



Fakultet elektrotehnike i računarstva
Zavod za elektrostrojarstvo i automatizaciju

Zbirka zadataka
OSNOVE MEHATRONIKE

Doc. dr. sc. Fetah Kolonić
Alen Poljugan, dipl. ing.

-

1

Rješenje:

- a) Budući da se transportna kolica napajaju iz akumulatorske baterije potrebno je za pretvarač odabrati istosmjerni pretvarač (čoper). Pretpostavka je da je napon akumulatorske baterije jednak (ili veći) od napona motora (npr. dvije baterije u seriju, tj. $2 \cdot 42V$, danas aku-baterije od $42V$ postaju standard u auto industriji). Zbog zahtjeva dva smjera kretanja kolica i kočenja, odabire se četverokvadrantni čoper. Upravljanje sklopkama se izvodi pulsno-širinskom metodom. Za upravljanje ovakvim EMP-om standardno se upotrebljava krug regulacije brzine vrtnje motora s podređenim krugom regulacije struje armature.
- b) Traži se prijenosni omjer reduktora (i)! Zadano $U_n=70V$, $I_n=125A$, $n_n=1000rpm$, $\eta_{mot}=0.95$, $M_t=250Nm$, $\eta_{red}=0.9$, $d=51mm$!
Prvo treba izračunati nazivnu snagu i moment motora:

$$P_e = U \cdot I = 8750W$$

$$P = \eta \cdot P_e = 8312.5W$$

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{n\pi}{30}} = 79.38Nm$$

$$\text{-- za reduktor vrijedi: } \eta_{red} P_1 = P_2 \text{ tj. } \eta_{red} M_1 \cdot \omega_1 = M_2 \cdot \omega_2$$

$$\frac{M_2}{\eta_{red} M_1} = \frac{n_1}{n_2} = i = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

$$i = \frac{250}{0.9 \cdot 79.83} = 3.48$$

- c) Brzina P.H. (praznog hoda) i nazivna brzina motora odnose kao omjer napona napajanja i protuelektromotorne sile ($E = k\Phi n$). Naime, u P.H. je protu EMS jednaka naponu napajanja dok u nazivnoj radnoj točki protu EMS iznosi:

$$U_n = I_n \cdot R_a + E$$

$$E = U_n - I_n R_a = 70 - 125 \cdot 0.05 = 63.75V$$

Dakle omjer brzina P.H. i nazivne brzine motora odnose se kao $70/63.75 = 1.098 \approx 1.1$, tj. brzine se u nazivnoj točki smanji za 10% u odnosu na brzinu praznog hoda

- d)

$$i = \frac{n_1}{n_2}; n_2 = \frac{n_1}{i} = \frac{1000}{3.48} = 287.35rpm$$

$$v = \omega \cdot \frac{D}{2} = \frac{n \cdot \pi}{30} \cdot \frac{D}{2}$$

$$v = \frac{n_2 \cdot \pi}{30} \cdot \frac{D}{2}$$

$$D = \frac{60 \cdot v}{n_2 \cdot \pi} = 0.332m$$

- e) Potrebno je provjeriti da li je osovina ispravno dimenzionirana!

$$\tau = \frac{M}{W_p} = \frac{2 \cdot M_t}{\frac{\pi \cdot d^3}{16}} \text{ uz } d = 51\text{mm i } M_t = 250\text{Nm dobivamo:}$$

$$\tau = 19.2\text{MPa} < 20\text{MPa} \text{ dakle može ali tijesno!}$$

- f) Koliki treba biti napon statora motora da bi se kolica kretala brzinom 3 m/s?

$$v = 3\text{m/s}$$

$$n_1 = i \cdot \frac{60v}{D\pi} = 600.57\text{rpm}$$

$$\frac{E_n}{E} = \frac{n_n}{n_1}; E = \frac{600.57}{1000} \cdot 63.75 = 38.25\text{V}$$

$$U = I_n \cdot R_a + E = 44.5\text{V}$$

- g) Kolika je razlučivost mjerenja brzine vrtnje motora tahogeneratorom? Dimenzionirati naponsko djelilo!

