

UNIVERZITET U BIHAĆU
TEHNIČKI FAKULTET
BIHAĆ

AUTOMATSKO UPRAVLJANJE II

Laboratorijske/Auditorne vježbe

Pozicioni servomehanizam i koračni (step) motor
(Vježba 5)

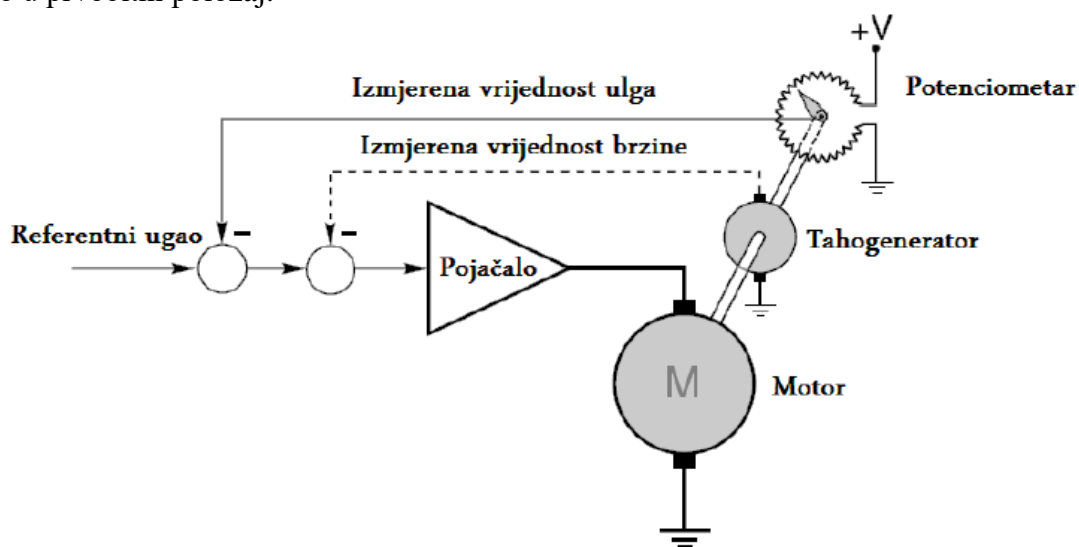
mr. Amel Toroman, dipl. ing.el.
Viši asistent

POZICIONI SERVOMECHANIZAM

Servo DC motor – Pozicioni servomehanizam – Elektromehanički sistem za prijenos ugla

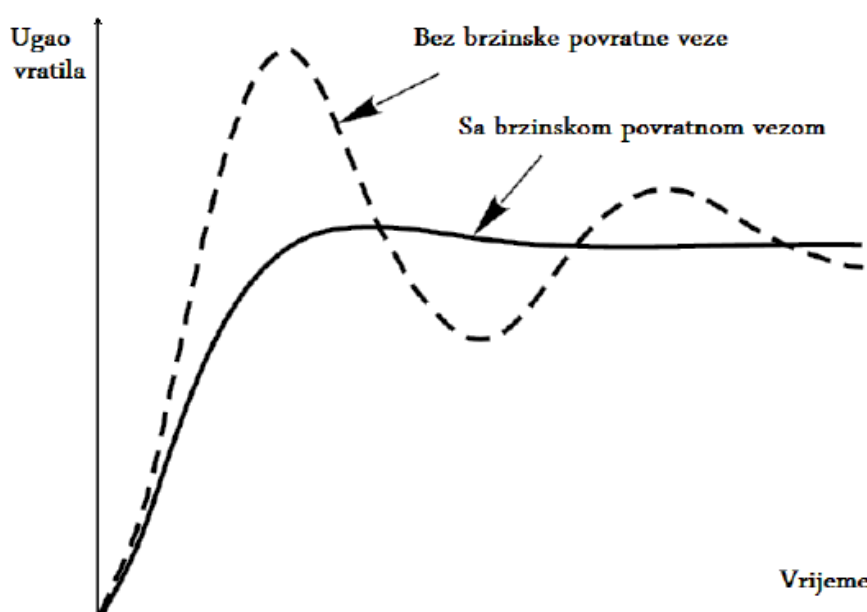
Prvi servomehanizmi su bili razvijeni za potrebe vojne industrije, i ubrzo su se proširili i u civilne svrhe. Servo riječ se ne nalazi baš često pored naziva nekog motora jer je postalo toliko normalno da se vrši regulacija brzine ili položaja kod motora da se više ta riječ i ne piše. Ali kada se riječ servo nalazi pored naziva nekog motora to nas treba da aludira da se radi o sistemima sa zatvorenim povratnom vezom. Na *Slici 1* je prikazan jedan *pozicioni servomehanizam*.

