

Uputstvo za korišćenje modela OPENLOOP.mdl

Ciljna grupa:

Studenti koji su uspešno položili OG2EM i koji razumeju dinamički model asinhronog motora u dq koordinatnom sistemu

SVRHA/očekivana korist za studenta:

Utvrdjivanje gradiva iz OG2EM korišćenjem modela AM,

Ispitivanje, putem simulacije, zaletanja mašine, opterećenja, etc.

Sagledavanje aspekta polaznih struje, etc. etc.

STRUKTURA: Tekst je koncipiran i napisan tako da omogućuje studentima koji nisu familijarni sa Simulinkom da ga ipak počnu koristiti.

Sadržaj

1	Predmet simulacije	3
2	Upotrebna vrednost modela	4
3	Jednačine korišćene pri modelovanju	5
4	Moduli i podsistemi	8
5	M-datoteka za unošenje parametara.....	11
6	Parametri simulacije.....	13
7	Rad u paketu Simulink.....	14
8	Primer korišćenja modela.....	16
9	Pitanja	20

1 Predmet simulacije

Openloop predstavlja Matlab/Simulink model asinhronog motora u dq sistemu koji se može koristiti samostalno ili kao podsistem pri proveru različitih zakona upravljanja i režima rada AM.

Centralni deo simulink datoteke Openloop.mdl čini blok "Induction Motor Model Inverse with Inductanse Fun", koji predstavlja model asinhronog motora u dq koordinatnom sistemu. Ulazi u ovaj blok su naponi u_q i u_d , ugaona učestanost statorskog polja ω_{dq} i brzina obrtanja vratila rotora ω_R . Izlazi bloka su statorske struje i_d i i_q , elektromagnetni moment koji motor razvija, i fluks rotora. Na vratilo motora, čiji je moment inercije J , pored elektromagnetnog deluje i moment opterećenja (odskočni signal „Load Torque“). Vremenska zavisnost rezultujuće brzina vratila, razvijenog momenta i fluksa rotora u prikazuju se na osciloskopima.

Cilj simulacije je da se student detaljno upozna sa modelom AM u dq koordinatnom sistemu. Takođe, tokom simulacije biće ilustrovana loša dinamička (kvalitet prelaznog procesa) i statička (greška praćenja u stacionarnom stanju pri dejstvu poremećaja) svojstva AM u otvorenoj sprezi, odakle će biti jasna potreba za zatvaranjem povratne sprege i uvođenjem nekog od algoritama upravljanja.

2 Upotrebna vrednost modela

Korišćenjem modela Openloop u ovoj laboratorijskoj vežbi studentu se omogućava:

- upoznavanje sa radom AM preko modela i komentara koji se nalaze u tekstu koji sledi;
- efikasna provera dinamičke karakteristike AM;
- upoređivanje karakteristika električnog i mehaničkog podсистema unutar motora;
- direktno upoznavanje sa načinom rada Matlab/Simulink;
- korišćenje kao podсистema pri proveru različitih zakona upravljanja i režima rada.

3 Jednačine korišćene pri modelovanju

Polazna tačka za izradu Simulink modela su jednačine naponskog balansa u dq koordinatnom sistemu (za postupak izvođenja ovih jednačina videti skriptu sa predavanja profesora Vukosavića iz predmeta Električne mašine i postrojenja):

$$(3.1) \quad u_d = R_S \cdot i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_S \cdot \Psi_q$$

$$(3.2) \quad u_q = R_S \cdot i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega_S \cdot \Psi_d$$

$$(3.3) \quad u_D = 0 = R_R \cdot i_D + \frac{d\Psi_D}{dt} - \omega_K \cdot \Psi_Q$$

$$(3.4) \quad u_Q = 0 = R_R \cdot i_Q + \frac{d\Psi_Q}{dt} + \omega_K \cdot \Psi_D$$

Pri izvođenju ovih jednačina načinjene su sledeće pretpostavke:

- električni podsistem motora je mreža sa skoncentrisanim parametrima;
- nema gubitaka u sprežnom polju;
- zanemarena je energija akumulirana u električnom polju;
- magnetni medijum je linearan (zanemarena je pojava magnetnog zasićenja).

Vežu između električnog i mehaničkog podsistema mašine čine izraz za elektromagnetni moment

$$(3.5) \quad M_{em} = \Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d$$

i Njutnova jednačina

$$(3.6) \quad J \cdot \frac{d\omega_R}{dt} = M_{em} - M_{opt}$$

Gornje jednačine važe za apsolutne vrednosti napona, struje, fluksa, ugaone brzine i momenta. Međutim, u modelu se koriste normalizovane, odnosno relativne, a ne apsolutne veličine. Neke od prednosti korišćenja modela sa relativnim jedinicama su:

- mogućnost jednostavnog upoređivanja motora različitih nazivnih snaga preko relativnih vrednosti;
- mogućnost da se jednostavnom izmenom baznih vrednosti u init datoteci modeluje drugi motor, itd.

Kao rezultat zamene apsolutnih veličina relativnim, na pojedinim mestima u jednačinama (3.1) - (3.6) pojaviće se dodatni koeficijenti skaliranja. Naredne jednačine opisuju kako se

vrši relativizacija svih relevantnih veličina i parametara u modelu. Simboli koji se odnose na apsolutne veličine imaju oznaku *aps* u superskriptu, dok simboli koji se odnose na relativne vrednosti radi jednostavnosti neće imati nikakvu dodatnu oznaku:

$$(3.7) \quad u = \frac{u^{aps}}{U_{nom}}, \quad i = \frac{i^{aps}}{I_{nom}}, \quad Z_{nom} = \frac{U_{nom}}{I_{nom}}, \quad R = \frac{R^{aps}}{Z_{nom}}, \quad \omega = \frac{\omega^{aps}}{\omega_{nom}}$$

$$(3.8) \quad \omega \cdot L = \frac{u}{i} \Rightarrow L = \frac{u}{\omega \cdot i} = \frac{u^{aps}}{\omega^{aps} \cdot i^{aps}} \cdot \frac{\omega_{nom} \cdot I_{nom}}{U_{nom}} = L^{aps} \cdot \frac{\omega_{nom}}{Z_{nom}}$$

$$(3.9) \quad \Psi = L \cdot i = L^{aps} \cdot \frac{\omega_{nom}}{Z_{nom}} \cdot \frac{i^{aps}}{I_{nom}} = L^{aps} \cdot i^{aps} \cdot \frac{\omega_{nom}}{U_{nom}} = \Psi^{aps} \cdot \frac{\omega_{nom}}{U_{nom}}$$