Razlučivost je određena razlučivošću A/D pretvornika. Naponski djelitelj iznosi

$$k_{djelitelja} = \frac{10}{60} = 0.167$$

a razlučivost mjerenja brzine

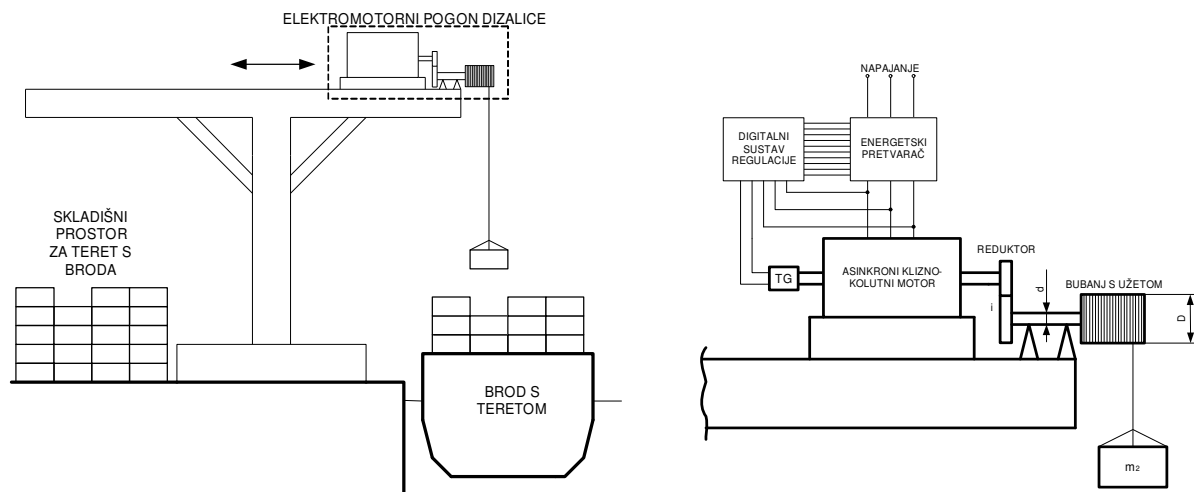
$$2^{11} = 1000\text{rpm}$$

$$2048 = 1000$$

$$1\text{rpm} = 2.048$$

$$\text{razlucivost} = \frac{1}{2.048} = 0.488 \text{ rpm}$$

2. Trofazni asinkroni kavezni motor nazivnih podataka 380V, 100A, 700 rpm, $\cos\varphi=0.85$, $\eta_{\text{mot}}=0.95$, koristi se na maloj lučkoj dizalici za istovar brodskog tereta, sl. 2. Odgovorite na slijedeća pitanja:
- a) S obzirom na tip električnog aktuatora i funkciju koju obavlja, koje energetske pojačalo (pretvarač) treba odabrati? Skicirajte shemu tog pretvarača i objasnite na koji način je moguće mijenjati brzinu dizanja tereta.
 - b) Pogonski motor je preko reduktora korisnosti $\eta_{\text{red}}=0.9$ izlaznom osovinom promjera $d=100$ mm spojen s bubnjem promjera $D=1.706$ m. Na bubanj je namotano pleteno čelično uže čijim se namatanjem (odmatanjem) diže (spušta) teret. Koliko mora iznositi prijenosni omjer reduktora da bi se teret dizao maksimalnom brzinom od 2.5 m/s?
 - c) Uz odabrani prijenosni omjer reduktora (pod b)) koja se najveća masa m_2 može dizati brzinom od 2.5 m/s?
 - d) Da li se može istu masu tereta (pod c)) dizati brzinom 1 m/s? Koja je razlika u odnosu na slučaj kada isti teret dižemo brzinom 2.5 m/s? Ucrtajte te dvije radne točke na vanjsku karakteristiku asinkronog motora. Koliki je omjer gubitaka u rotoru za ta dva slučaja?
 - e) Da li se može kočiti maksimalnim momentom iznosa $2.5M_n$ (na strani tereta) s obzirom na dozvoljeno tangencijalno naprezanje izlazne osovine reduktora koje iznosi 200 MPa?
 - f) Digitalni sustav regulacije brzine vrtnje asinkronog kaveznog motora koristi , a mjerni član brzine vrtnje je istosmjerni tahogenerator kao mjerni član brzine vrtnje.. Ako je karakteristika mjernog člana $60\text{V}/1000\text{min}^{-1}$, kolika je razlučivost (rezolucija) mjerenja brzine vrtnje ako se za analognu digitalnu pretvorbu koristi 12 bitni A/D pretvornik napajan s $\pm 10\text{V}$. Izračunajte iznos naponskog djelitelja izlaznog napona istosmjernog tahogeneratora tako da se osigura mjerenje brzine vrtnje motora u rasponu od -1000 do 1000 rpm.



Sl. 2. Mehatronički sustav lučke dizalice

Rješenje:

- a) Za pretvarač je najprikladnije odabrati frekvencijski pretvarač. Regulacijska zadaća se postiže sa sustavom regulacije brzine vrtnje s podređenim krugom po struji (momentu).
- b) Traži se prijenosni omjer reduktora da bi se teret dizao maksimalnom brzinom od 2.5 m/s. Zadano $U_n=380V$, $I_n=100A$, $n_n=700rpm$, $\cos\varphi=0.85$, $\eta_{mot}=0.95$, $v_2=2.5$ m/s, $\eta_{red}=0.9$, $D=1.706$ m, $d=100mm$!

Prvo treba izračunati nazivnu snagu i moment motora:

$$P_e = 3 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}} \cdot I_n \cdot \cos\varphi = 56100 \text{ W}$$

$$P_n = \eta_{mot} \cdot P_e = 53295 \text{ W}$$

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n}{\frac{n_n \pi}{30}} = 727.04 \text{ Nm}$$

$$\text{-- za reduktor vrijedi: } \eta_{red} P_1 = P_2 \text{ tj. } \eta_{red} M_1 \cdot \omega_1 = M_2 \cdot \omega_2$$

$$\frac{\omega_n}{\omega_2} = \frac{\omega_n}{\frac{v_2}{\left(\frac{D}{2}\right)}} = i$$

$$i = \frac{73.3}{\frac{2.5}{0.853}} = 25$$

- c) Uz odabrani prijenosni omjer treba odrediti najveću masu m_2 koju možemo dizati brzinom 2.5 m/s! Prvo je potrebno odrediti iznos momenta na drugoj strani reduktora M_2 te zatim preko promjera bubnja odrediti silu tj. težinu F_2 . Nakon određivanja te sile određujemo masu m_2 :

$$\eta_{red} \cdot P_n = P_2$$

$$\eta_{red} \cdot M_n \cdot \omega_n = M_2 \cdot \omega_2$$

$$M_2 = M_n \cdot \eta_{red} \cdot \frac{\omega_n}{\omega_2} = M_n \cdot \eta_{red} \cdot i$$

$$M_2 = 727.04 \cdot 0.9 \cdot 25 = 16358.4 \text{ Nm}$$

$$M_2 = F_2 \cdot \frac{D}{2}$$

$$F_2 = \frac{16358.4}{0.853} = 19177.5 \text{ N}$$

$$F_2 = m_2 \cdot g$$

$$m_2 = \frac{19177.5}{9.81} = 1954.9 \text{ kg}$$

- d) S odabranim pretvaračem i regulacijskom metodom moguće je ostvariti radnu točku kod koje dižemo nazivni teret s brzinom od 1 m/s. Gubici u obje točke su približno jednaki jer je klizanje približno jednako tj. nazivno (zbog frekvencijskog pretvarača). Da smo odabrali npr. statički AC/AC pretvarač tada bi se gubici u te dvije točke znatno razlikovali tj. U slučaju manje brzine bili bi veći jer je tada i klizanje veće.