Zadatak ovog sistema jeste da vrtilo DC motora drži u nekom referentnom položaju, odnosno nekom referentnom uglu što je i jedna od ulaznih veličina u sumator. Da bi se mjerio položaj vratila koristi se potencijometar koji je direktno spojen na vrtilo motora. Potencijometar je promjenjivi otpornik čija otpornost zavisi od položaja klizača. Na početku neka se uzme pretpostavku da se motor nalazi u nekom položaju koji je različit od referentnog. Pošto je vrtilo spojeno na direktno na potencijometar zaokreta vratila će rezultirati promjenom napona na izlazu iz potencijometra. Ta promjena napona je ekvivalentna nekoj vrijednosti ugla. Izmjerena vrijednost napona se dovodi na komparator koji vrši poređenje signala iz potencijometra i referentnog signala. Oba ova signala su naponskog oblika ali postoji linearna zavisnost sa uglom zakreta vratila. Na primjer, ukoliko se pretpostavi da je referentni ugao 15° a neka je potencijometar izmjerio položaj od 22° . Da bi se motor držao pod uglom od 15° potreban je određeni napon, također potencijometar za ugao od 22° daje određeni napon, ti naponi se oduzimaju i cilju komparacije i razlika se dovodi na pojačalo. Pojačani signal razlike se onda dovodi na armaturu DC motora i vrši se pomjerane vratila motora u referentni položaj. Ovaj postupak će se ponavljati sve dok signal razlike ne bude jednak nuli, odnosno dok motor ne bude u referentnom položaju. Bilo koji fizički pokušaj da se vrtilo motora pomjeri rezultat će pomjeranjem klizača potencijometra, samim time i na izlazu iz potencijometra će se pojaviti nanovo signal koji će se referentnim signalom generirati signal greške koji će nastojati da vrati vrtilo u prvobitni položaj.



Slika 1. Pozicioni servomehanizam

Dinamičke performanse sistema prikazanog na *Slici 1* su veoma loše. Da bi se dobio brži odgovor sistema na pojavu razlike signala mora se pojačati signal koji ide na armaturu DC motora, što se više izvrši pojačanje signala brži je odgovor sistema ali to pojačanje ima za posljedicu pojavu oscilacija koje smanjuju stabilnost sistema. Ako je teret koji izbacuje vratilo iz referentnog položaja konstantne težine stabilnost sistema se može povećati dodavanjem brzinske povratne veze. Jedan od načina mjerenja brzine vrtila motora jeste pomoću *tahogeneratora*. Po svojoj konstrukciji tahogenerator predstavlja jedan običan generator istosmjerne struje koji kao pogon koristi obrtni moment uređaja uz pomoć kojeg se mjeri brzina. Izlaz iz tahogeneratora nema uticaja na statičko ponašanje sistema, pošto kada motor miruje izlaz iz tahogeneratora će biti jednak nuli. Tahogenerator značajno povećava prigušenost tranzijentnog odziva. Pa sada se može pojačati pojačanje pojačala da bi povećala brzina odziva pomoću podešavanja tahogeneratora može se osigurati odgovarajuće prigušenje.



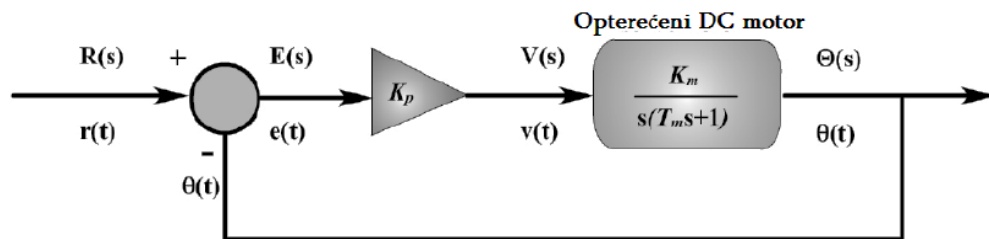
Slika 2: Odziv sistema na step ulaz

Na *Slici 2* prikazani su odzivi na step ulaza pozicionog servomehanizma sa povratnom vezom tahogeneratora i bez nje.

