



FER

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
F A K U L T E T
ELEKTROTEHNIKE
I RAČUNARSTVA
Z A V O D Z A
ELEKTROSTROJARSTVO
I AUTOMATIZACIJU

UPRAVLJANJE ELEKTROMOTORNIM POGONIMA

Zadaci za vježbu:

UPRAVLJANJE ISTOSMJERNIM STROJEVIMA

Autori:

Prof.dr.sc. Fetah Kolonić

Doc.dr. sc. Damir Sumina

Martina Kutija, dipl. ing.

Zagreb, studeni 2011.

Zadatak 1.

Elektromotorni pogon dizalice ostvaren je nezavisno uzbuđenim istosmjernim motorom nazivnih podataka: $P_n = 32 \text{ kW}$, $U_n = 440 \text{ V}$, $I_n = 83 \text{ A}$, $n_n = 1000 \text{ min}^{-1}$. Otpor armaturnog kruga iznosi $R_a = 0,35 \Omega$. Odrediti:

- Motor koči elektrodinamički uz uključene otpore brzinom vrtnje $n = 500 \text{ min}^{-1}$ s nazivnom strujom. Koliki mu je predotpor uključen?
- Koliki otpor treba priključiti za protustrujno kočenje (protustrujno spuštanje) ako se želi postići brzina vrtnje $n = 600 \text{ min}^{-1}$ s opterećenjem od $I = 55 \text{ A}$. Koliki je tada moment na osovini, snaga uzeta iz mreže i snaga utrošena u otporima?
- Pri generatorskom kočenju (bez predotpora) izmjerena je struja od $I = 70 \text{ A}$. Kolika je brzina vrtnje?

Napomena: Pretpostaviti da su mehanički gubici rezultat viskoznog trenja.

Rješenje

a)

Iz nazivnih podataka motora slijedi:

$$c_e = c_m = \frac{U_n - I_n R_a}{\omega_n} = \frac{440 - 83 \cdot 0,35}{\frac{1000 \cdot \pi}{30}} = 3,92,$$

a iz naponske jednadžbe stroja:

$$R_p = -\frac{E}{I_n} - R_a = -\frac{c_e \cdot \omega}{I_n} - R_a = -\frac{3,92 \cdot \frac{500 \cdot \pi}{30}}{-83} - 0,35 = 2,12 \Omega.$$

b)

Iznos predotpora za protustrujno kočenje se također dobije iz naponske jednadžbe i iznosi

$$R_p = \frac{U_n - E}{I} - R_a = \frac{440 - 3,92 \cdot \frac{600 \cdot \pi}{30}}{55} - 0,35 = 12,13 \Omega.$$

Nazivni elektromagnetski moment iznosi

$$M_{emn} = c_m \cdot I_n = 3,92 \cdot 83 = 325,36 \text{ Nm},$$

a nazivni moment na osovini stroja iznosi:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = 305,58 \text{ Nm}.$$

Iz razlike momenata moguće je odrediti koeficijent viskoznog trenja (u zadatku je zadano da se pretpostavi da je razlika između momenata rezultat viskoznog trenja):

$$b = \frac{M_{emn} - M_n}{\omega_n} = 0,189 \text{ Nm s /rad}$$

Pri spuštanju tereta elektromagnetski moment iznosi:

$$M_{em} = c_m \cdot I = 3,92 \cdot 55 = 215,6 \text{ Nm}$$

Moment na osovini iznosi:

$$M_m = M_{em} - b \cdot \omega = 215,6 - 0,189 \cdot \left(-\frac{600\pi}{30}\right) = 227,48 \text{ Nm}$$

Snaga uzeta iz mreže iznosi:

$$P_{mreza} = U_n \cdot I = 440 \cdot 55 = 24200 \text{ W}$$

Snaga utrošena u otporima:

$$P_g = I^2 \cdot (R_a + R_p) = 55^2 \cdot (0,35 + 12,13) = 37752 \text{ W}$$

c)

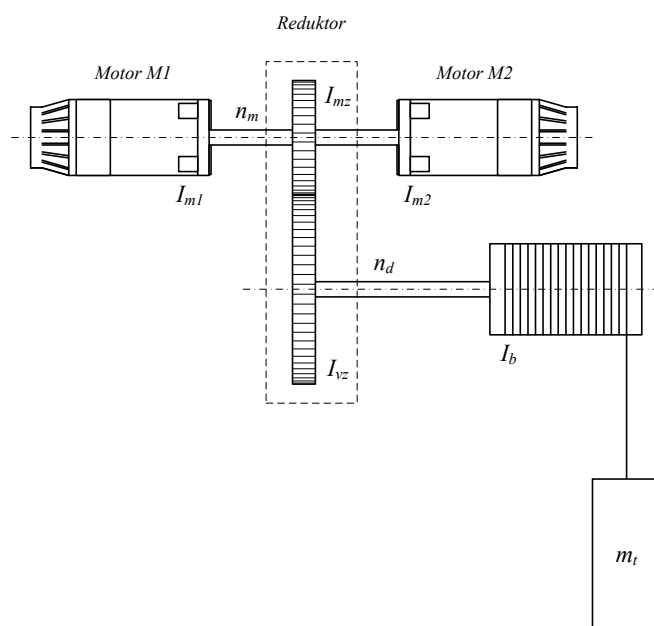
Brzinu je moguće odrediti iz sljedećeg izraza:

$$\omega = \frac{U_n - I \cdot R_a}{c_e} = \frac{-440 - 70 \cdot 0,35}{3,92} = -118,5 \text{ rad/s} \Rightarrow n \approx -1132 \text{ min}^{-1}$$

Zadatak 2.