Uticaj koji ima uvođenje relativnih vrednosti na jednačine naponskog balansa biće prikazan na primeru statorske *d* ose:

$$(3.10) \quad \begin{aligned} u_d^{aps} &= R_S^{aps} \cdot i_d^{aps} + \frac{d\Psi_d^{aps}}{dt} - \omega_S^{aps} \cdot \Psi_q^{aps} \Rightarrow \\ u_d \cdot U_{nom} &= R_S \cdot Z_{nom} \cdot i_d \cdot I_{nom} + \frac{U_{nom}}{\omega_{nom}} \cdot \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_S \cdot \omega_{nom} \cdot \frac{U_{nom}}{\omega_{nom}} \cdot \Psi_q \Rightarrow \\ u_d &= R_S \cdot i_d + \frac{1}{\omega_{nom}} \cdot \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_S \cdot \Psi_q \end{aligned}$$

Preuređivanjem jednačine (3.10) dobija se:

$$(3.11) \quad \frac{d\Psi_d}{dt} = \omega_{nom} (u_d - R_S \cdot i_d + \omega_S \cdot \Psi_q).$$

Primenom sličnog postupka na jednačine (3.2), (3.3) i (3.4) dobija se:

$$(3.12) \quad \frac{d\Psi_q}{dt} = \omega_{nom} \cdot (u_q - R_S \cdot i_q - \omega_S \cdot \Psi_d),$$

$$(3.13) \quad \frac{d\Psi_D}{dt} = \omega_{nom} \cdot (-R_S \cdot i_D + \omega_K \cdot \Psi_Q),$$

$$(3.14) \quad \frac{d\Psi_Q}{dt} = \omega_{nom} \cdot (-R_S \cdot i_Q - \omega_K \cdot \Psi_D).$$

Skaliranje se mora izvršiti i pri relativizaciji momenta. Naime, ukupna električna snaga na priključcima motora je $P_{in} = U \cdot I \cdot \cos \varphi$. Usled gubitaka u statorskom kolu na rotor se prenosi samo deo ulazne snage, izražen koeficijentom efikasnosti η , tako da je snaga obrtnog polja data sa $P_{ob} = \eta \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$. Nominalni elektromagnetni moment iznosi

$$(3.15) \quad M_{nom} = \frac{P_{ob,nom}}{\omega_{nom}} = \frac{U_{nom} \cdot I_{nom} \cdot \eta \cdot \cos \varphi}{\omega_{nom}},$$

pa se njegova relativna vrednost

$$(3.16) \quad M_{em} = \frac{M_{em}^{aps}}{M_{nom}} = \frac{\Psi_d^{aps} \cdot i_q^{aps} - \Psi_q^{aps} \cdot i_d^{aps}}{M_{nom}}$$

može izraziti na sledeći način

$$(3.17) \quad M_{em} = \frac{\Psi_d^{aps} \cdot i_q^{aps} - \Psi_q^{aps} \cdot i_d^{aps}}{U_{nom} \cdot I_{nom} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{\omega_{nom}}{U_{nom} \cdot I_{nom} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \cdot \frac{U_{nom}}{\omega_{nom}} \cdot I_{nom} \cdot (\Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d) \Rightarrow$$

$$(3.18) \quad M_{em} = \frac{\Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d}{\eta \cdot \cos \varphi}$$

Kako su pri izvođenju izraza za moment zanemareni gubici u gvožđu, frikcija i ventilacija, realni moment biće za oko 10% manji od onog koji daje gornji izraz, pa je konačno:

$$(3.19) \quad M_{em} = K_m \cdot (\Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d),$$

$$(3.20) \quad K_m = \frac{0.92}{\eta \cdot \cos \varphi}.$$

Pod pretpostavkom da su rasipne induktivnosti statora i rotora jednake, proračun struja i_d , i_q , i_D i i_Q iz flukseva Ψ_d , Ψ_q , Ψ_D i Ψ_Q može se obaviti na osnovu sledećih jednačina:

$$(3.21) \quad L_{\gamma S} = L_{\gamma R} \approx \frac{L_e}{2}, \quad L_e = \frac{L_R \cdot L_S - L_m^2}{L_R},$$

$$(3.22) \quad \begin{aligned} \Psi_d + \Psi_D &= L_S \cdot i_d + L_m \cdot i_D + L_R \cdot i_D + L_m \cdot i_d = (L_S + L_m) \cdot i_d + (L_R + L_m) \cdot i_D \Rightarrow \\ \Psi_d + \Psi_D &= (L_S + L_m) \cdot (i_d + i_D), \end{aligned}$$

$$(3.23) \quad \Psi_d - \Psi_D = \frac{L_e}{2} \cdot (i_d - i_D),$$

$$(3.24) \quad \Psi_q + \Psi_Q = (L_S + L_m) \cdot (i_q + i_Q),$$

$$(3.25) \quad \Psi_q - \Psi_Q = \frac{L_e}{2} \cdot (i_q - i_Q).$$

Moment inercije J nije uzet iz kataloga, već je izabran tako da prelazni procesi u sistemu budu uočljivi, a da simulacija ne traje previše dugo. Mala vrednost momenta inercije učinila bi prelazne procese brzim, tako da bi bio potreban izuzetno mali korak integracije da bi se oni uočili. S druge strane, veliko J bi sistem učinilo sporim, trebalo bi puno vremena da se dostigne stacionarno stanje, pa bi i vreme simulacije moralo da se produži.