Simulacija rada pozicionog servomehanizma

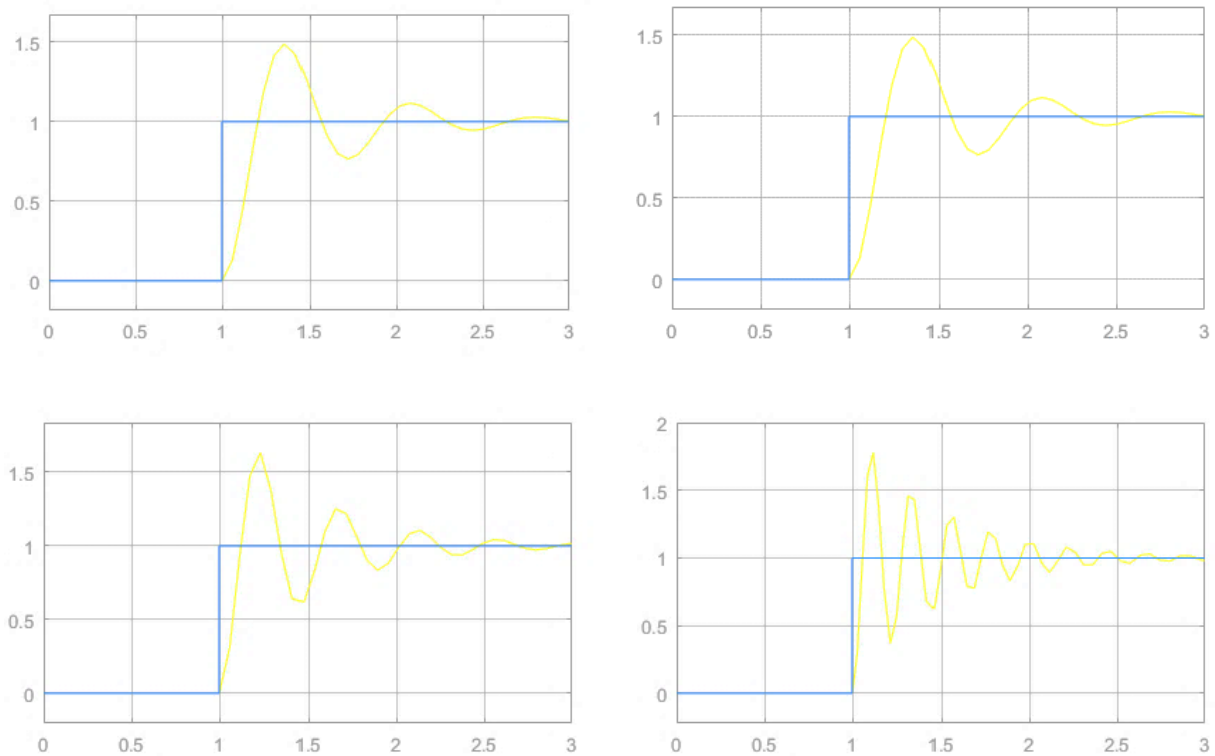
Primjer 1: Na *Slici 3* je predstavljena *shema pozicionog servomehanizma* o kojoj je već bilo riječi. Matematički model motora koji se koristi u ovom slučaju jeste *model opterećenog motora*. Za pojačanje signala koristi se pojačalo sa pojačanjem K_p . Oznaka K_m odnosi se na konstantu motora, a oznaka T_m na elektromehaničku vremensku konstantu koja ovisi o momentu inercije. Prenosna funkcija cijelog ovog sistema bi izgledala kao izraz (1):

$$\frac{\theta(s)}{R(s)} = \frac{K_p K_m}{s^2 + s + K_p K_m} \quad (1)$$



Slika 3. Blok dijagram pozicionog servomehanizma

Za kreiranje ovog modela koristiti će se Matlab/Simulink. Elementi koji su na potrebni za ovu simulaciju su: komparator, pojačalo, prenosna funkcija, ulaz odnosno step signal, jedan multiplexer i displej.

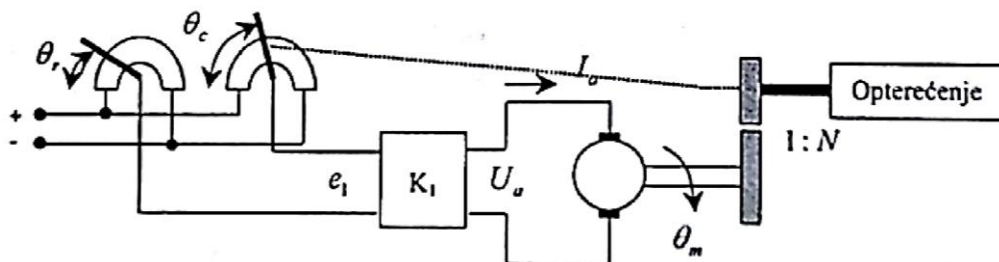


Slika 4. Rezultati simulacije pozicionog servomehanizma za $K_p=1$, $K_p=2$, $K_p=5$ i $K_p=20$.

Sa *Slike 4*, vidi se da za vrijednost koeficijenta pojačanja $K_p=2$ dobija se brži odziv sistema, za koeficijent $K_p=3$ još brži ali postaje primjetno da sistem počinje da oscilira odnosno da postaje ne stabilniji.

