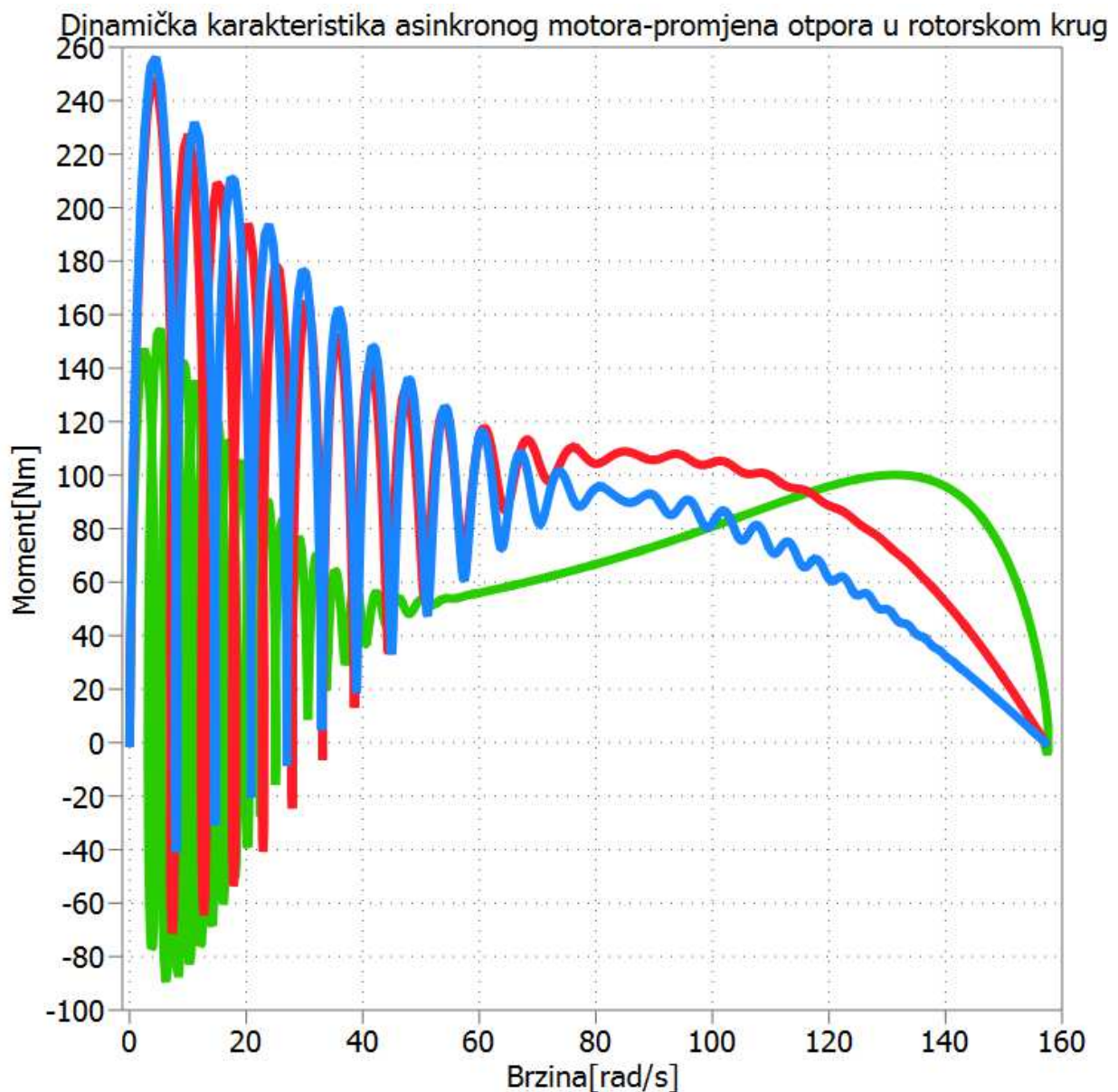
Slika 8.3. Shema spoja za simulaciju dinamičke karakteristike