4 Moduli i podsistemi

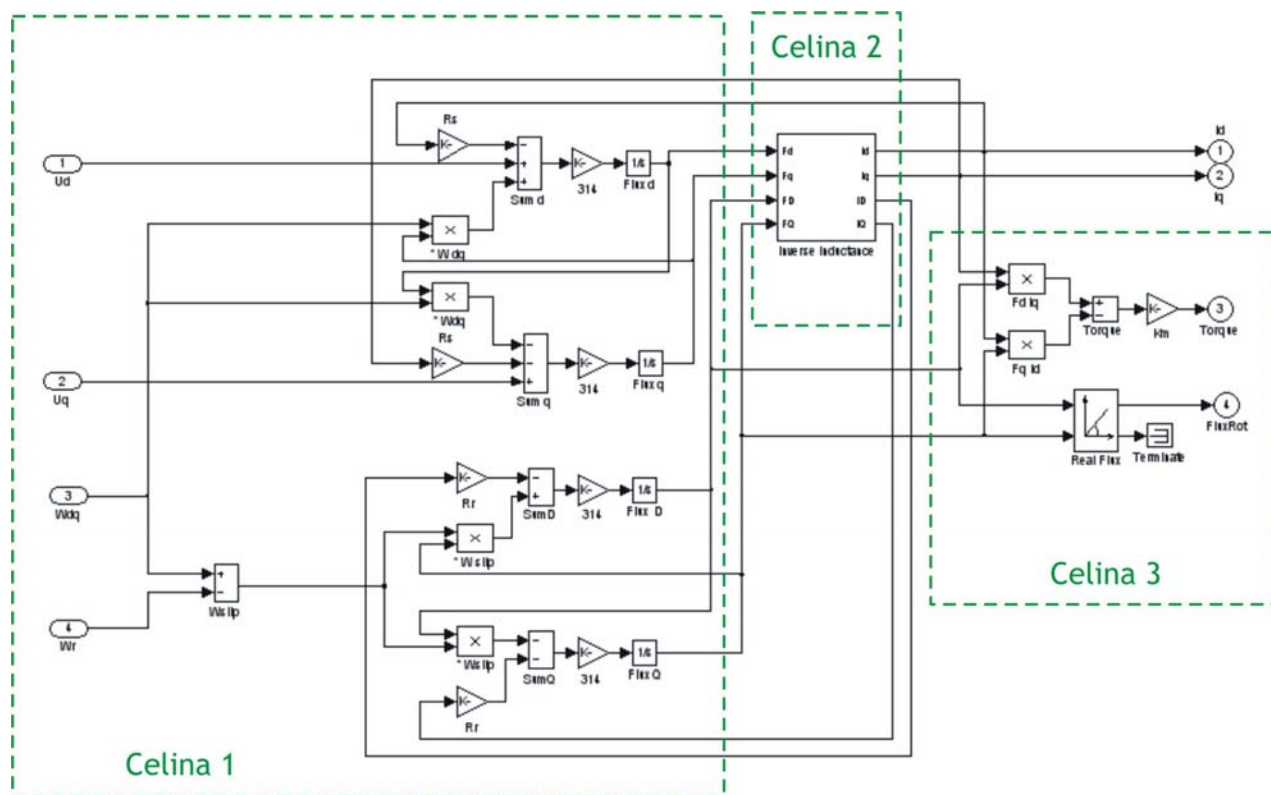
Model AM u dq koordinatnom sistemu predstavljen je blokom "Induction Motor Model with Inverse Induction Fun". Njegovi ulazi su relativne vrednosti napona na statorskim priključcima u_d i u_q , ugaona učestanost obrtanja statorskog polja ω_{dq} , tj. sinhrona učestanost, i brzina obrtanja vratila rotora ω_R . Izlaze iz bloka čine relativne vrednosti statorskih struja i_d i i_q , elektromagnetnog momenta (izlaz „Torque“) i fluksa rotora („FluxRot“). Na slici 1 prikazana je interna struktura bloka "Induction Motor Model with Inverse Induction Fun".

U organizaciji ovog podsistema mogu se uočiti 3 funkcionalne celine, sa sledećim ulogama:

- 1) proračun flukseva Ψ_d , Ψ_q , Ψ_D i Ψ_Q na osnovu jednačina naponskog balansa (3.11), (3.12), (3.13) i (3.14), prilagođenih relativnim veličinama, i preuređenih u formu zgodnu za modelovanje;
- 2) proračun struja i_d , i_q , i_D i i_Q na osnovu poznatih vrednosti fluksa, u bloku „Inverse Inductance“, na osnovu jednačina (3.22), (3.23), (3.24) i (3.25);
- 3) proračun elektromagnetnog momenta, na osnovu jednačina (3.19) i (3.20), i modula rotorskog fluksa, pomoću bloka za konverziju kartezijskih u polarne koordinate.

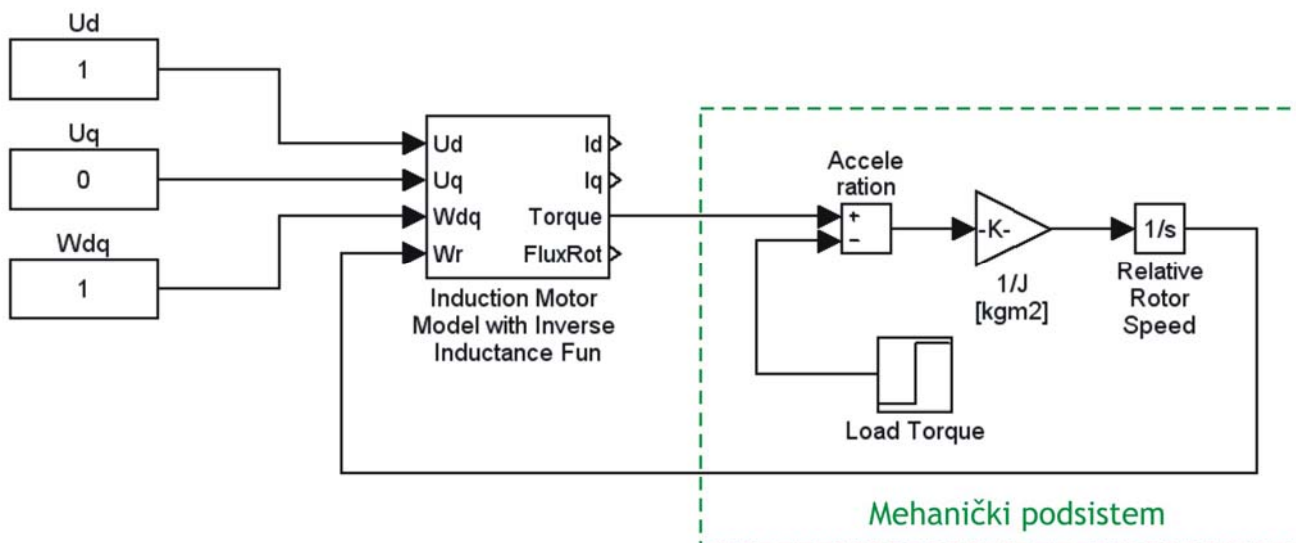
Ove celine naznačene su na slici 1.