Dva istosmjerna nezavisno uzbuđena motora, nazivnih podataka $U_n = 80 \text{ V}$, $I_n = 100 \text{ A}$, $n_n = 1000 \text{ min}^{-1}$ i $R_a = 0,06 \Omega$, preko zupčastog prijenosnika korisnosti $\eta_{zp} = 0,88$ pogone izlaznu osovину spoјenu s bubnjem promjera $D_b = 2,4 \text{ m}$ (sl. 1). Na bubanj je namotano pleteno čelično užе čijim se namatanjem (odmatanjem) diže (spušta) teret. Korisnost prijenosa bubanj užе iznosi $\eta_b = 0,76$. Motori se napajaju preko četverokvadrantnog čopera na čijem ulazu se nalaze dvije seriјski spoјene baterije od 48 V. Sklopka se upravlja bipolarnom modulacijom.

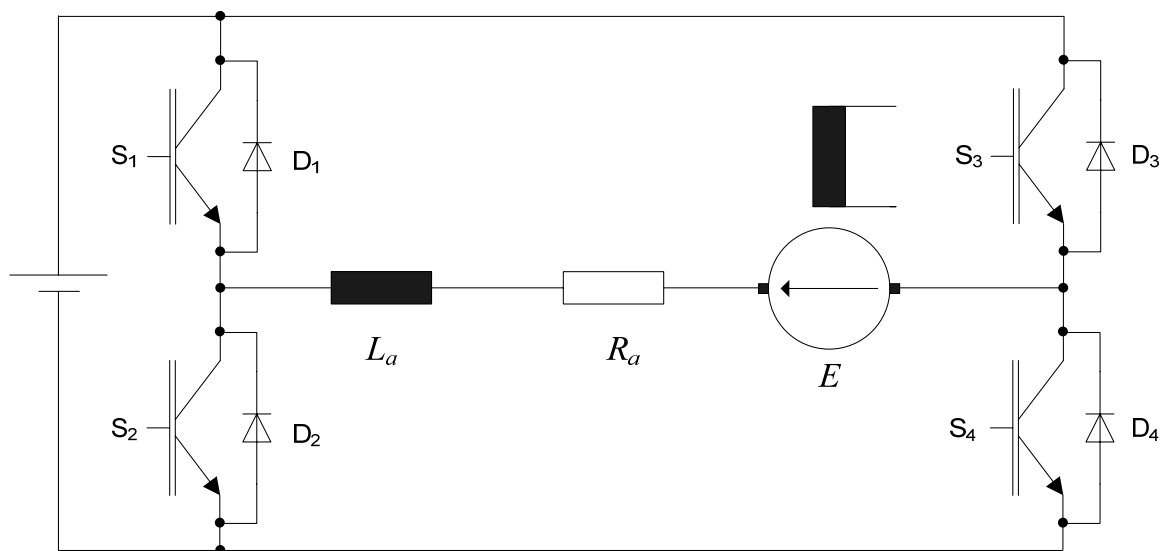
- Skicirati četverokvadrantni čoper i jednu periodu napona na motoru.
- Odrediti prijenosni omjer zupčastog prijenosnika, tako da se pri nazivnoj brzini motora teret podiže brzinom $v = 4 \text{ m/s}$.
- Koliko trebaju iznositi faktori vođenja sklopki tako da oba motora budu jednako opterećena prilikom podizanja tereta mase $m_t = 100 \text{ kg}$ brzinom 3 m/s ?
- Ako se motor M_1 isključi s napajanja, koliko će iznositi struja motora M_2 ? Kojom brzinom će se pri tome dizati teret?



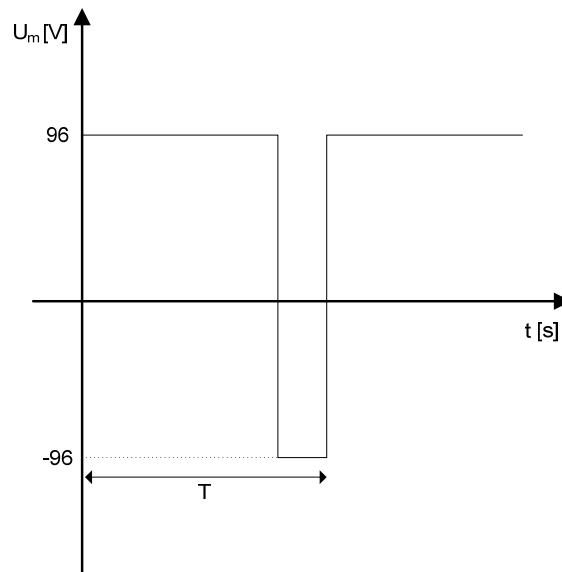
Slika 1. Primjer dizanja tereta (potencijalni moment)

Rješenje

a)



Slika 2. Četverokvadrantni čoper



Slika 3. Napon motora pri napajanju četverokvadrantnim čoperom

b)

Da bi se teret dizao brzinom 4 m/s, bubanj se treba okretati brzinom:

$$\omega_b = \frac{v_t}{R_b}$$

Nazivna brzina vrtnje iznosi:

$$\omega_n = \frac{n_n \cdot \pi}{30}$$

Da bi se pri nazivnoj brzini motora teret podizao brzinom 4 m/s, prijenosni omjer zupčastog prijenosnika treba iznositi:

$$i = \frac{\omega_n}{\omega_b} = \frac{n_n \cdot \pi \cdot R_b}{30 \cdot v_t} = \frac{n_n \cdot \pi \cdot R_b}{30 \cdot v_t} = \frac{1000 \cdot \pi \cdot 1,2}{30 \cdot 4} = 31,42$$

c)

Snaga potrebna za podizanje tereta brzinom 3 m/s iznosi:

$$P_t = m_t \cdot g \cdot v_t$$

Snaga pojedinog motora iznosi:

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_t}{\eta_{zp} \cdot \eta_b} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_t \cdot g \cdot v_t}{\eta_{zp} \cdot \eta_b}$$