- e) Da li se može kočiti s $2,5M_n$?

$$\tau = \frac{M}{W_p} = \frac{2,5 * M_t}{\frac{\pi \cdot d^3}{16}} \text{ uz } d = 100mm \text{ i } M_n = 16358.4Nm \text{ dobivamo:}$$

$$\tau = 208.376MPa > 200MPa, \text{ dakle ne može se kočiti s } 2,5M_n$$

- f) Kolika je razlučivost mjerenja brzine tahogeneratorom? Definirati naponski djelitelj. Razlučivost je određena razlučivošću A/D pretvornika. Naponski djelitelj iznosi

$$k_{djelitelja} = \frac{10}{60} = 0.167$$

a razlučivost mjerenja brzine

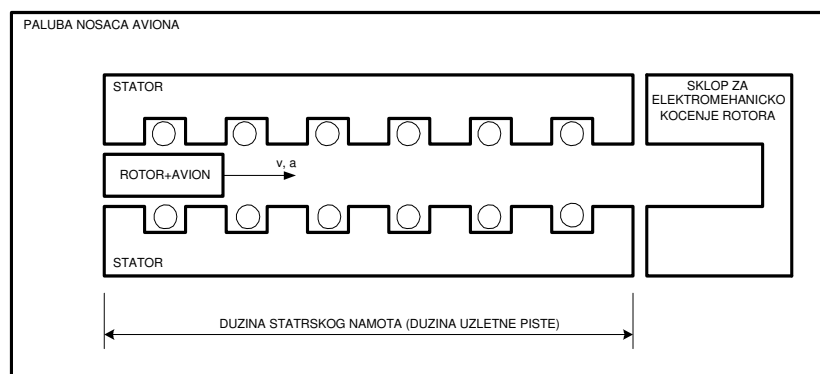
$$2^{11} = 2000rpm$$

$$2048 = 2000$$

$$1rpm = 1.024$$

$$razlucivost = \frac{1}{1.024} = 0.976 \text{ rpm}$$

3. Linearni sinkroni motor s dvostrukim trofaznim primarnim namotom služi za katapultiranje aviona s nosača aviona (sl. 3.). Katapultiranje se vrši na način da se zaleti rotor linearnog sinkronog motora (ustvari permanentni magnet) na koji je, pomoću specijalne mehaničke veze, učvršćen avion. Sustav pojačalo-motor mora osigurati zalet s konstantnim ubrzanjem (cca 5.7 g) tako da se na kraju zaletne staze dobije brzina aviona od 100m/s. Uz pretpostavku jednolikog ubrzanog gibanja koliko mora iznositi dužina statorskog namota da bi se osigurao ovaj zahtjev (dužina uzletne piste)? Definirajte tip pojačala, odredite koji parametar pojačala treba promijeniti i koliko on treba iznositi da se postigne tražena brzina. Izračunajte kolika je potrebna energija (snaga) koju motor mora dati tijekom zaleta aviona. Polni korak iznosi $\tau_p = 0.5\text{m}$ dok je ukupna masa rotora i aviona iznosi 30t.



Sl. 3. Prostorni prikaz palube nosača aviona

Rješenje:

Odabire se frekvencijski pretvarač koji se napaja iz brodske mreže. Potrebno je mijenjati frekvenciju napajanja:

$$v = \frac{2\tau_p}{T} = 2\tau_p f$$

$$f = \frac{100}{1} = 100\text{Hz}$$

Budući da se radi o jednolikom ubrzanom gibanju, duljina statorskog namota se izračunava na slijedeći način:

$$v = at = 5.7gt$$

$$s = \frac{a}{2}t^2 = \frac{5.7g}{2}t^2$$

$$s = \frac{v^2}{11.4g} = 89.42\text{m}$$

Uz pretpostavku jednolikog ubrzanog gibanja, energija koja se potroši tijekom zaleta iznosi:

$$E = \int_0^t \frac{m \cdot v^2}{2} dt$$

vrijedi da je $v = a \cdot t$ ($a = 5.7 \cdot g$) pa se dalje može pisati

$$E = \int_0^{\frac{v}{a}} \frac{m \cdot (a \cdot t)^2}{2} dt = \frac{m \cdot a^2}{2} \int_0^{\frac{v}{a}} t^2 dt = \frac{m \cdot a^2}{2} \cdot \frac{t^3}{3} \Big|_0^{\frac{v}{a}} = \frac{m \cdot v^3}{6 \cdot a}$$