U okviru bloka "Induction Motor Model with Inverse Induction Fun" modelovan je samo električni podsistem motora, i to u fiktivnom dq koordinatnom sistemu. Model koji bi više odgovarao realnom slučaju imao bi za ulaze fazne napone u_a , u_b i u_c . Iz ovih napona bi se proračunavale vrednosti fluksa, na osnovu jednačina naponskog balansa u stacionarnom abc koordinatnom sistemu, što bi po funkciji odgovaralo podsistemu 1 na slici 1. Iz flukseva bi se zatim određivale struje, slično kao u bloku "Inverse Inductance" (primetiti da bi ovaj blok bio znatno složeniji nego u slučaju dq koordinatnog sistema, jer bi matrica induktivnosti sada bila nestacionarna). Međutim, ovakav model bi bio nepovoljniji sa stanovišta dalje upotrebljivosti. Naime, indirektno i direktno vektorsko upravljanje zasnivaju se veličinama u dq koordinatnom sistemu. S obzirom da bi ulazi i izlazi iz gore opisanog modela AM bili naponi i struje u stacionarnom abc koordinatnom sistemu, morali bismo najpre da vršimo Klarkovu i Parkovu transformaciju da bismo iz struja i_a , i_b i i_c dobili i_d i i_q , a zatim i da referentne napone u_d i u_q , koji predstavljaju izlaz iz algoritma upravljanja, transformišemo inverznom Parkovom i inverznom Klarkovom transformacijom nazad u abc koordinatni sistem, jer bi naš model AM sada na ulazu očekivao napone u_a , u_b i u_c . Sve ovo bi modele učinilo složenijim i manje preglednim, pa se iz tog razloga pribegava korišćenju modela AM upravo u dq koordinatnom sistemu, koji je kroz ovu vežbu i obrađen.



Slika 1. Funkcionalne celine bloka “Induction Motor Model with Inverse Inductance Fun”.

Mehanički podsistem, opisan jednačinom (3.6), naznačen je na slici 2.



Slika 2. Model mehaničkog podsistema AM.

Ulaz u mehanički podsistem je razvijeni elektromagnetni moment (izlaz “Torque” bloka “Induction Motor Model with Inverse Inductance Fun”), a njegov izlaz je brzina obrtanja

vratila motora, izražena u relativnim jedinicama (ulaz “Wr” bloka “Induction Motor Model with Inverse Inductance Fun”).

5 M-datoteka za unošenje parametara

Init.m je Matlab m-datoteka koja definiše nazivne i izvedene parametre motora, dobijene iz kataloga ili izvođenjem odgovarajućih eksperimenata. Pre pokretanja simulacije, u workspace Matlaba treba uneti sve potrebne parametre, što se na jednostavan način obavlja unošenjem imena ove datoteke u komandnu liniju i pritiskom na <Enter>. Prednosti korišćenja m datoteka za definisanje parametara Simulink modela su:

- *preglednost* - svi parametri definisani su na jednom mestu, uz eventualne komentare koji opisuju njihovo značenje i postupak određivanja;
- *jednostavna izmena vrednosti parametara* - dovoljno je u komandnoj liniji glavnog Matlabovog prozora definisati novu vrednost i ponovo pokrenuti simulaciju;
- *mogućnost korišćenja istog Simulink modela za analizu različitih motora* - moguće je definisati više Init.m datoteka, od kojih svaka sadrži podatke za po jedan tip motora, i pre pokretanja simulacije u komandnu liniju uneti ime one m-datoteke koja sadrži parametre za odgovarajući motor.

Sve veličine su relativne. U nastavku je objašnjen način na koji je određen svaki od parametara.

- Nazivne vrednosti napona, struje, učestanosti statorskog napona i momenta dobijaju se iz kataloga.
- Otpornost statorskih namotaja R_s se meri na priključcima motora.
- Relativna vrednost otpornost rotorskih namotaja jednaka je nominalnom relativnom klizanju. Naime, tada je reaktansa magnetizacionog namotaja u zamenskoj šemi AM znatno veća od impedanse rotorske grane, tako da su statorska i rotorska struja približno jednake. S druge strane, kako je nominalno relativno klizanje znatno manje od 1, otpornost R_R/s u rotoskoj grani biće znatno veća od reaktanse rasipne induktivnosti, kao i od otpora rotorskog namotaja. Prema tome, napon na otporniku R_R/s je nominalan, a kroz njega protiče nominalna struja, pa je njegova otpornost jednaka baznoj impedansi. Oдавde sledi da je relativna vrednost rotorske otpornosti R_R jednaka nominalnom klizanju s_{nom} .
- Kada je motor neopterećen, relativno klizanje je približno jednako nuli, tako da je otpornost rotorske grane u zamenskoj šemi beskonačno velika, pa sva struja praznog hoda I_0 protiče kroz magnetizacionu induktivnost. Kako je njena reaktansa znatno veća od impedanse koju čine redna veza statorske otpornost i rasipne induktivnosti, a pod pretpostavkom da su amplituda i učestanost napona kojim se motor napaja nominalni, sledi da je magnetizaciona induktivnost data sa

$$L_m^{aps} = \frac{U_{nom}}{\omega_{nom} \cdot I_0^{aps}},$$

pa je njena relativna vrednost

$$L_m = \frac{U_{nom}}{\omega_{nom} \cdot I_0^{aps}} \cdot \frac{\omega_{nom}}{Z_{nom}} = \frac{I_{nom}}{I_0^{aps}} = \frac{1}{I_0},$$

odnosno jednaka je recipročnoj vrednosti relativne struje praznog hoda.

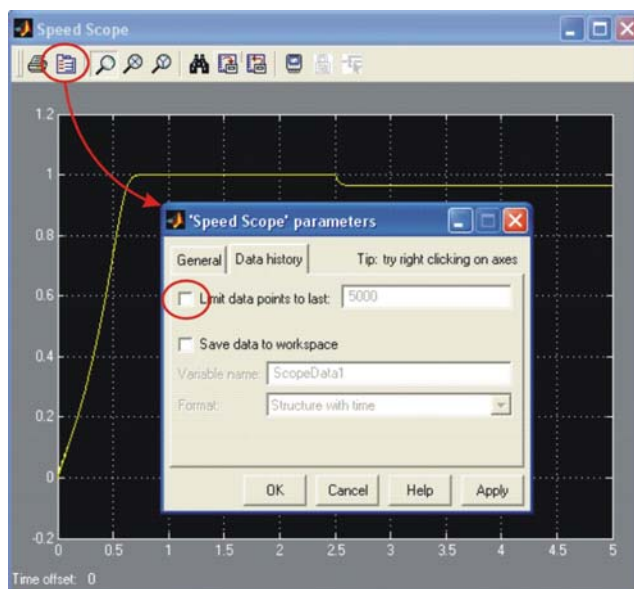
- Ekvivalentna reaktansa rasipanja L_e određuje se iz eksperimenta sa zaustavljenim rotorom. Tada je relativno klizanje $s=1$, pa je ukupna impedansa rotorske grane zanemarljiva u odnosu na reaktansu rasipanja. Zamenska šema sada se svodi na rednu vezu statorske i rotorske otpornosti i induktivnosti rasipanja. Prema tome, L_e se može odrediti iz reaktanse motora pri zaustavljenom rotoru, deljenjem sa učestanošću napajanja. Pod pretpostavkom da su rasipne induktivnosti statora i rotora jednake, sledi $L_{\gamma S} = L_{\gamma R} \approx L_e/2$.
- Nominalna vrednost d komponente statorske struje određuje se iz nominalnog fluksa rotora. Naime, pri raspregnutom upravljanju momentom i fluksom (d osa usmerena u pravcu vektora rotorskog fluksa) dobija se da je u stacionarnom stanju $\Psi_R^{aps} = \Psi_D^{aps} = L_m^{aps} \cdot I_d^{aps}$. Kada se apsolutne vrednosti izraze preko relativnih, dobija se $\Psi_D = L_m \cdot I_d$, pa je u nominalnom režimu $I_{d,nom} = 1/L_m$.