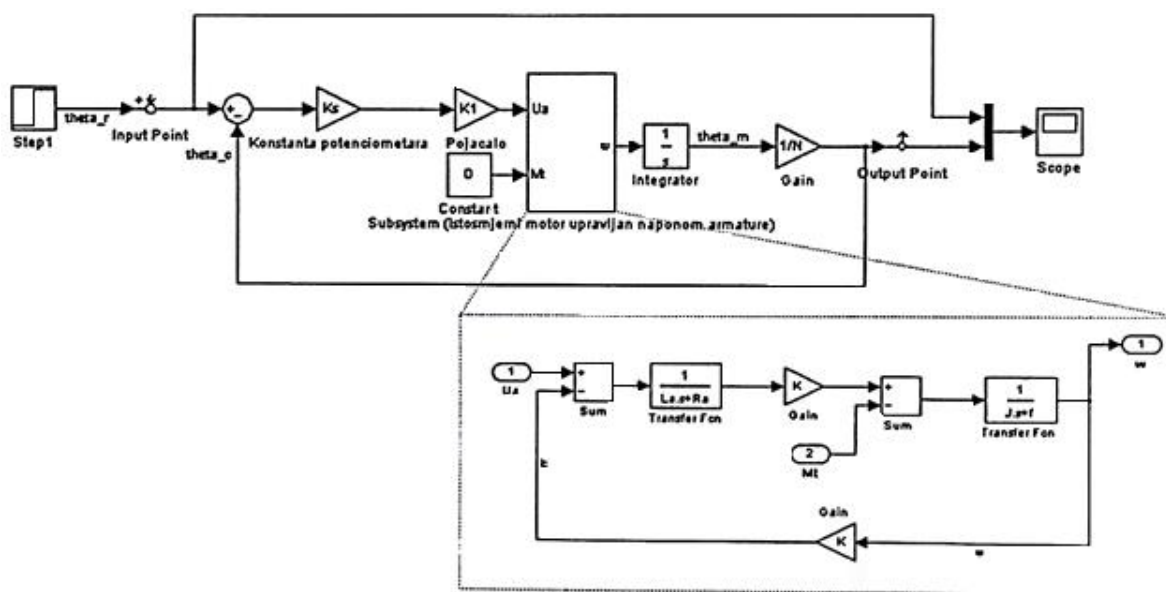
PRIMJER 2: Analiza utjecaja pojačanja pojačala na performanse pozicionog servomehanizma

Ispitati utjecaj promjene pojačanja pojačala u regulacionom krugu pozicionog servomehanizma (*elektromehaničkog sistema za prenos ugla*) na odziv sistema pri djelovanju *step* signala na ulazu. Pored toga ispitati opravdanost zanemarivanja L_a kod modela istosmjernog motora.



Slika 5. Principijelna shema elektromehaničkog sistema

Na Slici 5 prikazana je principijelna shema elektromehaničkog sistema za prenos ugla (pozicionog servomehanizma), koji se sastoji od ulaznog i izlaznog potencijometra identičnih karakteristika i istog napona napajanja i koji imaju istu konstantu K_s , elektronskog pojačala s koeficijentom naponskog pojačanja K_1 , jednosmjernog motora upravljanog strujom armature i mehaničkog reduktora prenosnog odnosa N .



Slika 6. Matlab shema elektromehaničkog sistema

Tabela 1. Parametri

Parametar	Vrijednost
K_s [V/rad]	1
R_a [Ω]	5
L_a [H]	0
J_m [kgm ²]	0.135e-2
f_m [Nm/(rad/s)]	0
J_o [kgm ²]	0.135
f_o [Nm/(rad/s)]	0.135
K [Nm/A] [V/(rad/s)]	0.6775
N	10
J [kgm ²]	$J_m + \frac{J_o}{N^2}$
f [Nm/(rad/s)]	$f_m + \frac{f_o}{N^2}$

Potrebno je:

1. U Matlab editoru kreirati inicijalni fajl *podaci.m* i pokrenuti ga iz *Matlab Command Window*. (Poznate vrijednosti date su u Tabeli 1)
2. U Simulinku kreirati simulacioni model i snimiti fajl pod *SimulacijaPS.mdl*.
3. Za $L_a=0$ [H] pronaći vrijednosti K_I za koju preskok u odzivu θ_c iznosi 20% (koristiti *Tools/Linear Analysis i LTI Viewer*).
4. Ponoviti pod 3. za vrijednost $L_a=0.001$ [H] i $L_a=0.1$ [H].

KORAČNI (STEP) MOTOR

Razvoj digitalnih računara dao je poticaj gradnje motora kojim bi se moglo neposredno digitalno upravljati, iz kojih bi se izlazni signal što neposrednije privodio računaru bez složenih *digitalno-analognih* i *analogno-digitalnih konvertera*. Budući da se od takvih motora zahtijevaju diskretni pomaci, odnosno *koračni mehanički pomaci*, dobili su naziv *koračni motori* (eng. *Step motors*).

Koračni su motori elektromehanički pretvornici energije, koji pulsnu, odnosno koračno-električnu pobudu pretvaraju u koračni mehanički pomak. Izrađuju se u rotacijskoj i translacijskoj izvedbi, premda je rotacijska izvedba, barem za danas, znatno brojnija. Koračni ("step") motori su od posebnog interesa u robotici, procesnom upravljanju i instrumentaciji. Oni omogućavaju precizno upravljanje rotacijom, ugaonim položajem, brzinom i smjerom obrtanja. Na malim koračnim brzinama rotor se zaustavlja na svakom koračnom položaju. Na srednjim brzinama nema zaustavljanja rotora na svakom koračnom položaju, ali kutna brzina oscilira ovisno o položaju. Što se koračna brzina više povećava, oscilacije kutne brzine postaju sve manje, tako da na velikim koračnim brzinama kutna brzina teži konstantnoj vrijednosti. Ovdje je vrijedno naglasiti da je velika koračna brzina relativan pojam, a ovisno o konstrukciji, kod komercijalnih motora se kreće od 100 do preko 10.000 koraka u sekundi.