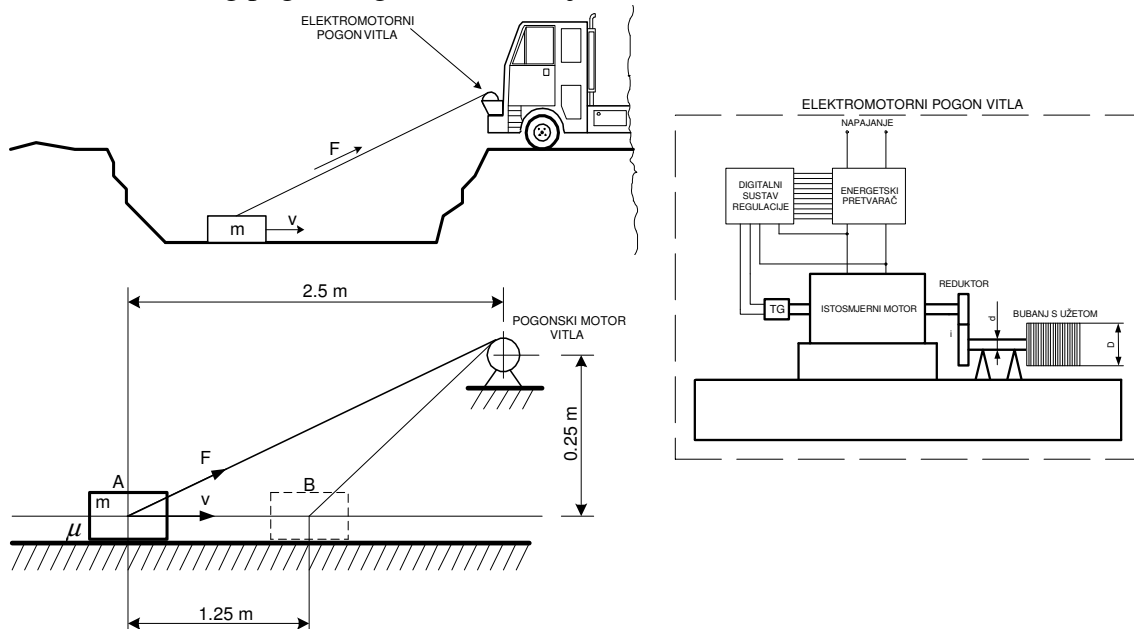
$$E = 89.4175\text{MJ}$$

Slijedi:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{\frac{m \cdot v^3}{6 \cdot a}}{\frac{v}{a}} = \frac{m \cdot v^2}{6}$$

$$P = 50 \text{ MW}$$

4. Na vozilo za teške terene ugrađen je elektromotorni pogon vitla. Za pogon vitla upotrijebljen je istosmjerni motor 750W, 300 rpm, 28V, $\eta_{\text{mot}}=0.85$. Traži se :
- S obzirom na tip električnog aktuatora i funkciju koju obavlja koje energetsko pojačalo (pretvarač) je prikladno odabrati? Skicirajte shemu tog pretvarača i objasnite na koji način je moguće mijenjati brzinu izvlačenja tereta.
 - Pogonski motor je preko reduktora korisnosti $\eta_{\text{red}}=0.8$ izlaznom osovinom spojen s bubnjem promjera $D=10''$ ($1''=25.4 \text{ mm}$). Na bubanj je namotano pleteno čelično uže čijim se namatanjem povlači teret. Koliko iznosi brzina gibanja tereta v (sl. 4.) u položaju A ako je pogonski motor nazivno opterećen i ako je prijenosni omjer reduktora $i=20$?
 - Pogon vitla na vozilu upotrijebljen je na gradilištu za pomicanje teških kamenih blokova, (sl. 4.). Potrebno je pomakni teret mase $m=2500 \text{ kg}$ iz položaja A u položaj B (teret se giba pod djelovanjem sile F u užetu). Pretpostavite da se teret giba konstantnom brzinom koja je određena pod b). Odrediti utrošenu energiju elektromotora dok teret prijeđe put od 1.25 m , ako je koeficijent trenja $\mu=0.2$. S obzirom na koju snagu treba dimenzionirati motor? Da li je u ovom slučaju snaga izabranog pogonskog motora dovoljna?



Sl. 4. Prikaz djelovanja elektromotornog pogona vitla.

Rješenje:

- a) Budući da se elektromotorni pogon vitla napaja iz akumulatorske baterije, potrebno je za pretvarač odabrati istosmjerni pretvarač (čoper). Pretpostaviti da je napon akumulatorske baterije jednak (ili veći) od napona motora ($2 \cdot 14 = 28 \text{ V}$). Zbog zahtjeva dva smjera kretanja odabrati četverokvadrantni čoper, ali budući da nema zahtjeva za kočenjem, dovoljan je dvokvadrantni čoper. Upravljanje sklopkama je izvedeno pulsno-širinskom metodom. Za upravljanje ovakvim EMP-om standardno se upotrebljava krug regulacije brzine vrtnje motora s podređenim krugom regulacije struje armature.

- b) Brzina gibanja tereta u točki A uz nazivno opterećen motor iznosi:

Zadano $i=20$, $n_n=300\text{rpm}$, $\eta_{\text{mot}}=0.85$, $\eta_{\text{red}}=0.8$, $D=254 \text{ mm}$.

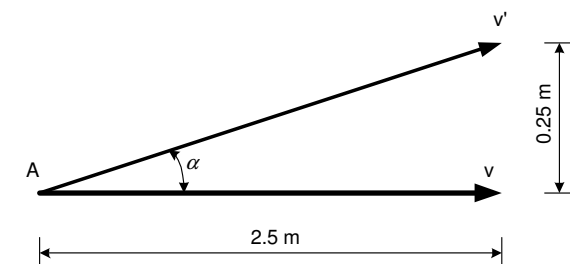
– za reduktor vrijedi: $\eta_{\text{red}} P_1 = P_2$ tj. $\eta_{\text{red}} M_1 \cdot \omega_1 = M_2 \cdot \omega_2$

$$\frac{\omega_n}{\omega_2} = \frac{\omega_n}{\frac{v_2}{\left(\frac{D}{2}\right)}} = i$$

$$v' = \frac{\omega_n \cdot \frac{D}{2}}{i} = \frac{\frac{n_n \cdot \pi}{30} \cdot \frac{D}{2}}{i} = \frac{n_n \cdot D \cdot \pi}{60 \cdot i} = \frac{300 \cdot 0.254 \cdot \pi}{60 \cdot 20}$$

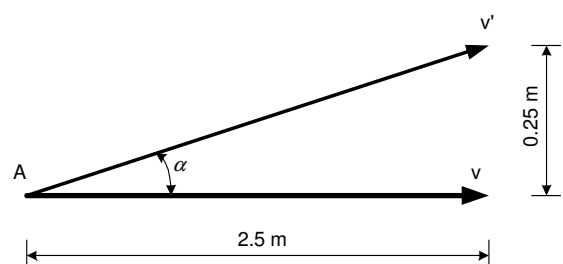
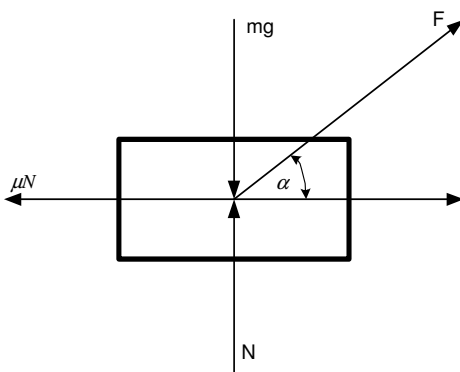
$$v' = 0.2 \text{ m/s}$$