Slika 8.4. Shema spoja za simulaciju statičke karakteristike

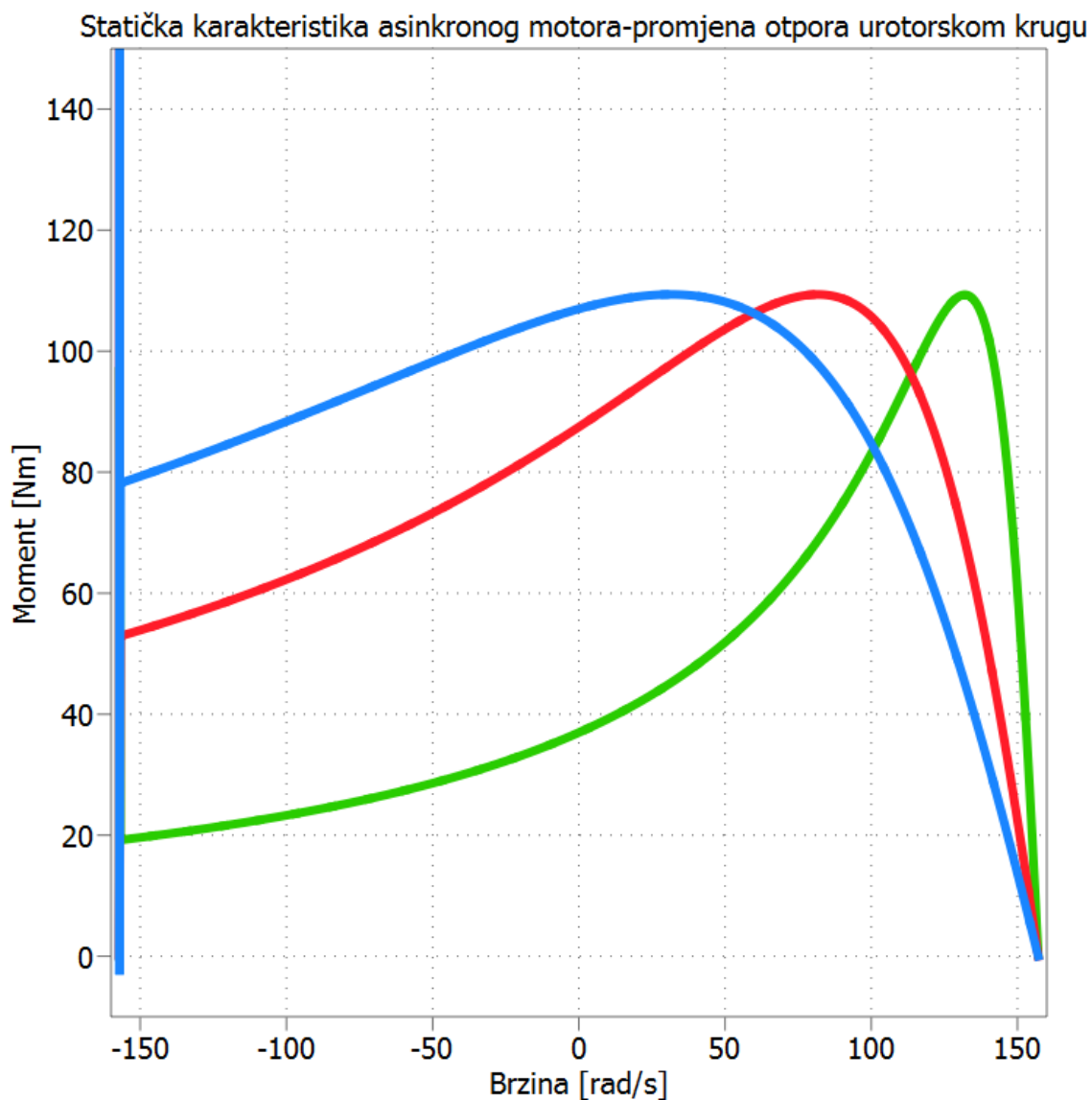
### 8.2.1. Promjena karakteristika motora promjenom otpora u rotorskom krugu

Promjena otpora u rotorskom krugu koristi se u pogonima s kliznokolutnim asinkronim motorima zbog toga što su namoti izvedeni s kliznih prstenova na koje je moguće spojiti dodatan otpor. U ovoj simulaciji je prikazana promjena karakteristike povećanjem otpora rotora. Otpor rotora bez dodanog otpora je  $R_r = 0.31$  što prikazuje zelena krivulja. Uz povećanje za 3 puta dobivamo crvenu karakteristiku, a za povećanje za 5 puta dobivamo plavu karakteristiku.



Slika 8.5. Dinamička karakteristika asinkronog motora pri promjeni otpora rotora

Prilikom povećanja otpora u rotorskom krugu kliznokolutnog asinkronog motora dobivamo veći potezni moment što je jako korisno kod tereta s velikim momentom. Otpori su priključeni samo prilikom zaleta motora nakon čega se oni isključuju. Iz karakteristike možemo vidjeti da se prekretni moment ne mijenja, a klizanje se povećava s porastom otpora rotora.