6 Parametri simulacije

U simulaciji je korišćena Eulerova (ode1) metoda za numeričko rešavanje diferentnih jednačina, sa fiksnim korakom simulacije od 0.00002. Korak simulacije odabran je tako da bude uočljive oscilacije koje se javljaju u toku prelaznog procesa. Naime, po pokretanju simulacije na ulaze u_d i ω_{dq} bloka „Induction Motor Model with Inverse Induction Fun” dovode se jedinične (nominalne) vrednosti, a kako su polovi funkcije prenosa AM u otvorenoj sprezi slabo prigušeni, odziv će biti oscilatornog karaktera. Perioda ovih oscilacija iznosi približno 0.02 s. Teorijski, za korak integracije mogla bi se usvojiti vrednost od 0.002 s, koja bi garantovala 10 izračunatih tačaka u svakoj periodu oscilacija. Međutim, ovako izabran korak integracije rezultuje relativno malom preciznošću, pa se mogu javiti numerički problemi pri rešavanju diferentnih jednačina. Kako bi se ovo izbeglo, usvojen je korak integracije od 0.00002, dok je rezolucija XY grafika 0.002 s (10 tačaka po periodu).

U simulaciji je ilustrovano i dejstvo konstantnog poremećaja na relevantne veličine u sistemu. Trenutak početka delovanja poremećaja odabran je tako da se sistemu da dovoljno vremena da završi sve prelazne procese, kako bi se dejstvo poremećaja na izlaz razdvojilo od dejstva jediničnih ulaznih odskočkih signala. S obzirom da je vreme smirenja sistema oko 0.7 s, za trenutak početka delovanja poremećaja odabrano je $t = 2.5$ s. Za vreme trajanja simulacije odabrana je vrednost od 5 s.

Za prikaz rezultata simulacije koriste se Scope blokovi iz Simulinkove Sinks biblioteke. Oni imaju opciju „Limit data points to last“, koja služi za ograničavanje broja tačaka prikazanih na grafiku. Ova opcija je isključena (postupak je ilustrovan na slici 3), kako bi na ekranu bio vidljiv ceo grafik, od $t = 0$ s do $t = 5$ s.



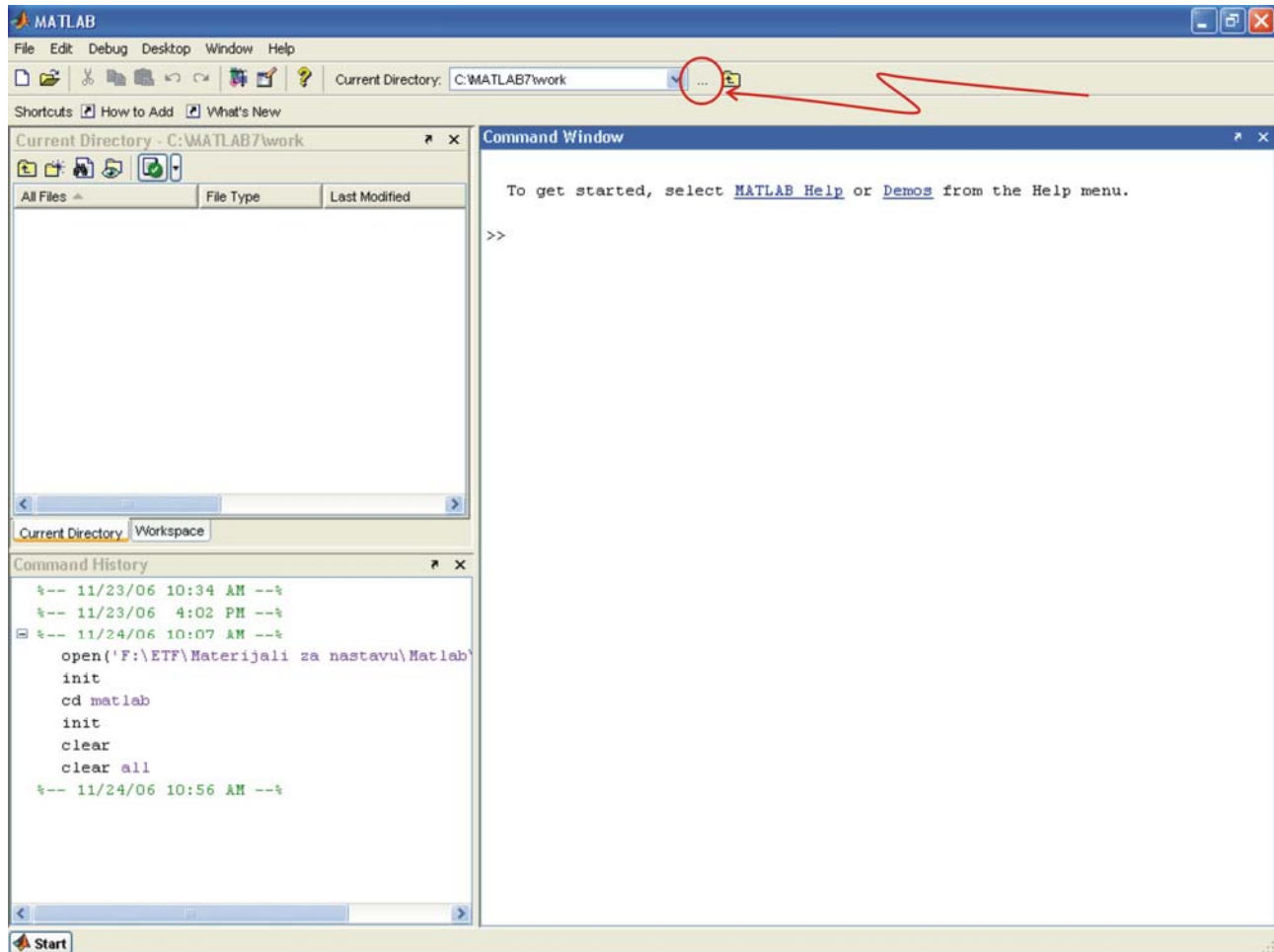
Slika 3. Opcija „Limit data points“ bloka Scope.