Potrebno je izračunati brzinu gibanja u točki A



$$v = v' \cdot \cos \alpha = v' \cdot \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{0.25}{2.5} \right) \right)$$

$$v = 0.199 \text{ m/s}$$



c) Izračun energije potrebne za pomicanje mase $m=2500$ kg iz položaja A u položaj B i provjera dimenzioniranja motora.

$$\Sigma F_y = 0 \quad N + F \sin \alpha - mg = 0 \quad (1)$$

$$\Sigma F_x = 0 \quad -\mu N + F \cos \alpha = 0 \quad (2)$$

iz (1) slijedi

$$N = mg - F \sin \alpha$$

i uvrstavanjem u (2) dobije se

$$-\mu mg + \mu F \sin \alpha + F \cos \alpha = 0$$

Slijedi izraz za minimalnu silu potrebnu da se masa pokrene iz ravnoteže

$$F = \frac{\mu mg}{\cos \alpha + \mu \sin \alpha}$$

Energija utrošena na putu od točke A do točke B računa se kao:

$$\begin{aligned} W &= \int_A^B F \cos \alpha \, ds = \int_0^{1.25} \frac{\mu mg}{1 + \mu \tan \alpha} \, ds = \int_0^{1.25} \frac{\mu mg}{1 + \mu \frac{0.25}{2.5-s}} \, ds = \int_0^{1.25} \frac{\mu mg(2.5-s)}{2.5-s+0.25\mu} \, ds = \\ &= \int_0^{1.25} \frac{0.2 \cdot 2500 \cdot 9.81 \cdot 2.5}{2.5+0.2 \cdot 25-s} \, ds - \int_0^{1.25} \frac{0.2 \cdot 2500 \cdot 9.81 \cdot s}{2.55-s} \, ds = \int_0^{1.25} \frac{12262.5 - 4905s}{2.55-s} \, ds = \\ &= (-12262.5 \ln(2.55-s) + 4905s + 4905 \cdot 2.55 \ln(2.55-s)) \Big|_0^{1.25} = 6541.732 \, \text{J} \end{aligned}$$

$$P = F \cdot v \cos \alpha = \frac{\mu mg}{\cos \alpha + \mu \sin \alpha} \cdot v \cos \alpha = \frac{\mu mg}{1 + \mu \tan \alpha} \cdot v$$

Maks snaga P_{\max} uz uvjet minimalnog kuta $\alpha = \alpha_{\min}$

$$\tan \alpha_{\min} = \frac{0.25}{2.5}$$

$$P_{\max} = \frac{\mu mg}{1 + \mu \tan \alpha_{\min}} \cdot v = \frac{0.2 \cdot 2500 \cdot 9.81}{1 + 0.2 \cdot \frac{0.25}{2.5}} \cdot 0.2 = 961.76 \, \text{W}$$

Ovo je snaga na izlazu reduktora dok snaga motora iznosi:

$$P = \frac{P_{\max}}{\eta_{\text{red}}} = \frac{961.76}{0.8} = 1202.2 \, \text{W}$$

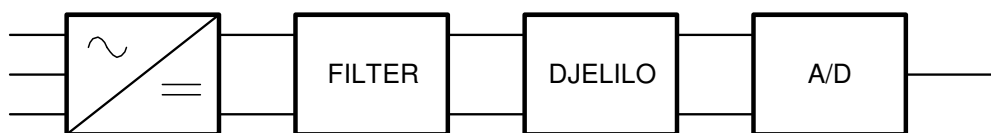
Vidljivo je da je snaga motora (750W) premala tj. potrebno je odabrati jači motor za ovaj zadatak.

5. U mehatroničkom sustavu regulacije brzine vrtnje kao mjerni član brzine vrtnje upotrijebljen je trofazni izmjenični tahogenerator (pojačanje $60V_{eff}$ linijski ≈ 1000 rpm). Definirajte sučelje prema procesnoj jedinici, koja je zasnovana na mikrokontroleru MC68332, da bi se dobila stvarna vrijednost brzine vrtnje. Budući da na procesnoj ulazno-izlaznoj jedinici ne postoji nikakav sklop za prilagodbu naponske razine s tahogeneratora, projektirajte ga ukoliko ga smatrate nužnim. Kolika je najmanja dužina riječi A/D pretvornika potrebna da se osigura najveća pogreška zbog A/D pretvorbe u iznosu od 0.1% FSD (u odnosu na pun raspon, skalu)? Koristite standardnu ponudu A/D pretvornika (8, 12, 16 bitovni). Sklop sučelja treba obuhvatiti i elemente (međusklopove), koji služe za prilagodbu i razine i oblika napona s tahogeneratora. Te elemente treba odrediti tako da se dobije maksimalna rezolucija mjerenja brzine vrtnje. Raspon brzine vrtnje motora koju treba mjeriti iznosi 0-2000 rpm. Analogni ulazi na procesnoj U/I pločici imaju napajanje $\pm 12V$, maksimalni raspoloživi signal za korištenje je $\pm 10V$ (zbog linearnosti)

Rješenje:

Napon je potrebno prvo ispraviti zatim filtrirati i prilagoditi mu naponsku razinu pomoću dijelila. Ispravljanje se može izvesti na dva načina: pomoću trofaznog mrežom vođenog diodnog ispravljača u spoju sa srednjom točkom i pomoću trofaznog mrežom vođenog diodnog ispravljača u mosnom spoju. O tome ovisi projektiranje dijelila!