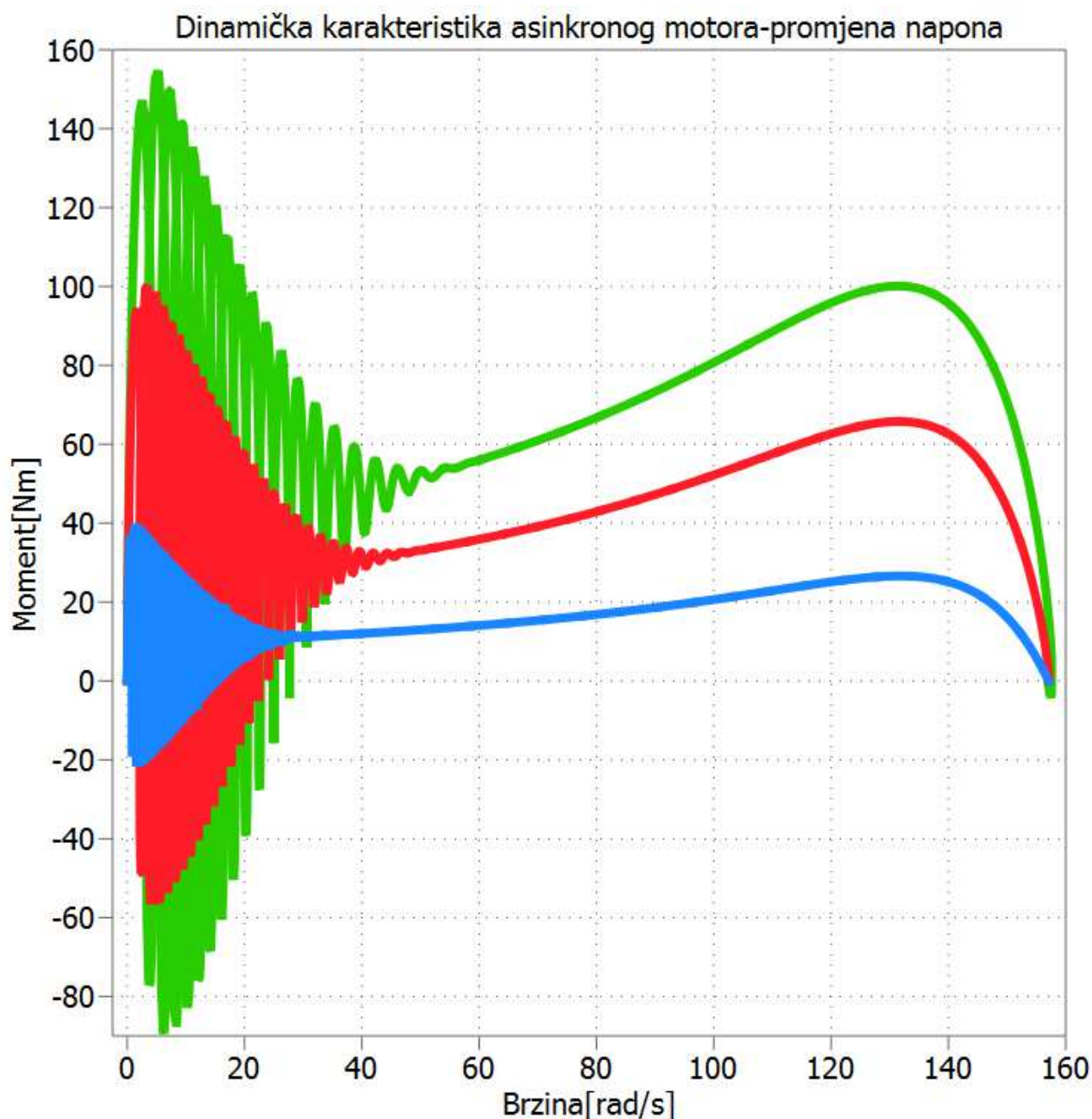


Slika 8.6. Statička karakteristika asinkronog motora pri promjeni otpora rotora



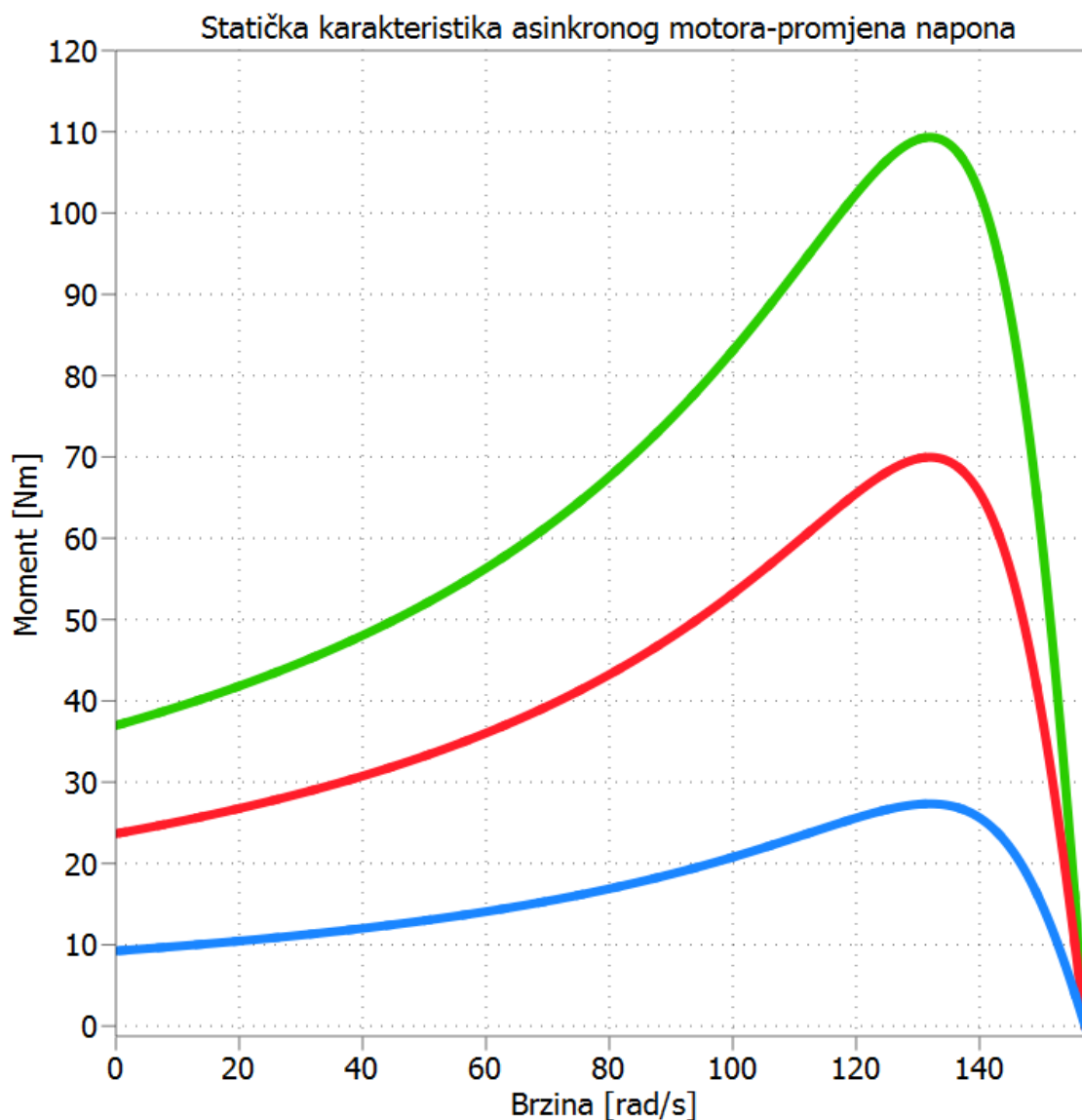
### 8.2.2. Promjena karakteristika promjenom napona napajanja

Simulacija promjene dinamičke i statičke karakteristike izvršena je na način da se smanjuje napon za 50% i za 20%. Zelena krivulja je dobivena uz nazivni napon, crvena krivulja uz smanjen napon za 20%, dok plava prikazuje 50% niži napon od nazivnog.



Slika 8.7. Dinamička karakteristika asinkronog motora pri promjeni napona napajanja