7 Rad u paketu Simulink

Ovo poglavlje namenjeno je studentima koji se prvi put susreću sa programskim jezikom Matlab i njegovim paketom Simulink, i sadrži opis postupaka kojima se dolazi do rezultata simulacije - grafika momenta, brzine i fluksa motora.

Postupak je sledeći:

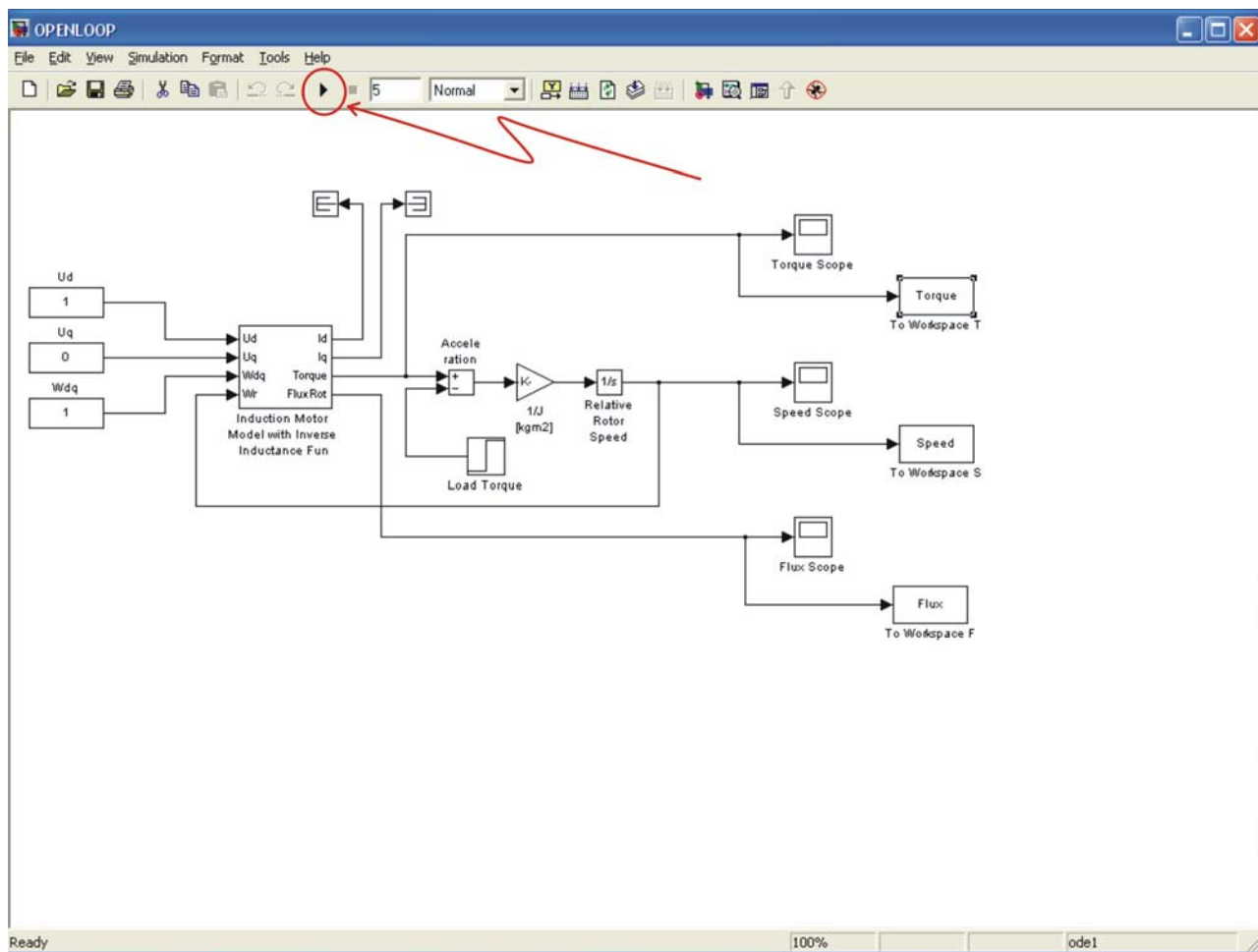
1. U jedan direktorijum na računaru smestiti datoteke Init.m i Openloop.mdl.
2. Pokrenuti Matlab.
3. Za tekući direktorijum postaviti onaj iz koraka 1 (koristiti dugme Browse, prikazano na slici 4).



Slika 4. Dugme „Browse“ u glavnom prozoru Matlaba.

4. U komandnu liniju ukucati „Init“ i pritisnuti Enter. Ovim se u Matlabov radni prostor uvode potrebne promenljive, definisane u datoteci Init.m.

5. U komandnu liniju ukucati „Openloop“ i pritisnuti Enter. Ovim se pokreće Simulink i otvara model Openloop.mdl.
6. Pritisnuti dugme „Run“, naznačeno na slici 5. Ovim se pokreće simulacija.