Blok shema obrade signala mjerenja brzine vrtnje:



Ako je u pitanju trofazni ispravljač u spoju sa srednjom točkom tada srednja vrijednost izlaznog napona iznosi

$$U_d = U_{f,eff} \cdot 1.17 = \frac{60}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2000}{1000} \cdot 1.17 = 81V$$

dok se u slučaju trofaznog ispravljača u mosnom spoju dobiva:

$$U_d = U_{f,eff} \cdot 2.34 = \frac{60}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2000}{1000} \cdot 2.34 = 162V$$

Znači da dijelilo u prvom slučaju mora biti 81/10 dok u drugom dvostruko veće tj. 162/10!

U ovom proračunu prigušenje filtra iznosi 0 dB!

Potrebno je izračunati minimalnu duljinu riječi da se osigura maksimalna pogreška u iznosu od 0.1%!

Ako se odabere 8 bitna riječ dobiva se:

$$2^8 = 256$$

$$\frac{1}{256} \cdot 100[\%] = 0.390\%$$

Dakle, 8 bitna riječ ne odgovara. Ako isti postupak ponovimo za 12 bitnu riječ dobiva se:

$$2^{12} = 4096$$

$$\frac{1}{4096} \cdot 100[\%] = 0.024\%$$

Iz dobivenog rezultata vidljivo je da se tražena točnost može postići s 12 bitnom riječi.

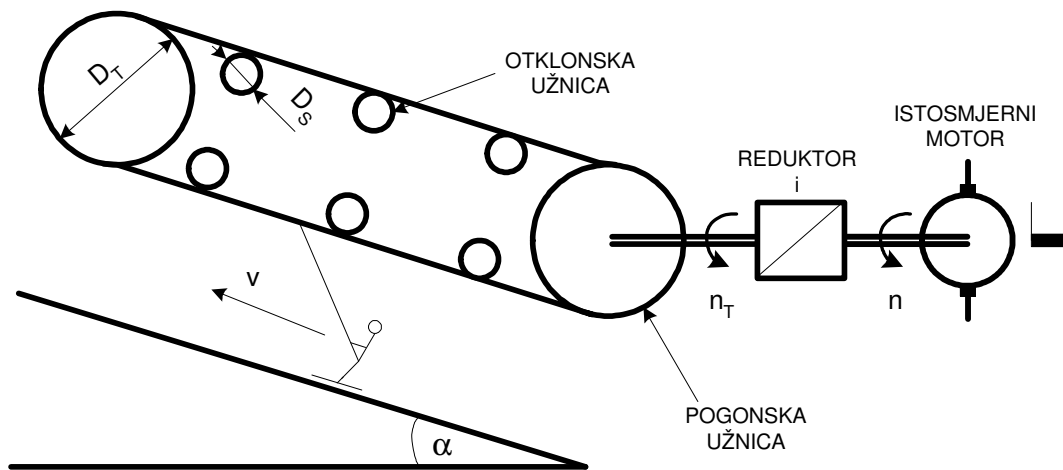
6. Mala skijaška vučnica (sl. 5.) za pogon koristi istosmjerni motor koji je preko reduktora vezan sa sustavom užeta i užnica. Sustav užnica sastoji se od pogonske užnice i 90 otklonskih užnica. Na vučnici postoji 50 priključnih mjesta za skijaše te se u istom trenutku može opsluživati najviše 25 skijaša.

Osnovni podaci sustava skijaške vučnice:

- Pogonska užnica promjer $D_T = 2.5 \text{ m}$,
 moment tromosti $J_T = 600 \text{ kgm}^2$,
- Otklonska užnica promjer $D_S = 0.3 \text{ m}$,
 moment tromosti $J_S = 0.6 \text{ kgm}^2$,
- Težina pogonske užadi $G_Z = 5850 \text{ N}$,
- Težina priključnog užeta $G_H = 70 \text{ N}$,
- Težina prosječnog skijaša $G_P = 900 \text{ N}$,
- Moment tromosti motora i prijenosa
 reduciran na osovinu motora $J_{M+G} = 0.25 \text{ kgm}^2$,
- Nagib vučne staze $\sin \alpha = 0.09$,
- Sila trenja između skija i snijega
 za jednu osobu $F_{SS} = 26 \text{ N}$,
- Moment trenja prijenosa kod n_n $M_{TP} = 200 \text{ Nm}$,
- Nazivne brzina vučnice $v_n = 1 \text{ m/s}$,
- Pogonski motor
 brzina praznog hoda $n_0 = 1500 \text{ rpm}$,
 maksimalni moment motora $M_n = 30 \text{ Nm}$,
 moment kratkog spoja $M_k = 400 \text{ Nm}$

Izračunati:

- a) Koliko mora iznositi prijenosni omjer reduktora da bi se kod brzine motora od $n = 1429 \text{ rpm}$ vučnica kretala nazivnom brzinom v ?
- b) Odredite ukupni moment tromosti sustava vučnice reduciran na osovinu motora.
- c) Koliko iznosi minimalni moment motora potreban da se nazivno opterećena vučnica drži u ravnoteži?
- d) Koliki je nagib terena kod kojeg ovaj sustav vučnice može držati ravnotežu?
- e) Momentna karakteristika pogonskog motora definirana je relacijom $n = n_0 \cdot (1 - \frac{M_m}{M_k})$. Nacrtati momentnu karakteristiku motora. Koliko iznosi brzina vrtnje za maksimalni moment motora? Ucertajte tu točku u momentnu karakteristiku!
- f) Koji je energetski pretvarač ovdje najprikladnije primijeniti. Objasnite zašto te skicirajte shemu odabranog pretvarača!