Moment pojedinog motora pri tome iznosi:

$$\begin{aligned} M_m &= \frac{P_m}{\omega_n} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_t \cdot g \cdot v_t}{\omega_n \cdot \eta_{zp} \cdot \eta_b} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_t \cdot g \cdot v_t}{i \cdot \omega_b \cdot \eta_{zp} \cdot \eta_b} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_t \cdot g \cdot v_t}{i \cdot \frac{v_t}{R_b} \cdot \eta_{zp} \cdot \eta_b} = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{m_t \cdot g \cdot R_b}{i \cdot \eta_{zp} \cdot \eta_b} = \frac{1}{2} \cdot \frac{100 \cdot 9,81 \cdot 1,2}{31,42 \cdot 0,88 \cdot 0,76} = 28,01 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Iz nazivnih podataka motora slijedi:

$$c_e = c_m = \frac{U_n - I_n R_a}{\omega_n} = \frac{80 - 100 \cdot 0,06}{\frac{1000 \cdot \pi}{30}} = 0,7066$$

Pri podizanju tereta brzinom 3 m/s protuelektromotorna sila iznosi:

$$E = c_e \cdot \omega_m = c_e \cdot i \cdot \omega_b = c_e \cdot i \cdot \frac{v_t}{R_b} = 0,7066 \cdot 31,42 \cdot \frac{3}{1,2} = 55,5 \text{ V}$$

Struja motora pri podizanju tereta iznosi (moment trenja i ventilacije motora se zanemaruje):

$$I = \frac{M_m}{c_m} = \frac{28,01}{0,7066} = 39,64 \text{ A}$$

Iz dobivenih podataka moguće je odrediti napon armature pojedinog motora:

$$U = E + I \cdot R_a = 55,5 + 39,64 \cdot 0,06 = 57,88 \text{ V}$$

Za određeni napon faktor vođenja treba iznositi:

$$D = \frac{U + U_{DC}}{2 \cdot U_{DC}} = \frac{57,88 + 96}{2 \cdot 96} = 0,801$$

d)

U ovom slučaju cjelokupan teret preuzima jedan motor pa njegov moment iznosi:

$$M_m = \frac{\frac{P_t}{\eta_{zp} \cdot \eta_b}}{\omega_m} = 56,02 \text{ Nm}$$

Struja armature motora pri tome iznosi:

$$I = \frac{M_m}{c_m} = \frac{56,02}{0,7066} = 79,28 \text{ A}$$

Protuelektromotorna sila iznosi:

$$E = U - I \cdot R_a = 57,88 - 79,28 \cdot 0,06 = 53,12 \text{ V}$$

Brzina vrtnje iznosi:

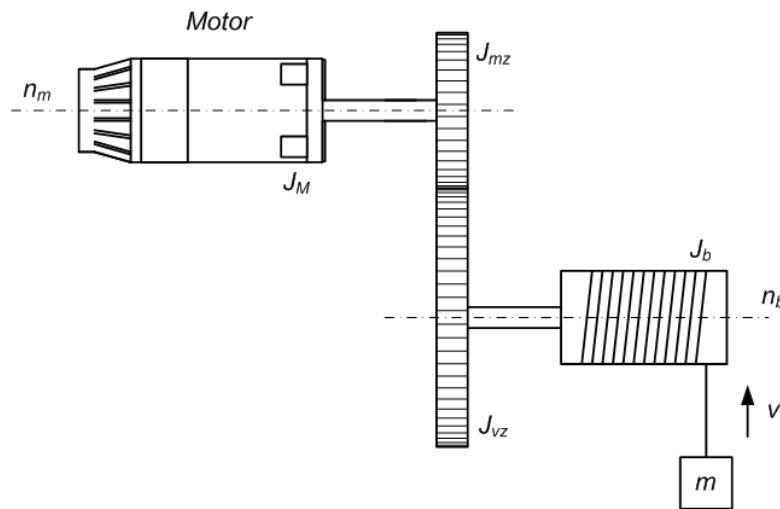
$$\omega_m = \frac{E}{c_e} = \frac{53,12}{0,7066} = 75,21 \text{ rad/s}$$

Brzina podizanja tereta:

$$v_t = \omega_t \cdot R_b = \frac{\omega_m}{i} \cdot R_b = \frac{75,21}{31,42} \cdot 1,2 = 2,87 \text{ m/s}$$

Zadatak 3.

Istosmjerni motor momenta tromosti $J_m = 0,075 \text{ kg m}^2$ preko malog zupčanika momenta tromosti $J_{mz} = 0,012 \text{ kg m}^2$ pogoni drugu osovinu s većim zupčanicom ukupnog momenta tromosti $J_{b+vz} = J_b + J_{vz} = 0,888 \text{ kg m}^2$. Na drugoj osovinu nalazi se bubanj s užetom na kojega je obješen teret mase $m = 500 \text{ kg}$. Omjer reduktora iznosi $i = 15$. Korisnost zupčanog prijenosa iznosi $\eta_{zp} = 0,76$, a korisnost prijenosa bubanj uže $\eta_b = 0,92$. Odrediti moment tereta reduciran na osovinu motora i ukupan moment tromosti sustava. Polumjer bubnja iznosi $0,5 \text{ m}$.



Slika 4. Dizanje tereta pomoću reduktora između motora i radnog mehanizma (bubanj s elastičnim užetom)

Rješenje

Ukupna zamašna masa reducirana na osovinu motora iznosi $J = 0,887 \text{ kg m}^2$.

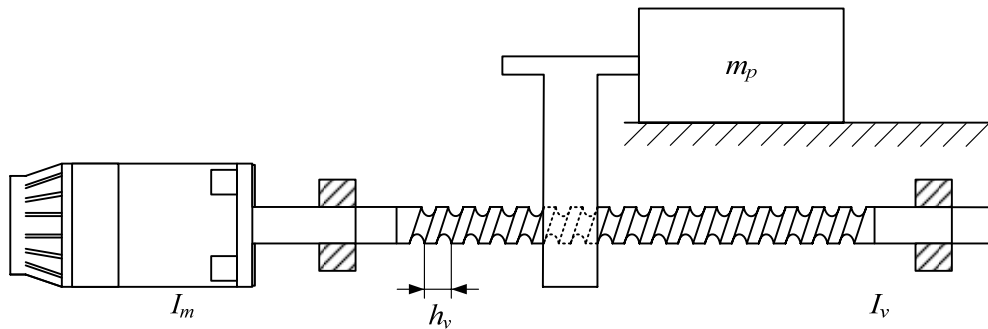
Zadatak 4.