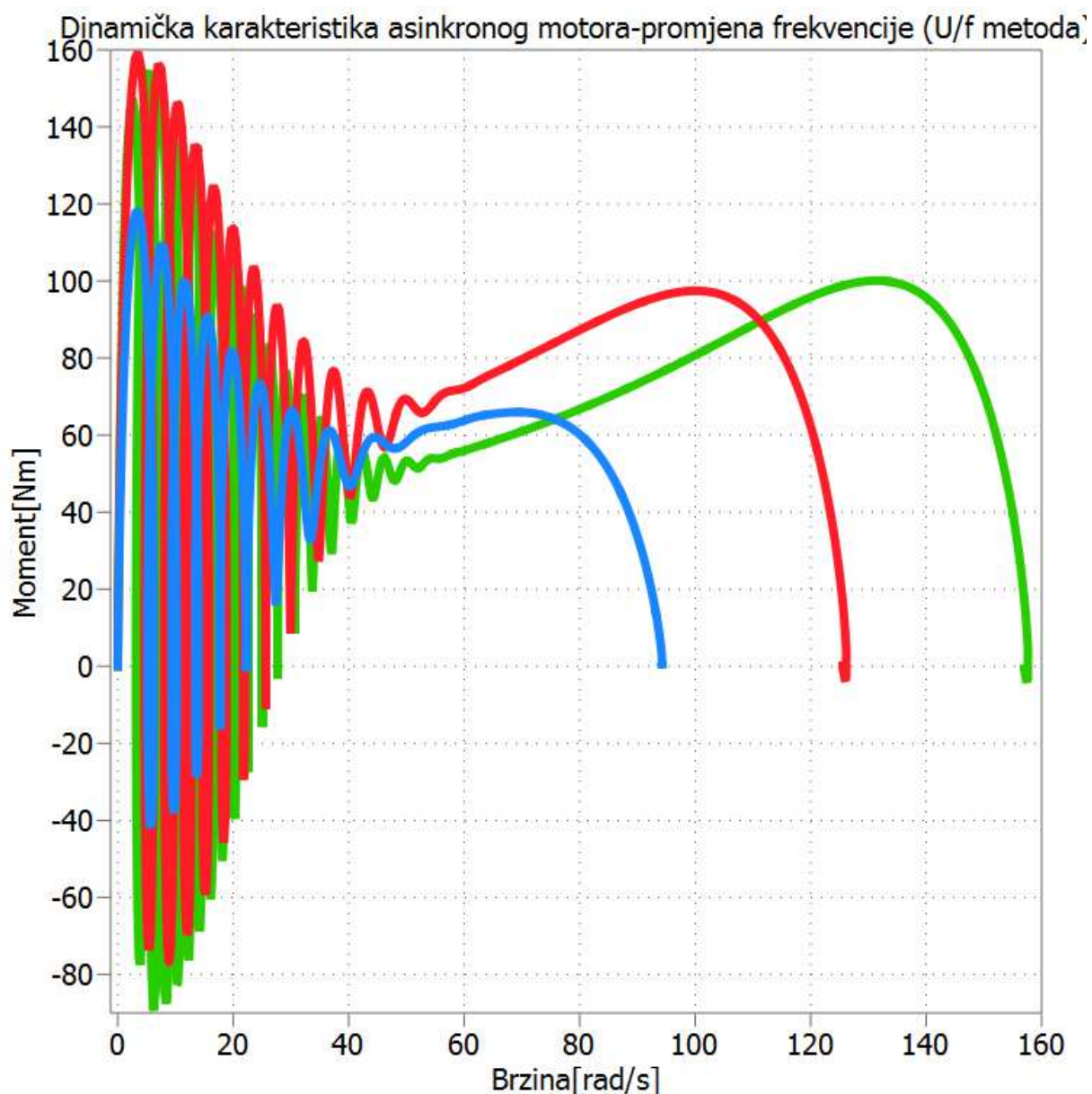
Moment asinkronog motora ovisi o kvadratu napona što znači da se za upola manji napon uz istu brzinu razvije četiri puta manji moment. Promjenom napona napajanja prekretni moment se smanjuje isto kao i potezni moment, dok se prekretno klizanje ne mijenja s promjenom napona. Ovakav način regulacije je pogodan za terete manjeg momenta koji nemaju konstantnu vrijednost momenta. Prilikom korištenja ove metode potrebno je voditi računa da se