Prednosti koračnih motora su:

- Niska cijena.
- Male dimenzije i masa.
- Velike funkcijske mogućnosti.
- Često se isporučuju integrirano s radnim mehanizmom
- Pretvara digitalne ulazne impulse u analogno kretanje:
- Uključenje napona naredne faze - pomak za 1 korak,
- Broj koraka = broj upravljačkih impulsa (jedan korak odgovara određenom fiksnom uglu zaokreta).
- Ugao rotacije motora je proporcionalan ulaznom impulsu.
- Odziv rotora na digitalne impulse omogućuje upravljanje u otvorenoj petlji (upravljanje položajem radne osovine bez povratne veze → jednostavno je realizirati sistem upravljanja većim brojem motora (roboti, pisači)).
- Ne akumulira pogrešku položaja.
- Jednostavne su konstrukcije i ne zahtijevaju održavanje.
- Motor ima puni moment u zastoju (ako su namoti napajani).
- Precizno pozicioniranje i ponovljivost pokreta, budući da dobri koračni motori imaju pogrešku od 3-5% od ukupnog koraka.
- Odličan odziv na zalet, zaustavljanje i promjenu smjera.
- Veoma pouzdani jer nemaju kontaktnih četkica u motoru. Osim toga, životni vijek motora jednostavno ovisi o životnom vijeku ležajeva.

- Moguće je postići veoma sporu sinhronu brzinu rotacije kada je osovina direktno opterećena (teret na osovini).
- Može se realizirati široko područje raspoloživih brzina jer je brzina proporcionalna frekvenciji ulaznih impulsa

Nedostaci koračnih motora:

- Fiksni korak.
- Razmjerno mala efikasnost, veliko nadvišenje i oscilatornost u odzivu od jednog koraka.
- Ograničene mogućnosti pokretanja tereta s velikim momentom inercije.
- Moment trenja i aktivni teret mogu povećati pogrešku položaja (moguće je gubitak koraka – posljedica je akumulirana pogreška položaja).
- Mogućnost pojave rezonancije ako nije adekvatno upravljanje.
- Rad neprikladan i teško ih je upravljati na velikim brzinama

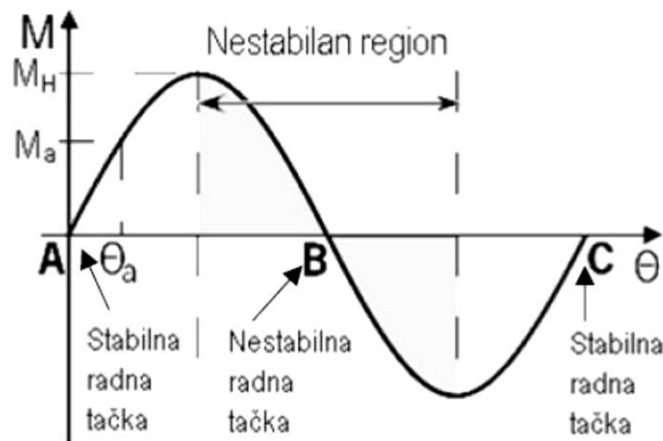
Svojstva koračnih motora

Ono na što treba obratiti pažnju pri odabiru i kupovni koračnog motora su njegova svojstva, i to:

- **Rezolucija** predstavlja 'preciznost', odnosno ona je definisana uglom zaokreta. Rezolucija rotacijskih koračnih motora može biti definisana na dva načina:
 - N_k [kor/okr] broj koraka po okretaju
 - α_k [°] iznos korak u stepenima

Dok je kod linearnih koračnih motora rezolucija definisana sa parametrom x_k [mm].

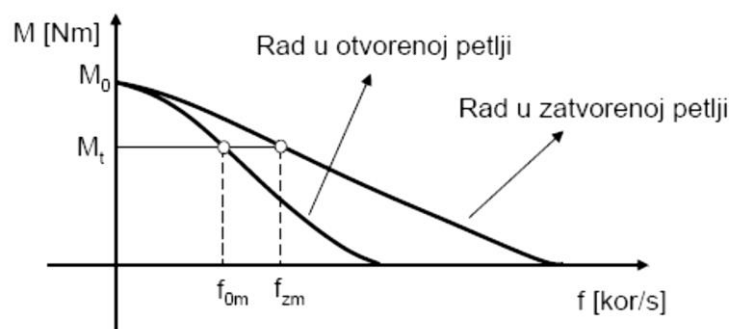
- **Odziv jednog koraka** pokazuje brzinu, oscilatornost i tačnost odziva. Napajanje jedne faze se isključuje, a napajanje naredne faze se uključuje i tako motor pravi jedan korak. Uslijed pomaka motora za jedan korak javlja se oscilatornost zbog inercije
- **Tačnost** koračnog motora određena je tačnošću izrade, a greška pozicije zbog konstrukcije je $\theta_m = 1$ do 5%
- **Statički moment motora (moment držanja, eng. holding torque)** je ovisnost uspostavljenog momenta u motoru o pomaku rotora $M=f(\theta)$. Krutost koračnog motora može se povećati povećanjem statičkog momenta.