Nezavisno uzbuđeni istosmjerni motor nazivnih podataka: $P_n = 33150 \text{ W}$, $U_n = 440 \text{ V}$, $I_n = 80 \text{ A}$, $n_n = 1000 \text{ min}^{-1}$, $R_a = 0,32 \Omega$ i $J_m = 0,1 \text{ kg m}^2$ pokreće posmični pogon s navojnim vretenom momenta inercije $I_v = 0,6 \text{ kg m}^2$ i uspona $h_v = 1 \text{ cm}$. Korisnost posmičnog pogona s navojnim vretenom iznosi $\eta_{pp} = 0,85$. Posmični pogon pomiče paket mase $m_p = 5 \text{ t}$ uz horizontalnu plohu. Faktor trenja između podloge i paketa iznosi $\mu = 0,3$.

Masa posmičnog pogona se zanemaruje.

- Kolikom brzinom se treba okretati osovina motora da bi se paket gibao brzinom $v_p = 0,1 \text{ m/s}$?
- Ako je motor spojen na nazivni napon koliko iznosi struja motora?

- c) Koliki predotpor je potrebno dodati u armaturni krug da bi se paket gibao brzinom 0,05 m/s?



Slika 5. Posmični pogon s navojnim vretenom

Rješenje

- a) Osovina motora se treba okretati brzinom 600 min^{-1} .
- b) Struja motora iznosi 6,96 A.
- c) Potrebno je dodati predotpor od 45,02 Ω .

Zadatak 5.

Nezavisno uzbuđeni istosmjerni motor s nazivnim podacima $P_n = 32 \text{ kW}$, $U_n = 440 \text{ V}$, $I_n = 80 \text{ A}$, 1000 o/min , $R_a = 0,32 \Omega$, pokreće teret s momentnom karakteristikom koja se mijenja po krivulji $M_t = kn^2$. Pri nazivnoj brzini vrtnje motor je opterećen nazivnim momentom. Koliki predotpor treba dodati u armaturni krug da motor pogoni teret brzinom 800 o/min ?

U obzir je potrebno uzeti gubitke trenja i ventilacije (pretpostaviti da su konstantni, iznos jednak iznosu na nazivnoj brzini vrtnje).

Rješenje:

Potrebno je dodati predotpor od 1,79 Ω .

Zadatak 6.

Istosmjerni motor s nezavisnom uzбудom nazivnih podataka: $U_n = 420 \text{ V}$, $I_n = 40,6 \text{ A}$, $n_n = 1480 \text{ min}^{-1}$, $P_n = 13,5 \text{ kW}$ napaja se iz 4-kvadrantnog tiristorskog usmjerivača. U sustavu regulacije brzine vrtnje motora (PI regulator brzine vrtnje) skokovitim promjenama referentne vrijednosti brzine ostvarena je sljedeća sekvenca upravljanja: zalet motora s 0 na 50 % nazivne brzine vrtnje, reverziranje na -50% nazivne brzine vrtnje te kočenje na brzinu vrtnje jednaku nula. Tijekom izvođenja opisane sekvence motor je bio neopterećen, a uzбудna struja konstantna. Potrebno je kvalitativno skicirati odzive struje armature i brzine vrtnje motora za slučaj:

- a) aperiodskog odziva,

- b) prigušenih oscilacija u struji armature,
- c) nestabilnog odziva.

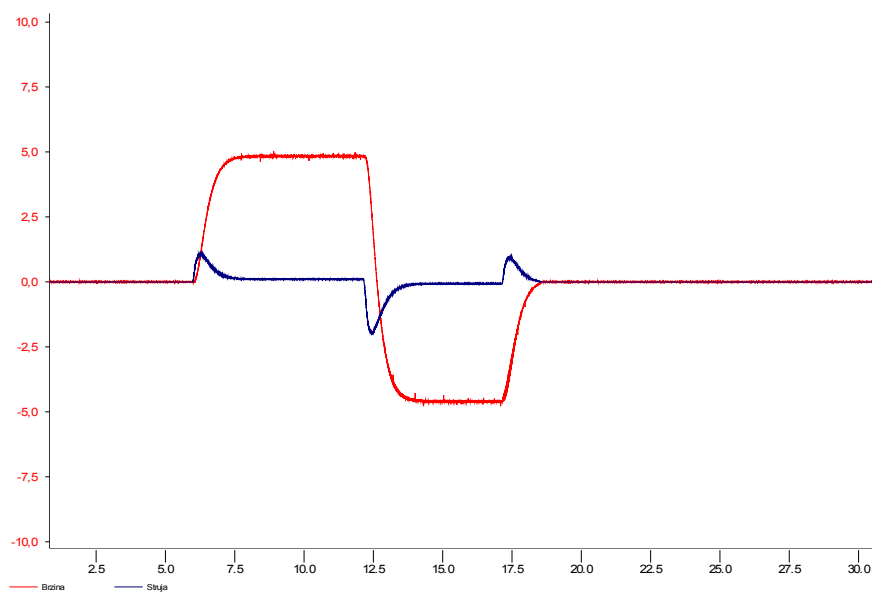
Rješenje:

Na prikazanim grafovima vrijedi sljedeća legenda:

crveno- brzina vrtnje motora u mjerilu: $10V = n_n$

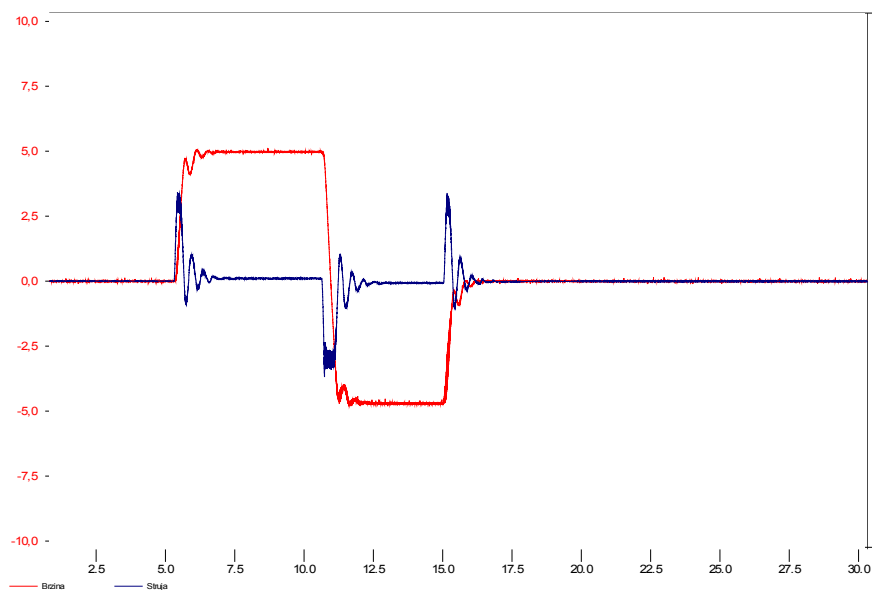
plavo- struja armature motora u mjerilu: $10V = I_n$

- a) Aperiodski odziv brzine i struje pri sekvenci: zalet-reverziranje-kočenje



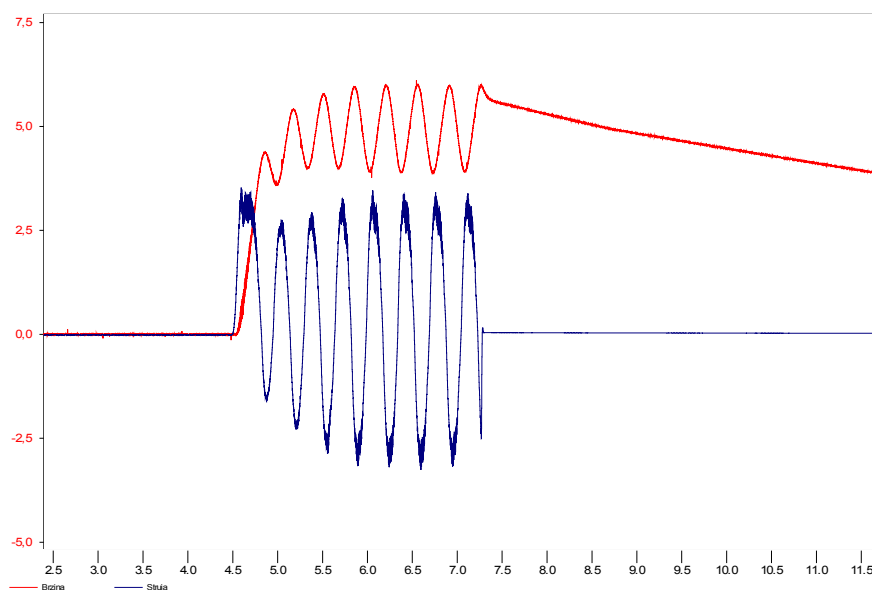
Slika 6. Brzina vrtnje i struja armature pri sekvenci: zalet-reverziranje-kočenje

b) Prigušeno oscilatoran odziv brzine i struje pri sekvenci: zalet-reverziranje-kočenje



Slika 7. Brzina vrtnje i struja armature pri sekvenci: zalet-reverziranje-kočenje

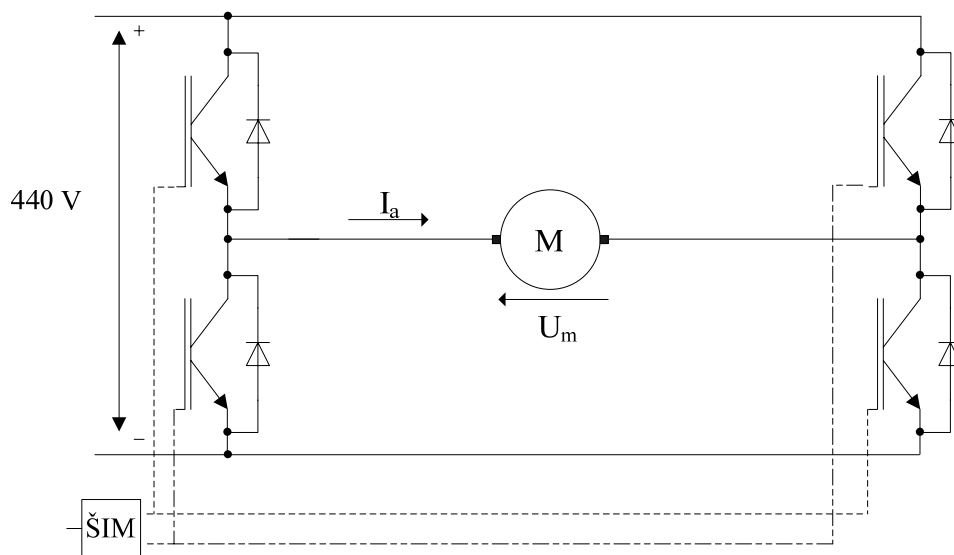
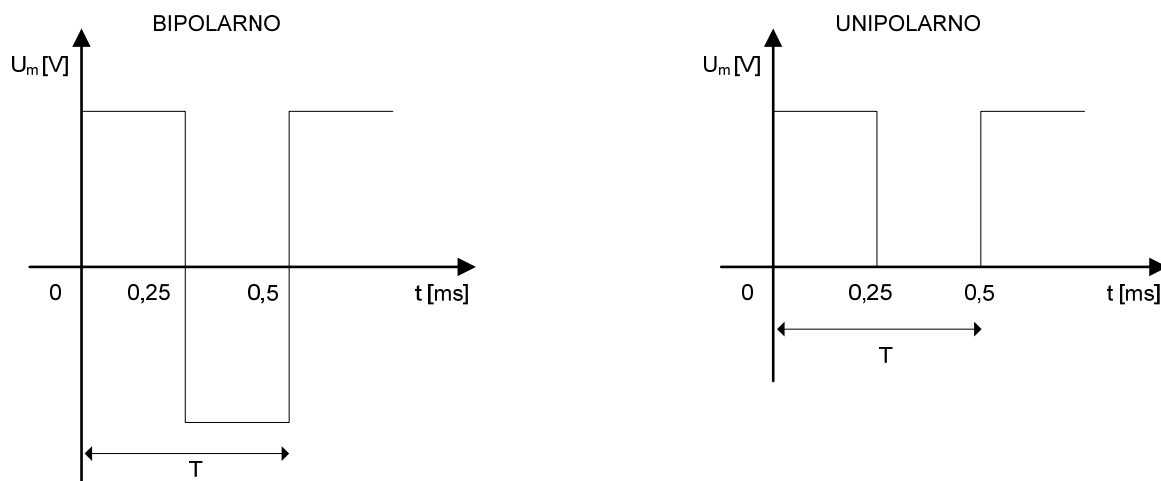
c) Nestabilan odziv brzine i struje pri sekvenci: zalet-reverziranje-kočenje