5. Dugme „Run“ u prozoru Simulinka.

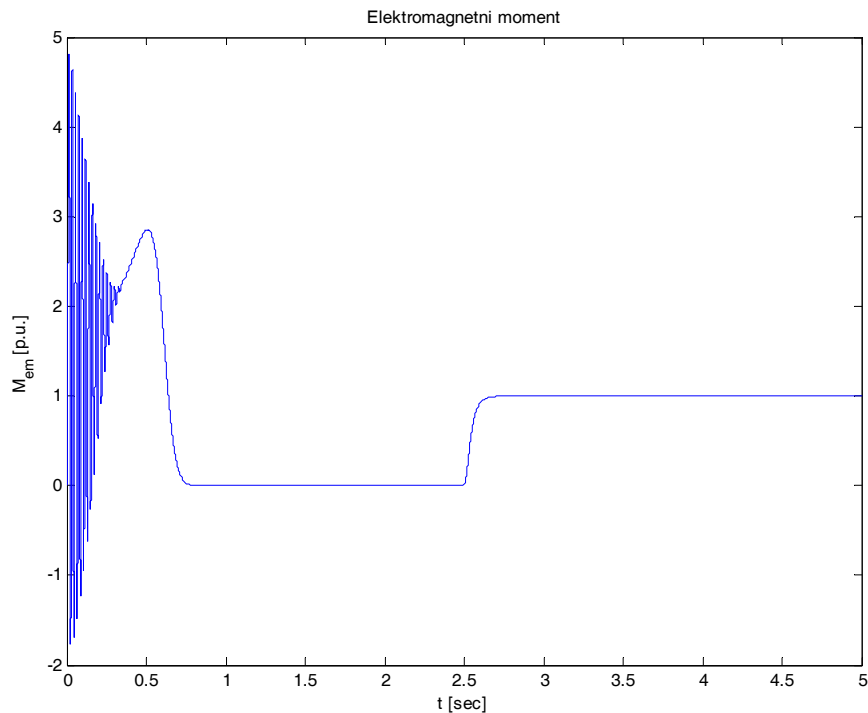
7. Po završetku simulacije, dvostrukim klikom na neki od osciloskopa dobija se vremenska zavistnost odgovarajuće veličine. Koristiti „Autoscale“ (dugme sa slikom dvogleda) za automatsko skaliranje slike. Alternativno, u komandnoj liniji može se otkucati „ZaPrikazSlike <Enter>“, čime se pokreće m-datoteka koja formira grafike brzine, momenta i fluksa.
8. Bilo koji parametar u modelu lako se može izmeniti, dvostrukim klikom na odgovarajući blok i unošenjem nove vrednosti. Na primer, može se izmeniti vektor statorskog napona, promenom vrednosti u blokovima Ud i Uq, ili moment inercije, izmenom pojačanja bloka 1/J. Nakon izmene treba ponovo pokrenuti simulaciju, pritiskom na „Run“.

8 Primer korišćenja modela

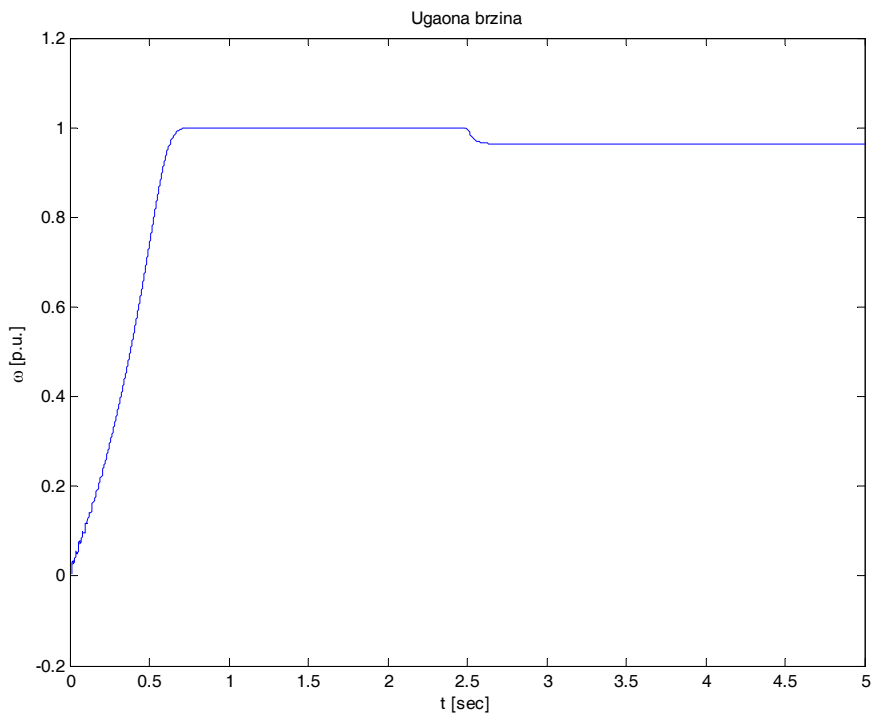
Jedan od mogućih upotreba modela „Openloop“ jeste analiza ponašanja AM priključenog na mrežni napon.

U ovom primeru, neopterećeni AM biće priključen na nazivni napon nazivne učestanosti. Ovo znači da relativna vrednost modula statorskog napona treba da bude 1, što se može postići postavljanjem $u_d = 1$ i $u_q = 0$ (preporučuje se studentu da proveriti šta će se desiti ako postavi $u_d = 0$ i $u_q = 1$). Takođe, relativna vrednost kružne učestanosti napona napajanja treba da bude jedinična, pa je $\omega_{dq} = 1$. Nakon $t = 2.5 \text{ sec}$ na vratilo počinje da deluje nazivno opterećenje.

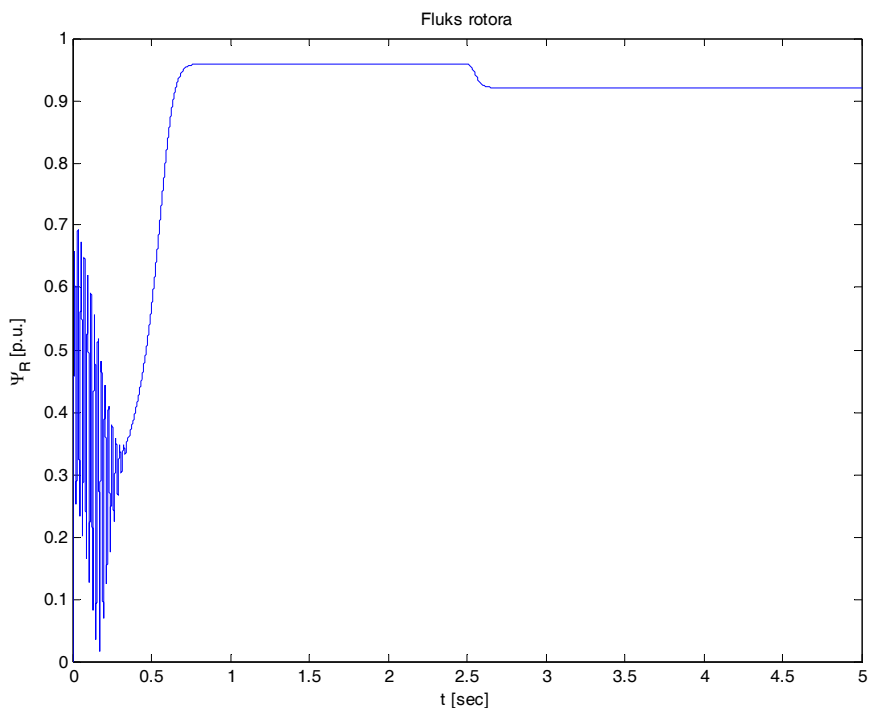
Nakon izvršenja simulacije dobijeni su grafici prikazani na slikama 6, 7 i 8.



Slika 6. Elektromagnetni moment AM u otvorenoj sprezi.