Slika 7. Prikaz ovisnosti statičkog momenta M_A faze A o položaju rotora

A i C su *stabilne* radne tačke, poravnanje polova rotora i statora. Dok tačka B predstavlja *nestabilnu* radnu tačku, pol rotora tačno na sredini između dva pola statora.

- **Dinamički moment (pull-out torque)** ovisnost srednje vrijednosti momenta u motoru o brzini vrtnje (frekvenciji) $M=f(f)$. Maksimalna vrijednost momenta tereta (moment kojim se motor smije opteretiti) kojim se u stacionarnom stanju smije opteretiti koračni motor na određenoj brzini, a da rotor ne ispadne iz sinhronizma (izgubi korak) s upravljačkim impulsima i motor se ne zaustavi (motor se ne zalijeće pod tim teretom).



Slika 8. Prikaz ovisnosti dinamičkog momenta motora M o brzini vrtnje

Gdje je M_0 - maksimalan moment u mirovanju.

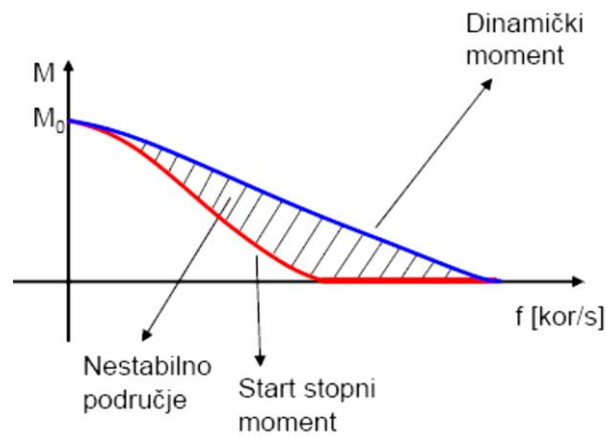
Upravljanje u otvorenoj petlji:

- zaliha momenta (50-100)%,
- maksimalna brzina vrtnje f_{0m} nije velika.

Upravljanje u zatvorenoj petlji:

- postiže se veći moment i brzina vrtnje $f_{zm} > f_{0m}$
- M_t raste $\rightarrow f_z$ pada (pouzdan rad pogona)

- **Start-stopni moment (Pull-in torque)** moment tereta s kojim motor pri zadanoj frekvenciji koračnih impulsa može krenuti (startati), a da ne izgubi korak (u jednom koraku postiže zadanu brzinu).



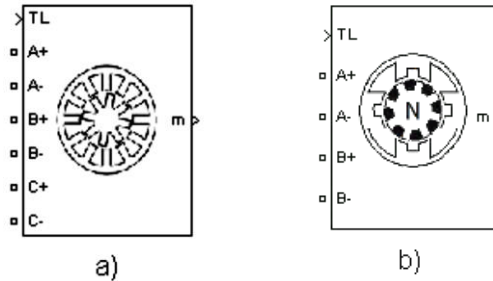
Slika 9. Start-stopni moment

Područje između krivulja start-stopnog i dinamičkog momenta je nestabilno da bi radio u njemu motor se mora ubrzavati po određenom algoritmu. Dinamički moment motora dozvoljeno opterećenje kad se motor već vrti.

Model koračnog motora (stepper motor)

Na *Slici 10* predstavljena su dva modela koračnih motora i to:

- motor s varijabilnom reluktancijom
- motor sa stalnim magnetima ili hibridni motori

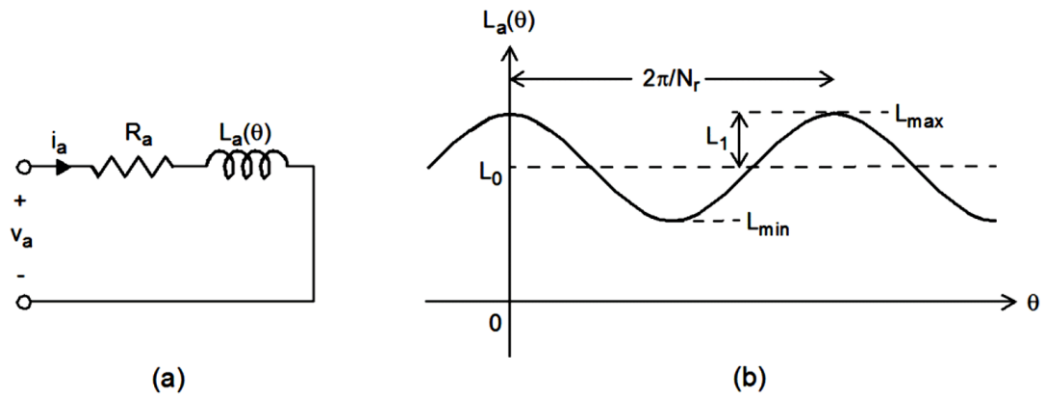


Slika 10. a) Motor s varijabilnom reluktancijom b) Motor sa stalnim magnetima ili hibridni