napon ne smanji na prenisku vrijednost jer u protivnom će potezni moment motora pasti na vrijednost nižu od momenta tereta te će motor ostati u stanju mirovanja i vući će struju koja će zagrijavati motor. Ako ta struja duže vrijeme zagrijava motor tada će doći do uništenja namotaja unutar motora.



Slika 8.8. Statička karakteristika asinkronog motora pri promjeni napona napajanja

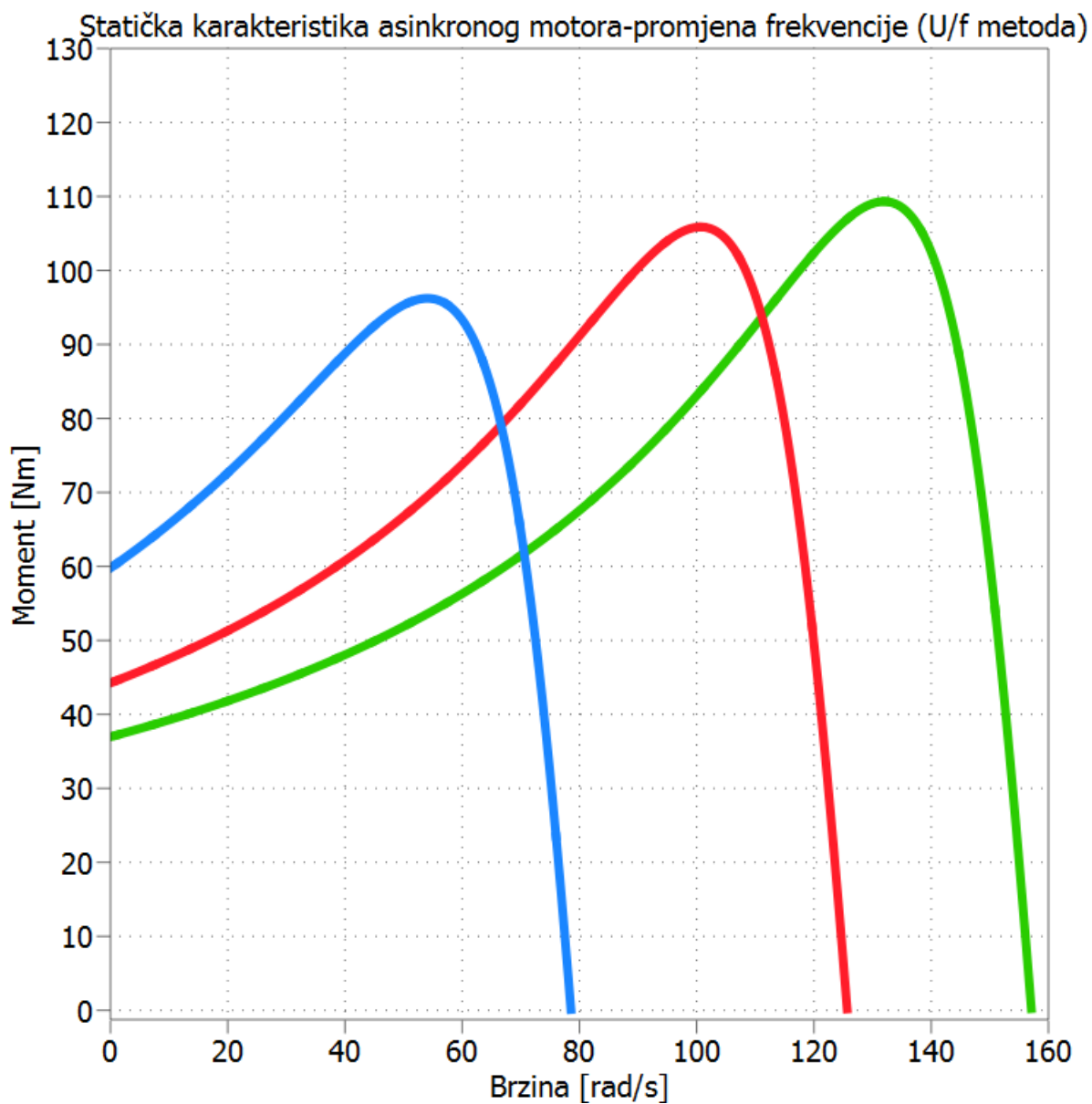
### 8.2.3. Promjena karakteristika promjenom frekvencije