Slika 7. Ugaona brzina AM u otvorenoj sprezi.



Slika 8. Fluks rotora AM u otvorenoj sprezi.

Očigledna je velika oscilatornost pri uspostavljanju fluksa i momenta nakon odskočne promene napona u_d u trenutku $t = 0$ sec. Ona je posledica slabe prigušenosti dominantnog

para polova funkcije prenosa AM. Naime, iz jednačina naponske ravnoteže električnog kola rotora

$$(8.1) \quad 0 = R_R \cdot i_D + \frac{d\Psi_D}{dt} - \omega_K \cdot \Psi_Q$$

$$(8.2) \quad 0 = R_R \cdot i_Q + \frac{d\Psi_Q}{dt} + \omega_K \cdot \Psi_D$$

mogu se eliminisati rotorske struje, jer je

$$(8.3) \quad \Psi_D = L_R \cdot i_D + L_m \cdot i_d \Rightarrow i_D = \frac{1}{L_R} \cdot \Psi_D - \frac{L_m}{L_R} \cdot i_d$$

$$(8.4) \quad \Psi_Q = L_R \cdot i_Q + L_m \cdot i_q \Rightarrow i_Q = \frac{1}{L_R} \cdot \Psi_Q - \frac{L_m}{L_R} \cdot i_q$$

pa se dobija

$$(8.5) \quad 0 = \frac{R_R}{L_R} \cdot \Psi_D - \frac{R_R}{L_R} \cdot L_m \cdot i_d + \frac{d\Psi_D}{dt} - \omega_K \cdot \Psi_Q$$

$$(8.6) \quad 0 = \frac{R_R}{L_R} \cdot \Psi_Q - \frac{R_R}{L_R} \cdot L_m \cdot i_q + \frac{d\Psi_Q}{dt} + \omega_K \cdot \Psi_D$$

Ako se iz gornjih jednačina izdvoje izvodi fluksa, i sistem napiše u matričnom obliku, dobija se

$$(8.7) \quad \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{1}{T_R} & \omega_K \\ -\omega_K & -\frac{1}{T_R} \end{bmatrix}}_A \cdot \begin{bmatrix} \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} + \frac{L_m}{T_R} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix},$$

gde je $T_R = L_R/R_R$ vremenska konstanta električnog kola rotora. Ovde su fluksevi rotora uzeti kao promenljive stanja, a statorske struje predstavljaju upravljačke promenljive. Polove sistema dobijamo iz karakteristične jednačine $\det(sI - A) = 0$. Lako se pokazuje da su oni dati sa

$$(8.8) \quad s_{1/2} = -\frac{1}{T_R} \pm j \cdot \omega_K$$

Ako je $R_R \approx 1 \Omega$, $L_R \approx 150 \text{ mH}$ i $\omega_K \approx 10 \text{ rad/sec}$ imamo da odnos apsolutnih vrednosti realnog i imaginarnog dela iznosi

$$(8.9) \quad \frac{1/T_R}{\omega_K} \approx 0.015$$

Ova prilično mala vrednost ukazuje na slabu prigušenost konjugovano kompleksnog para polova matrice funkcija prenosa od komponenti statorske struje do komponenti rotorskog fluksa, pa je jasno šta je uzrok oscilacijama u odzivu fluksa, a samim tim i momenta, s obzirom da je on srazmeran proizvodu fluksa i struje.

Promena opterećenja u trenutku $t = 2.5 \text{ sec}$ dovodi do trajnog odstupanja brzine od vrednosti iz prethodnog stacionarnog stanja, šta je i bilo za očekivati, s obzirom da u sistemu ne postoji povratna sprega.

Jasno je da se AM ne može koristiti u otvorenoj sprezi, već da je potrebno uvesti strategije upravljanja koje će ga učiniti upotrebljivim u servo aplikacijama.

9 Pitanja

1. Šta se dešava sa momentom, fluksom i brzinom ako se napon u_d drži na vrednosti nula, a zada se nominalna vrednost za u_q ($u_q = 1$). Postoji li razlika u odnosu na prethodni slučaj? Da li očekujete da se naponom u_d određuje fluks, a naponom u_q moment?

ODGOVOR: Grafici brzine fluksa, momenta i brzine biće identični ako se uzme $u_d = 0$ i $u_q = 1$. Naime, u ovom drugom slučaju biće primenjen naponski vektor iste amplitude, ali će njegova orijentacija u dq koordinatnom sistemu biti drugačija. Shodno tome, amplitude strujnog vektora i vektora fluksa biće iste, ali će se njihove faze razlikovati u odnosu na prethodni slučaj. Prema tome, čitava „ruža“ vektora biće ista kao u prethodnom slučaju, s tim što će biti pomerena za $\pi/2$ oko koordinatnog početka dq sistema. Preporučuje se studentu da se u ovo sam uveri, koristeći blokove za transformaciju kartezijskih u polarne koordinate koje se nalaze u biblioteci Simulink Extras/Transformations. U momentu neće biti razlike, jer je on srazmeran vektorskom proizvodu fluksa i struje, pa će samim tim i brzina biti ista.

Očigledno da oba napona utiču i na fluks i na moment. Nema raspreszanja po osama, jer je to karakteristika upravljanja u kojem je d osa orijentisana u smeru rotorskog fluksa, a čak i tada momentom i fluksom upravljaju *struje* a ne naponi, odnosno potrebno je da postoje strujni regulatori koji će određivati potrebne napone. Ovde nije implementirano nikakvo upravljanje, sistem je u otvorenoj sprezi, a ugao između d ose i fluksa nije nula - on se može odrediti kao faza vektora fluksa u stacionarnom stanju, pre dejstva poremećaja, za slučaj kada je $u_d = 1$ i $u_q = 0$. Zaključak: raspregnuto upravljanje momentom i fluksom AM *nije* inherentna karakteristika svakog algoritma koji se zasniva na dq koordinatnom sistemu, već samo onog kod kojeg je d osa pravilno orijentisana, što se postiže pravilnim proračunom klizanja, i kod kojeg postoji precizna regulacija komponenti statorsche struje.

2. Šta se dešava sa momentom i brzinom motora ako se amplituda poremećaja promeni sa 1 na 4? Kako objašnjavate ovakav rezultat?
3. Pokazati graficima i objasniti kako smanjenje i povećanje momenta inercije J utiče na odziv fluksa?

Napomena: obratiti pažnju da polovi funkcije prenosa od struje do fluksa zavise od klizanja ω_K , a da klizanje zavisi od brzine obrtanja rotora. Razmotriti šta se dešava sa koeficijentom prigušenja polova kada se motor zaleće.