Prilikom formiranja modela koračnog motora posmatra se odvojeno električni i mehanički dio.

Električni dio predstavlja nadomjesni sklop koji ovisi o konfiguraciji i tipu motora. U ovom radu model je izrađen sa pretpostavkom da je magnetno kolo linearno (bez zasićenja) i uzajamna indukcija između indukcija između dvije faze je zanemarljiva.

Mehanički temelji se na inercionom momentu i viskoznom trenju. Za koračni motor s varijabilnom reluktancijom, ciklus za jednu fazu je prikazan na *Slici 11*.



Slika 11. a) Električna shema koračnog motora b) Ciklus za jednu fazu

U ovom modelu R_a i $L_a(\theta)$ predstavljaju retrospektivno otpor i induktivitet faze A. Namotajni induktivitet varira kao funkcija pozicije rotora i računa prema izrazu (2):

$$L_a(\theta) = L_0 + L_1 \cos(N_r \theta) \quad (2)$$

Gdje je:

- L_0 - prosječni induktivitet,
- L_1 - maksimalan induktivitet,
- N_r - broj zubi rotora.

Sa slike vidi se da je u referentnoj poziciji ($\theta=0$), zub rotora se u potpunosti poklapaju sa osom A, tako da je induktivitet tada maksimalan.

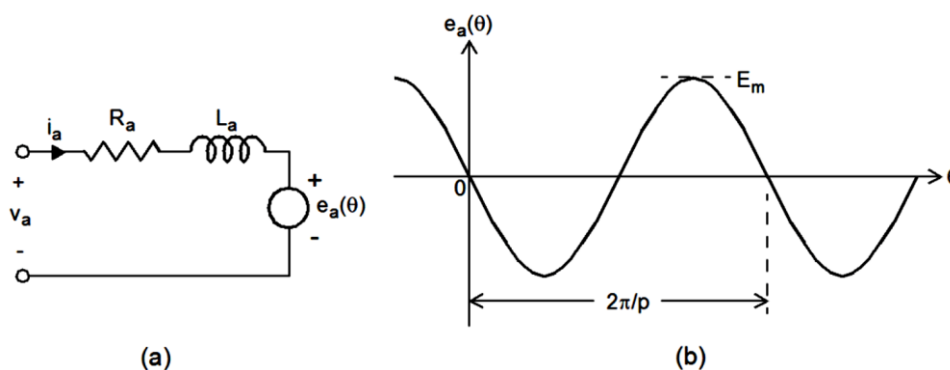
Ukupni moment koji proizvodi motor predstavlja sumu momenata u svakoj fazi motora, tj.:

$$T_e = \sum_{x=1}^m 0.5(i_x)^2 \frac{dL_x}{d\theta} \quad (3)$$

Gdje je:

- m- broj faza,
- i_x - struja u namotu faze x motornih faza,
- L_x - induktivitet faze x.

Za motor sa stalnim magnetima ili hibridni motor, nadomjesni sklop je prikazan na *Slici 12*.



Slika 12. a) Električna shema hibridnog koračnog motora b) Ciklus za jednu fazu

Zbog velike vrijednosti zračne šupljine uvedene od strane magneta, induktivitet kod motora sa stalnim magnetom ili hibridnog motora koračnog motora se može smatrati da ne ovisi o položaju rotora. Izvor napona $e_a(\theta)$ predstavlja EMS (elektromotorana sila) koja je sinusna funkcija položaja rotora.

$$e_a(\theta) = -p\psi_m \sin(p\theta) \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

Gdje je:

- p- broj pari polova,
- ψ_m -maksimalan magnetni fluks.

Kao što se može vidjeti sa *Slike 17* u referentnoj poziciji ($\theta=0$), sjeverni pol na rotoru se u potpunosti podudara sa osom A pa je EMS jednaka nuli. Elektromagnetni moment od dvije faze hibridnog step motora je jednak sumi:

- Momenta usljed interakcije faznih struja
- Magnetnog fluksa
- Zadržnog momenta

što rezultira sa **ispupčenosti** rotora

$$T_e = -p\psi_m i_a \sin(p\theta) - p\psi_m i_b \sin\left(p\theta - \frac{\pi}{2}\right) - T_{dm} \sin(2p\theta) \quad (5)$$

Parametri *step motora* su: broj faza, zadržni moment, ugao zakreta, napon po fazi, struja po fazi, otpor (R_a), maksimalni induktivitet (L_{max}), prosječni induktivitet (L_0) i inercija otpora (J).