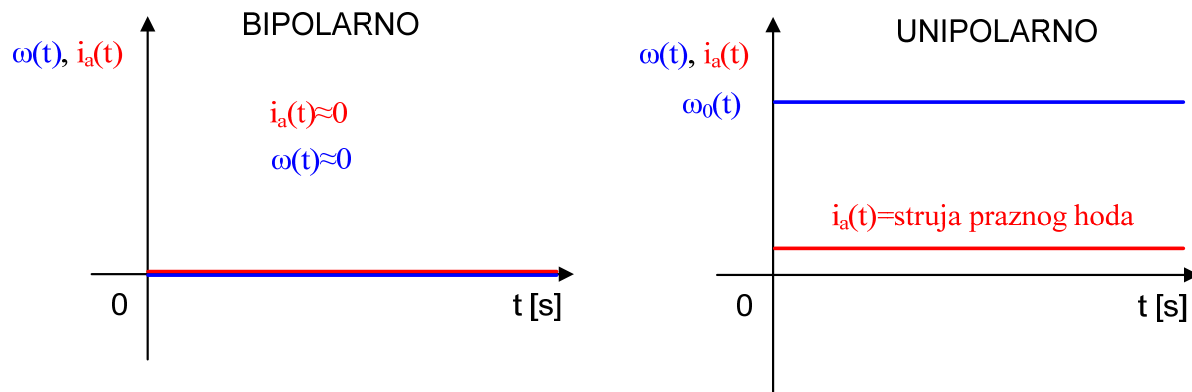
Slika 8. Brzina vrtnje i struja armature pri sekvenci: zalet-reverziranje-kočenje

Zadatak 7.

Nezavisno uzbuđeni istosmjerni motor nazivnih podataka: $U_n = 400 \text{ V}$, $I_n = 100 \text{ A}$, $n_n = 1500 \text{ min}^{-1}$ se napaja iz tranzistorskog čopera. Motor je neopterećen, a gubici trenja i ventilacije se ne zanemaruju. Kvalitativno skicirati vremenske odzive struje armature $i_a(t)$ i brzine vrtnje $\omega(t)$ u stacionarnom stanju za bipolarno i unipolarno napajanje čoperom prema slici 10.

**Slika 9.** Tranzistorski čoper**Slika 10.** Napon motora pri bipolarnom i unipolarnom napajanju čoperomRješenje:

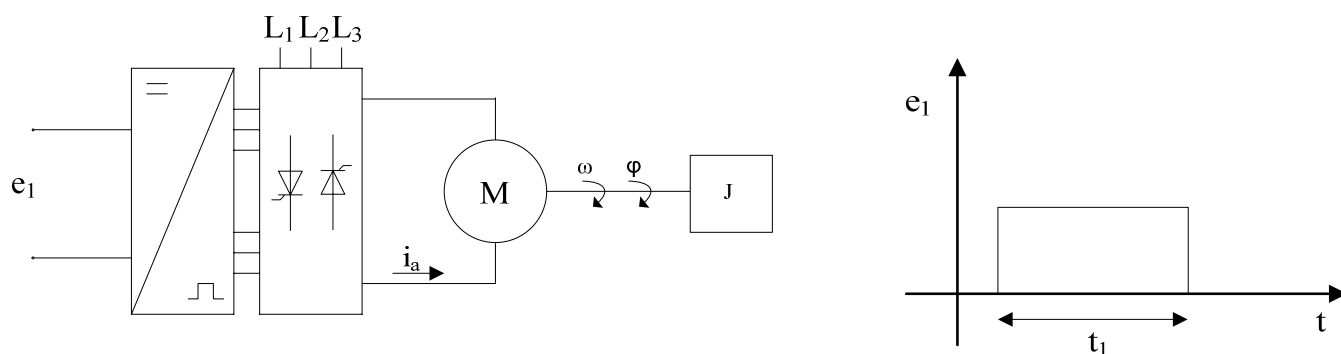
Uočiti da je srednja vrijednost napona na motoru kod bipolarne modulacije nula, a kod unipolarne 220 V. Budući da se gubici trenja i ventilacije ne zanemaruju, u praznom hodu teče struja (ali vrlo malog iznosa).



Slika 11. Vremenski odziv struje armature i brzine vrtnje motora pri bipolarnom i unipolarnom napajanju čoperom

Zadatak 8.