Kod regulacije brzine promjenom frekvencije mijenja se i napon (U/f metoda) s ciljem da se očuva magnetski tok konstantnim, u protivnom će doći da zasićenja željezne jezgre. Prilikom simulacije za dobivanje crvene krivulje napon je smanjen za 20%, a frekvencije iznosi 40 Hz. Za dobivanje plave karakteristike napon je smanjen za 50%, a frekvencija je podešena na 30 Hz.



Slika 8.9. Dinamička karakteristika asinkronog motora pri promjeni frekvencije i napona

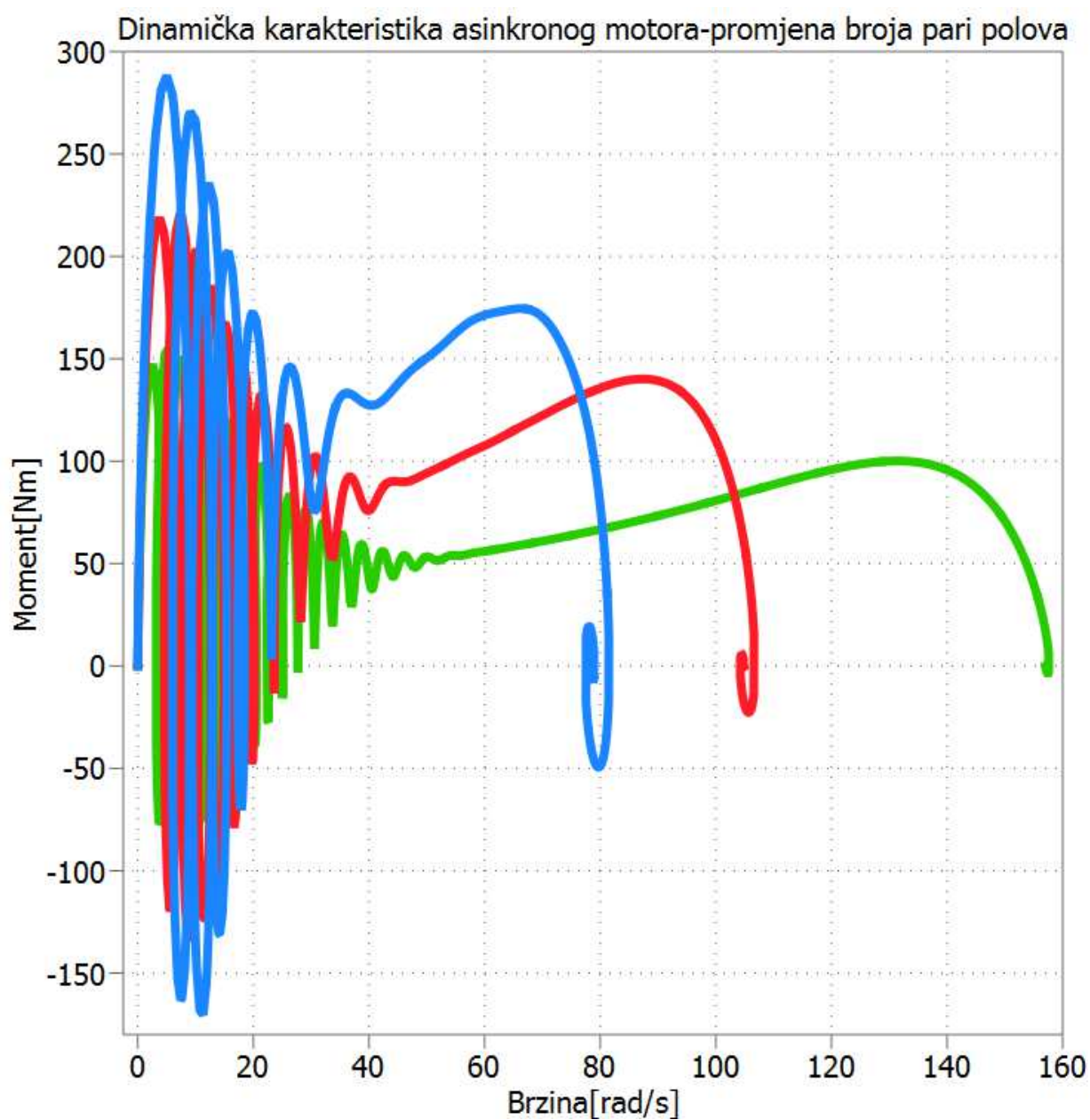
Prilikom promjene napona i frekvencije s prikazanih karakteristika vidljivo je da se kod smanjenja frekvencije i napona smanjuje prekretni moment, dok se potezni moment povećava kao i prekretno klizanje. Ovakav tip regulacije se danas najčešće upotrebljava, a koristi se kod pogona gdje je potreban veliki raspon regulacije brzine.