Kod motora sa stalnim magnetima ili hibridni motori također parametre daje proizvođač, a to su: *moment zadržavanja, ugao zakreta, napon faze, struja faze, namotni otpor, induktivitet namota, srednji induktivitet i inercija rotora.*

Maksimalni okretni moment nije uvijek naveden (T_{dm}). Ovaj prametar se može pretpostaviti da iznosi 1-10% od maksimalnog momenta držanja. Takođe, maksimalni fluks (ψ_m) nije uvijek naveden od strane proizvođača. Ovaj parametar se može dobiti pri konstantnoj brzini motora N i mjerenju maksimalne elektromotorne sile E_m (V). Onda se parametar ψ_m se može izračunati po relaciji (6):

$$\psi_m = \left(\frac{30}{p\pi}\right) \left(\frac{E_m}{N}\right) \quad (6)$$

Gdje je:

- p - broj polova dat sa (7)

$$p = \frac{360}{2m \cdot \text{step}}$$

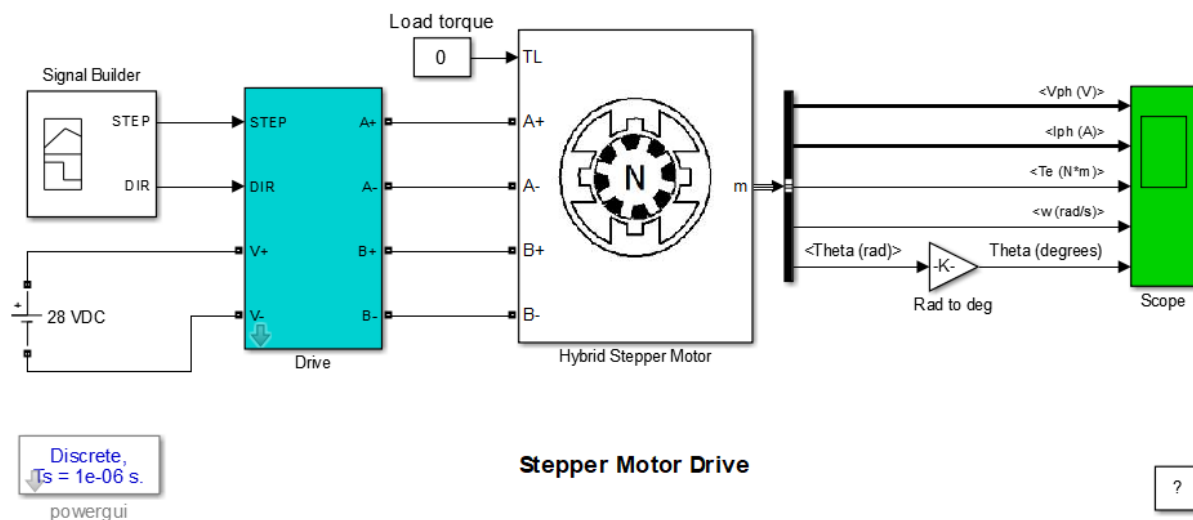
Gdje je:

- m - broj faza,
- step - ugao zakreta (stepenima)

Mehaničko opterećenje okretni moment (T_L [Nm]) je pozitivan na rad motora, a negativan na rad generatora. Na izlazu iz Simulinka je vektor koji sadrži pet signala. Pomoću DEMUX-a tih signala i korištenja BUS SELECTOR-a mogu se ti podaci pohraniti u Simulink biblioteci.

PRIMJER 1:

Demo power_steppermotor ilustrira rad koračnog motora i koristi se dvofazni hibridni model.



Slika 13. Simulacija hibridnog motora u Matlab Simulinku

Fazne struje motora su nezavisno kontrolisane sa dva histerezna kontrolera koji generišu mosfet drive signale uspoređujući mjerne struje sa njihovim referentnim. Kvadratne amplitudne referentne struje su generisane korištenjem amplitude struje i step frekventnih parametara specificiranih u radnom prozoru.

Tabela 2. Izlazi iz Simulinka

Signal	Definicija	Jedinica	Simbol
1	Fazni napon	V	V_{ph}
2	Fazna struja	A	I_{ph}
3	EMS	N,m	T_e
4	Brzina rotora	rad/s	w
5	Pozicija rotora	Rad	Theta



Slika 14. Izlazi iz sistema hibridnog step motora

Pomjeranje step motora je kontrolisano sa STEP i DIR signalima primljenih iz vanjskih izvora. Sljedeći talasni oblici su dobiveni iz simulacije od 0.25 sec rada step motora u kojem step motor se okreće 0.1 sec u pozitivnom smjeru, zuastavlja se 0.05 sec i okreće se u suprotnom smjeru 0.05 sec i staje.