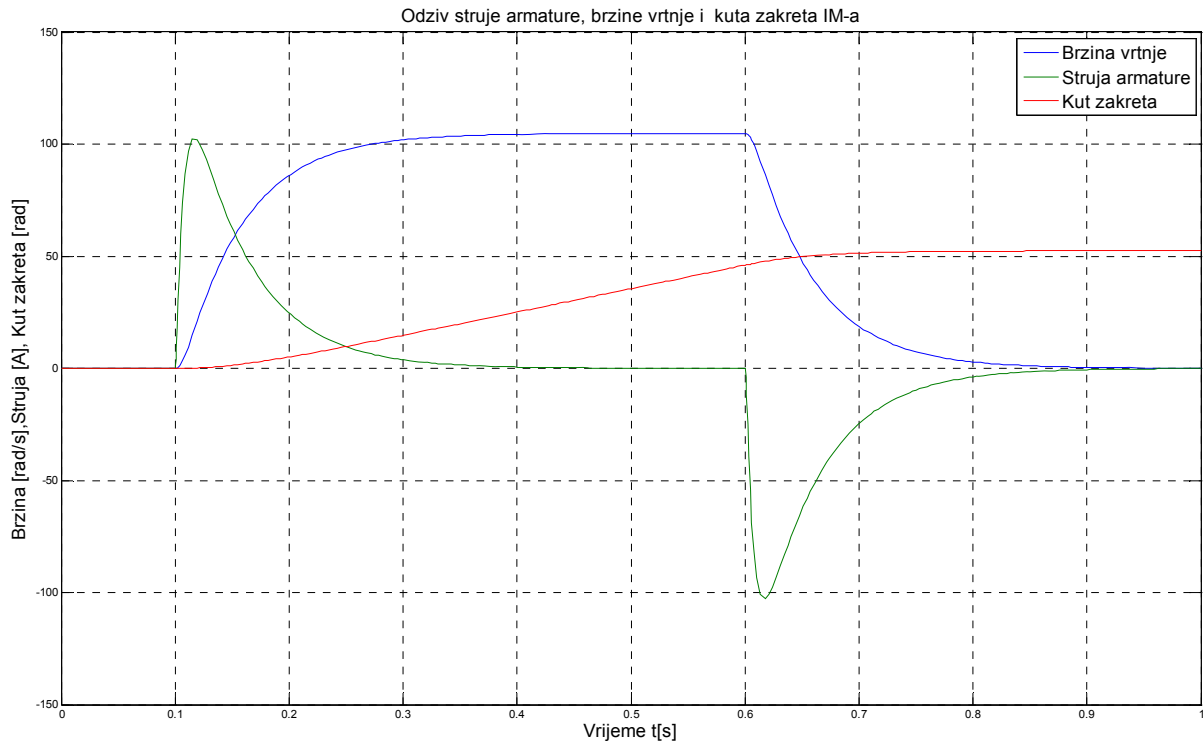
Ulazni napon regulacijskog (upravljačkog) sustava se mijenja prema zakonu prikazanom na slici 12. Vrijeme t_1 dovoljno je veliko da se uspostavi stacionarna brzina vrtnje. Kvalitativno skicirati vremenske odzive struje armature $i_a(t)$, brzine vrtnje $\omega(t)$ i kuta zakreta $\varphi(t)$ neopterećenog motora. Uzbuda motora je konstantna.



Slika 12. Regulacijski (upravljački) sustav i referentna vrijednost ulaznog napona

Rješenje:

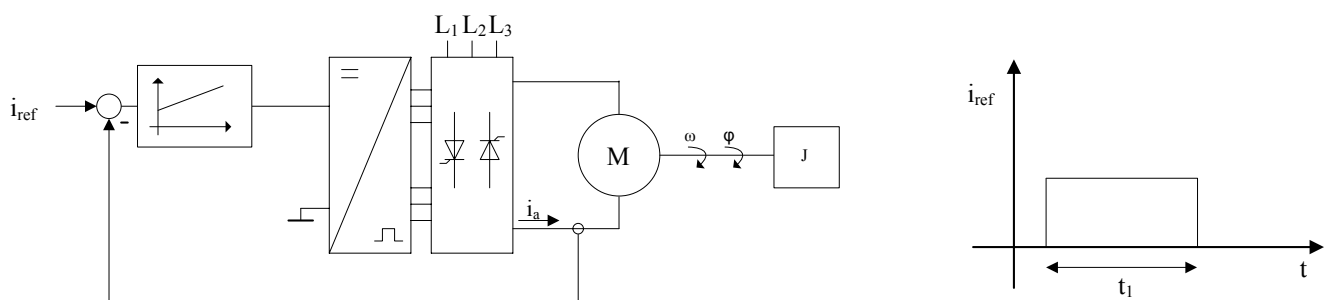
Primijetiti da je ulazni napon sustava referentna vrijednost za impulsni uređaj koji upravlja sklopkama usmjerivača, tj. zadaje se referentna vrijednost napona motora. Također je potrebno primijetiti da je motor napajan iz dva antiparalelno spojena tiristorska usmjerivača.



Slika 13. Odziv struje armature, brzine vrtnje i kuta zakreta istosmjernog motora

Zadatak 9.