Slika 8.10. Statička karakteristika asinkronog motora pri promjeni frekvencije i napona

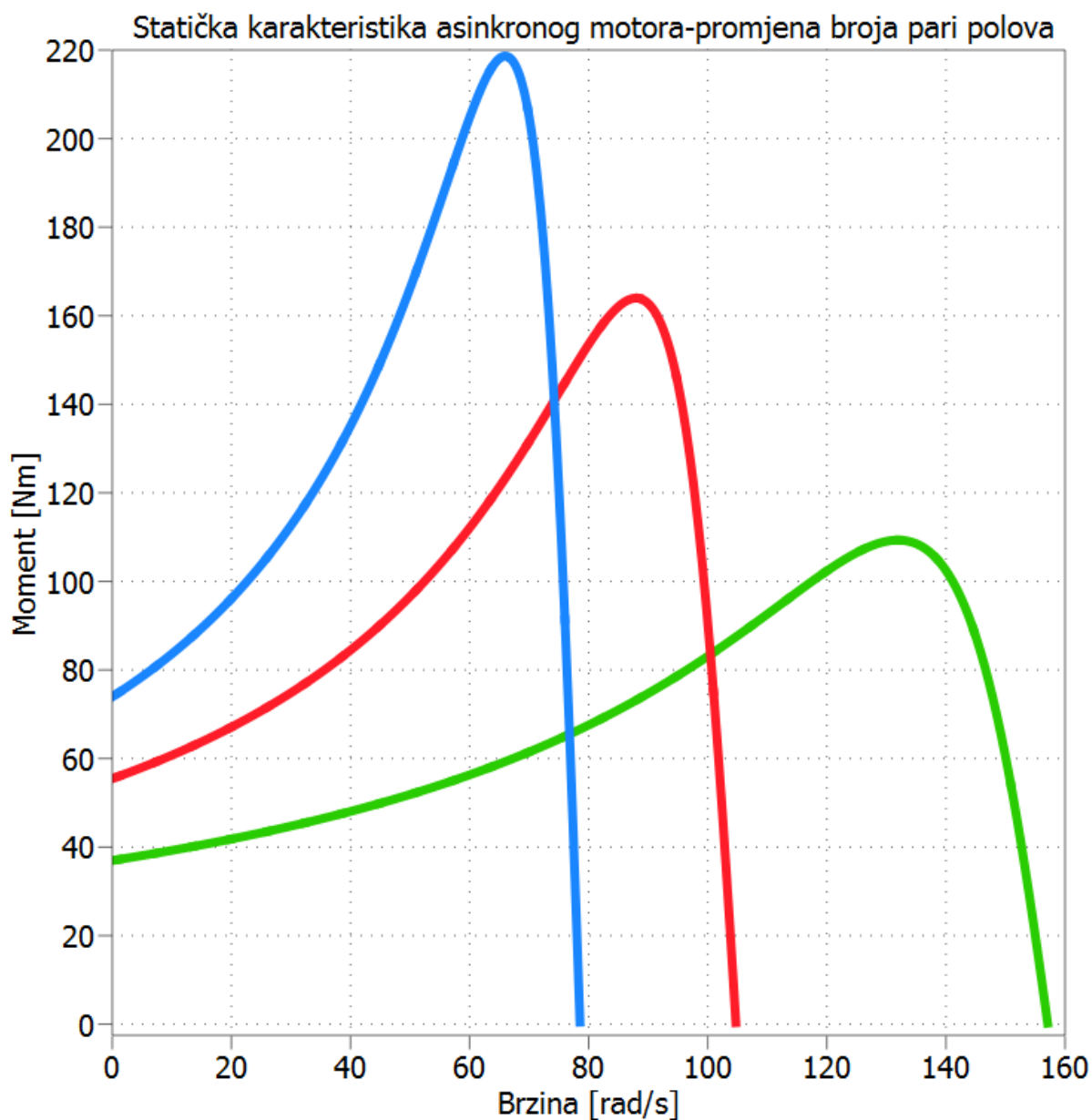
#### 8.2.4. Promjena karakteristika promjenom broja pari polova