Sl. 5. Skijaška vučnica

Riješenje:

a) Prijenosni omjer reduktora računa se kao:

$$i = \frac{\omega_T}{\omega}$$

$$\text{te uz } \omega_T = \frac{v}{\frac{D_T}{2}} \quad i = \frac{n \pi}{30}$$

slijedi

$$i = \frac{n \pi D_T}{60v} = 187$$

b) Ukupni moment tromosti reduciran na osovinu motora računa se kao:

$$J_{UK} = J_{M+G} + \frac{1}{i^2} \left[J_T + J_T + 90 \left(\frac{D_T}{D_S} \right)^2 \cdot J_S + \left(\frac{D_T}{2} \right) \cdot \frac{1}{g} \cdot (G_Z + 50G_H + 25G_P) \right]$$

$$J_{UK} = 0.536 \text{ kgm}^2$$

c) Moment potreban za održavanje ravnoteže na nagibu nazivno opterećene vučnice računamo kao:

$$M_{\min} = \frac{1}{i} \cdot \left[M_{RT} + \frac{D_T}{2} (25G_P \sin \alpha + 25F_{RS}) \right]$$

$$M_{\min} = 18.95 \text{ Nm}$$

d) Iz relacije pod c) dobije se izraz za alfa:

$$\sin \alpha = \frac{2}{25D_T \cdot G_P} \cdot (i \cdot M_n - M_P) - \frac{F_{SS}}{G_P}$$

$$\sin \alpha = 0.16346$$

$$\alpha = 9.4^\circ$$

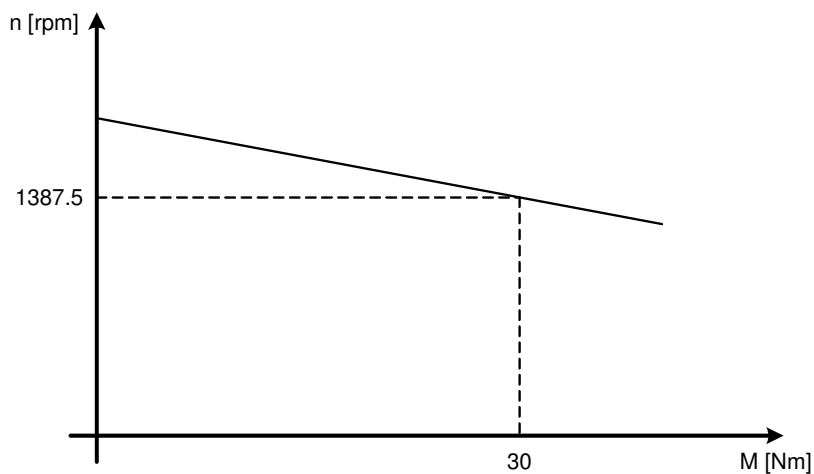
e) Momentna karakteristika određena je relacijom

$$n = n_0 - \left(1 - \frac{M}{M_k} \right)$$

za $M = M_n$ dobije se:

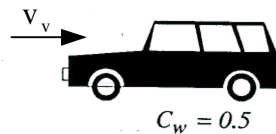
$$n = 1387.5 \text{ rpm}$$

Momentna karakteristika:



f) Može se upotrijebiti tiristorski usmjerivač u antiparalelnom spoju.

7. Elektromobil za pogon koristi četiri elektromotora (svaki kotač pogoni jedan elektromotor). Sila otpora zraka računa se prema izrazu $F_z = 0.046 \cdot C_w \cdot S \cdot v^2$, gdje je S čeonu presjek vozila u m^2 , v brzina u km/h kojom čeonu presjek "siječe" zrak, a C_w koeficijent otpora zraka. Odredite:
- Silu otpora zraka koju mora savladati automobil ako se kreće brzinom $100 km/h$ uz čeonu vjetar od $40 km/h$ (vidi sl. 1.). Čeonu presjek automobila iznosi $S = 1.8 m^2$, a koeficijent otpora zraka $C_w = 0.5$. Kolika je sila otpora zraka kod kretanja automobila brzinom $150 km/h$ uz isti iznos brzine vjetra?
 - Odredite koliku snagu mora imati svaki elektromotor da bi se automobil kretao brzinom $100 km/h$. Promjer kotača automobila iznosi $65 cm$, a ukupni gubici trenja kod brzine $100 km/h$ iznose $350 N$.
 - Ako se pomoću različitih aerodinamičnih dodataka koeficijent otpora zraka smanji na $C_w = 0.3$, ponovno izračunajte zadatak pod b). Kolika je ušteda na snazi elektromotora u postocima? Brzina i smjer vjetra te gubici trenja ostaju isti.
 - Odaberite najprikladniji motor, pretvarač (skicirati) i regulacijsku metodu. Obrazložite odabir!
 - Sustav regulacije brzine vrtnje električnog motora (odabranog pod d)) izveden je s inkrementalnim enkoderom, rezolucije $1024 imp/r$, kao mjernim članom brzine vrtnje. Stvarna brzina vrtnje dobije se mjerenjem broja impulsa u jedinici vremena (vremenu uzorkovanja), tzv. M metoda. Ukoliko se zahtjeva da minimalna mjerena brzina iznosi $8 rpm$ koliko mora iznositi vrijeme uzorkovanja?



Sl.6. Sila otpora zraka kod automobila

Rješenje:

- a) Brzina v je suma brzine automobila (100 km/h) i brzine vjetra (40 km/h), tj. $v = 140$ km/h.

Uz $v = 140$ km/h te $S = 1.8 \text{ m}^2$ i $C_w = 0.5$ dobije se:

$$F_Z = 0.046 \cdot C_w \cdot S \cdot v^2 = 0.046 \cdot 0.5 \cdot 1.8 \cdot 140^2 = 811.44 \text{ N},$$

a kada se automobil kreće brzinom 150 km/h:

$$F_Z = 0.046 \cdot C_w \cdot S \cdot v^2 = 0.046 \cdot 0.5 \cdot 1.8 \cdot 190^2 = 1494.54 \text{ N}$$

- b) Sila potrebna za održavanje konstantne brzine može se rastaviti na silu otpora zraka (F_Z) te silu trenja (F_{tr}). Sila trenja F_{tr} predstavlja silu trenja između guma i podloge, silu trenja prijenosa te ostale gubitke trenja.

Prema tome može se pisati $F = F_Z + F_{tr} = 811.44 + 350 = 1161.44 \text{ N}$. Budući da su četiri

motora, svaki motor mora osigurati silu od $F_M = \frac{F}{4} = \frac{1161.44}{4} = 290.36 \text{ N}$.