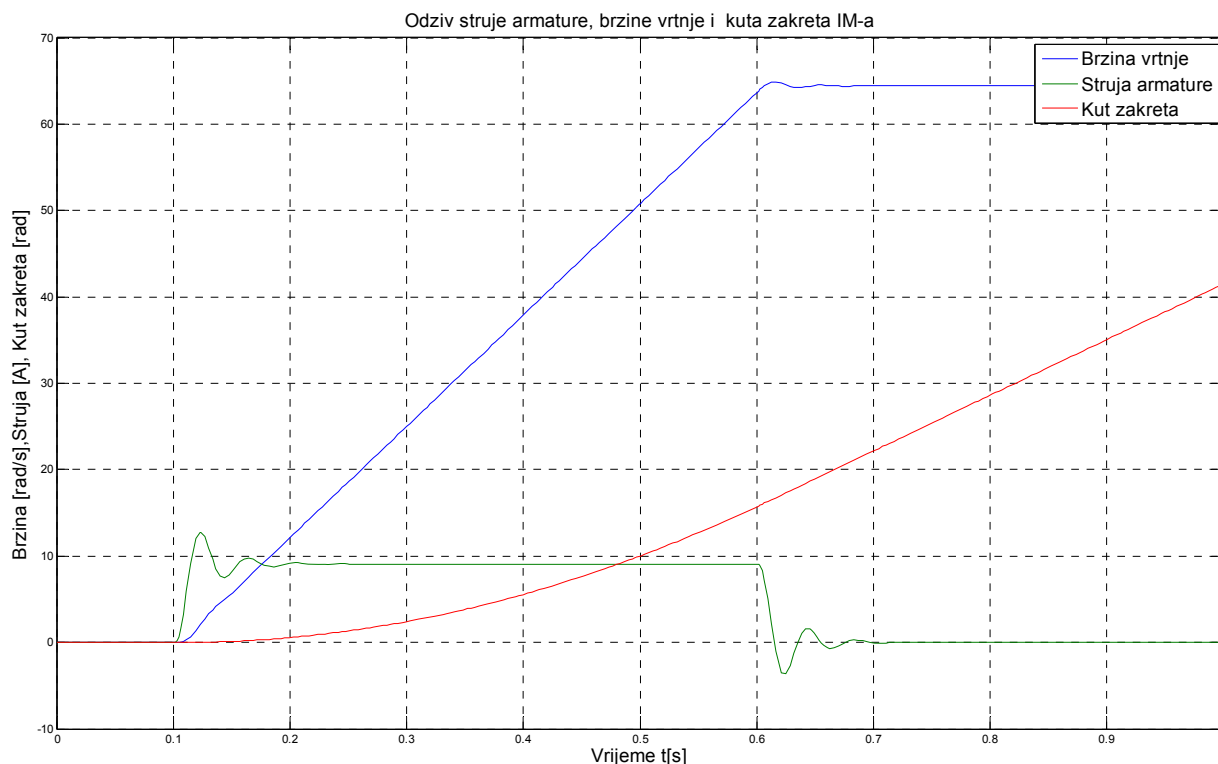
Referentna vrijednost struje se mijenja prema slici 14. Vrijeme t_1 dovoljno je veliko da se uspostavi stacionarna vrijednost struje armature. Kvalitativno skicirati vremenske odzive struje armature $i_a(t)$, brzine vrtnje $\omega(t)$ i kuta zakreta $\varphi(t)$ neopterećenog istosmjernog stroja. Uzbuda stroja je konstantna, a gubici se zanemaruju.



Slika 14. Regulacijski (upravljački) sustav i referentna vrijednost struje armature

Rješenje:

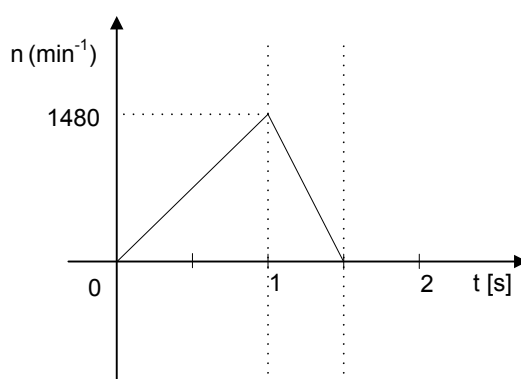
Primijetiti da je regulirana veličina struja armature stroja te da se stroj napaja iz dva antiparalelno spojena tiristorska usmjerivača.



Slika 15. Odziv struje armature, brzine vrtnje i kuta zakreta istosmjernog motora

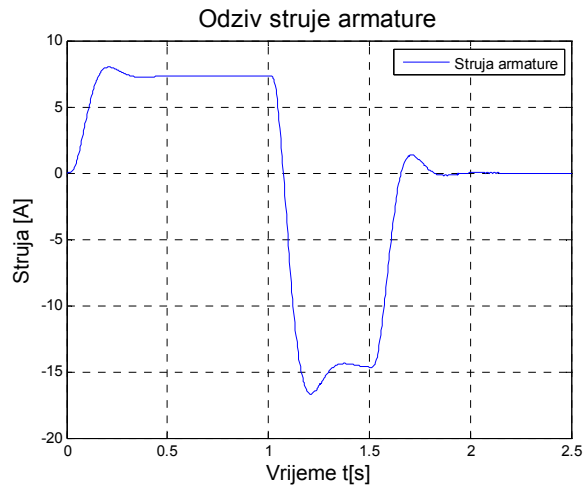
Zadatak 10.

U sustavu regulacije brzine vrtnje istosmjernog nezavisno uzbuđenog motora eksperimentalno je snimljen odziv brzine vrtnje motora u praznom hodu. Treba odrediti odziv armaturene struje motora. Nazivni podaci motora su: $P_n = 13,5$ kW, $U_n = 420$ V, $I_n = 40,6$ A, $n_n = 1480$ min⁻¹, $J = 0,1$ kgm². Zanemariti gubitke u motoru.



Slika 16. Brzina vrtnje istosmjernog motora u praznom hodu

Rješenje:



Slika 17. Odziv struje armature istosmjernog motora

Procjena struje pri ubrzavanju:

$$\omega_n = \frac{n_n \cdot \pi}{30} = \frac{1480\pi}{30} = 155 \text{ rad/s}$$

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{13500}{155} = 87,1 \text{ Nm}$$

$$M_u = M_m - M_t = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

$$M_{\text{ubrzavanje}} = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 0,1 \frac{155}{1} = 15,5 \text{ Nm}$$

$$\frac{M_{\text{ubrzavanje}}}{I_{\text{ubrzavanje}}} = \frac{M_n}{I_n} \Rightarrow I_{\text{ubrzavanje}} = \frac{M_{\text{ubrzavanje}} \cdot I_n}{M_n} = \frac{15,5 \cdot 40,6}{87,1} = 7,23 \text{ A}$$

Procjena struje pri kočenju :

$$I_{\text{usporavanje}} = \frac{M_{\text{usporavanje}} \cdot I_n}{M_n} = \frac{0,1 \cdot \frac{-155}{0,5} \cdot 40,6}{87,1} = -14,46 \text{ A}$$