Izvršena je simulacija promjene broja pari polova. Zelena krivulja na slici prikazuje motor s dva para polova, crvena karakteristika prikazuje motor s tri para polova dok plava prikazuje motor s četiri para polova.



Slika 8.11. Dinamička karakteristika asinkronog motora pri promjeni broja pari polova

Prilikom promjene broja pari polova s prikazanih momentnih karakteristika vidljivo je da se prekretni moment povećava kao i potezni moment. Kod ovakve regulacije brzine vrtnje prekretno klizanje se neće promijeniti bez obzira mijenja li se broj pari polova ili ne.



Slika 8.12. Statička karakteristika asinkronog motora pri promjeni broja pari polova

## 9. ZAKLJUČAK

Kod pokretanja asinkronih motora, motor vuče iz mreže poteznu struju koja je i do 8 puta veća od nazivne. Da bi se spriječio utjecaj tako velike struje na mrežu koriste se različiti načini pokretanja motora. Motore jako male snage moguće je direktno spojiti na mrežu, dok se motori velikih i srednjih snaga spajaju na mrežu pomoću preklopke zvijezda trokut ili na neki složeniji sustav pokretanja kao što je soft starter ili pomoću autotransformatora.

Regulacija brzine vrtnje ostvaruje se promjenom otpora u rotorskom krugu, promjenom napona napajanja, promjenom frekvencije ( $U/f$  metoda) i promjenom broja pari polova. Promjenom otpora u rotorskom krugu dobije se veliki potezni moment, ali gubici na rotoru su veliki zbog spajanja dodatnog otpora. Unatoč raznim načinima regulacije danas najčešći i najefikasniji način upravljanja je regulacija brzine promjenom frekvencije koji se ostvaruje pomoću frekvencijskih pretvarača.

## 10. LITERATURA

- [1] Mandić, I.; Tomljenović, V.; Pužar, M.: „Sinkroni i asinkroni električni strojevi“, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Zagreb, 2012.
- [2] Wolf, R.: „Osnove električnih strojeva“, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- [3] Jurković, B.: „Elektromotorni pogoni“, Školska knjiga, Zagreb, 1978.
- [4] Prenc R.: prezentacija sa predavanja-Asinkroni strojevi
- [5] Bulić N.: predavanja-Pogoni s asinkronim strojevima
- [6] Bulić N.: predavanja-Pogoni s kliznokolutnim asinkronim strojevima
- [7] Topić K.: „Analiza zaleta elektromotora“, s Interneta,  
<https://dabar.srce.hr/islandora/object/riteh%3A2374> ,2020.
- [8] Vučetić D.: „Brodski električni strojevi“, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, Rijeka, 2015.
- [9] Leonhard W.: „Control of electrical drives, Springer, 1996.



## 11. SAŽETAK

U završnom radu opisan je princip rada asinkronog motora te način na koji se stvara okretno magnetsko polje i inducira napon na rotoru. Izvršena je podjela asinkronih motora na kliznokolutne i kavezne te je ukratko opisan svaki od njih. Posebno su obrađeni načini pokretanja i regulacija brzine vrtnje asinkronih motora, gdje je detaljno opisan svaki način pokretanja i regulacije. U sklopu regulacije brzine vrtnje objašnjen je koncept višebrzinskih motora i reverziranje. Objašnjeni su režimi rada motora, a posebno generatorsko kočenje i protustrujno kočenje. U konačnici napravljena je simulacija dinamičke i statičke karakteristike iz kojih je jasno vidljivo kako se mijenja moment s promjenom parametara motora.

Ključne riječi: asinkroni motor, pokretanje, regulacija brzine vrtnje

## 12. SUMMARY

The final paper describes the principle of operation of the asynchronous motor and the way in which the agile magnetic field is created and the voltage on the rotor is induced. The division of asynchronous motors into sliding and caged motor was carried out and each of them was briefly described. In particular, the ways of starting and regulating the speed of rotation of asynchronous motors are specially processed, where each method of start and regulation is described in detail. As part of the revolving speed regulation, the concept of multi-speed motors and reversing are explained. Motor modes, especially generator braking and counter-current braking, are explained. Finally, a simulation of the dynamic and static characteristic was made, from which it is clearly visible how the torque changes with the change of engine parameters.

Keywords: asynchronous motor, start-up, regulating rotational speed