Moment motora računa se kao $T_M = F_M \cdot \frac{d}{2} = 290.36 \cdot \frac{0.65}{2} = 94.36 \text{ Nm}$.

Potrebna snaga motora računa se kao

$$P_M = T_M \cdot \omega_M$$

$$\omega_M = \frac{v}{\frac{d}{2}} = \frac{\frac{100}{3.6}}{\frac{0.65}{2}}$$

$$\omega_M = 85.47 \text{ rad/s}$$

$$P_M = 94.36 \cdot 85.47$$

$$P_M = 8065 \text{ W}$$

- c) Ako se ponovi postupak iz a) i b) dobije se $F_Z = 486.86 \text{ N}$, $F = 836.86 \text{ N}$, $F_M = 209.21 \text{ N}$, $T_M = 68 \text{ Nm}$ i na kraju $P_M = 5811.55 \text{ W}$. Ako se to izrazi u postocima dobije se da je u ovom slučaju potrebna snaga motora manja za

$$\frac{8065 - 5811.55}{8065} \cdot 100\% = 27.94\% \approx 30\%.$$

- d) Za motor se može odabrati gotovo svaki tip elektromotora. Možda bi za ovu primjenu bilo prikladno odabrati istosmjerni ili sinkroni motor. U slučaju odabira istosmjernog potrebno je odabrati DC/DC pretvarač. Ako se odabere asinkroni motor, za pretvarač se odabire frekvencijski pretvarač.
- e) Kod M metode mjerenja brzine vrtnje mjeri se broj impulsa u vremenu uzorkovanja. Točnost mjerenja je veća ako je broj impulsa u tom vremenu veći. Upotrijebljen je enkoder s 1024 impulsa po okretaju. Brzinu se mjeri M metodom tj. mjeri se broj impulsa u vremenu. Ako je minimalna tražena mjerljiva brzina vrtnje 8 rpm potrebno je odrediti koliko je minimalno vrijeme uzorkovanja T . Općenita formula koja povezuje rezoluciju (R), broj impulsa enkodera po okretaju (N) i vrijeme uzorkovanja (T_s) glasi:

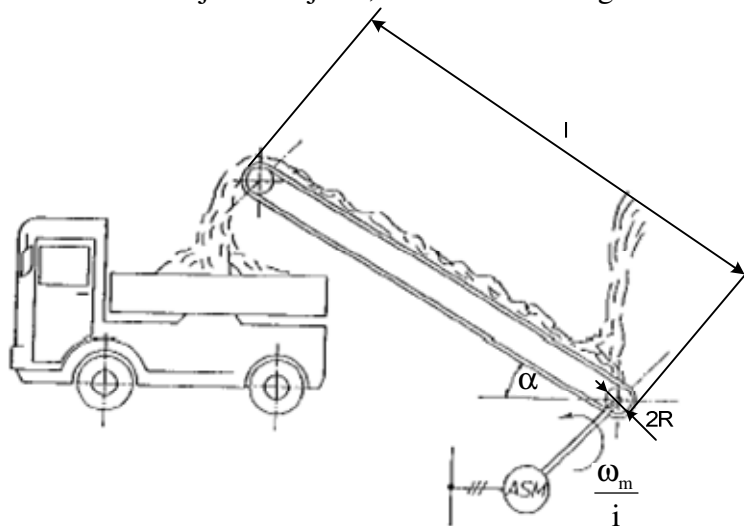
$$R = 1 \text{ imp} = \frac{60}{N[\text{imp} / r] \cdot T_s [s]} [\text{rpm}]$$

$$T_s = \frac{60}{R[\text{rpm}] \cdot N[\text{imp} / r]} [s] \quad .$$

$$T_s = \frac{60}{8 \cdot 1024}$$

$$T_s = 7.32 \text{ ms}$$

8. Iz šljunčare se iskopani šljunak transportira kamionima. Kamioni se utovaraju pomoću utovarne trake (vidi sl. 7). Za pogon utovarne trake duge $l=10\text{m}$ koristi se trofazni asinkroni motor nazivnih podataka $P_N = 1.1\text{ kW}$, $U_N = 380\text{ V}$, $\cos\varphi_N = 0.75$, $\eta = 0.92$, $n_n=920\text{ rpm}$, $M_K = 2.3M_N$, spoj trokut. Strojari za iskop šljunka izbacuju šljunak gustoće $\rho = 2000\text{ kg/m}^3$ brzinom $dV/dt = 0.015\text{ m}^3/\text{s}$. Odredite:
- Ako se traži brzina gibanja transportne trake 4.6 m/s pri nazivnoj brzini vrtnje motora, koliko mora iznositi prijenosni omjer reduktora i ? Polumjer pogonske remenice iznosi $R = 0.1\text{ m}$. Obje remenice utovarne trake imaju jednak promjer!
 - Koliko iznosi potrebni moment i snaga na osovini motora da bi se osigurao protok šljunka od $dV/dt = 0.015\text{ m}^3/\text{s}$ uz nagib trake od $\alpha = 17.5^\circ$? Da li su moment i snaga funkcije brzine vrtnje motora?
 - Koliko iznose nazivni moment M_N , klizanje s_N te nazivna struja I_N pogonskog asinkronog motora?
 - Izračunajte prekretni moment M_K te prekretno klizanje s_K (koristeći Klossovu relaciju). Nacrtajte momentnu karakteristiku asinkronog motora te na njoj ucrtajte tražene veličine iz c) i d)!
 - Koliko kvadranta rada je potrebno za ispunjenje funkcije pogona utovara šljunka? Ako pretpostavimo da se radi o kaveznom asinkronom motoru predložite optimalno pojačalo i regulacijsku metodu.
 - Radi se o sustavu regulacije brzine vrtnje asinkronog motora s inkrementalnim enkoderom (1024 imp/r) kao mjernim članom brzine vrtnje. Stvarna brzina vrtnje se dobije mjerenjem broja impulsa u jedinici vremena (vremenu uzorkovanja) koje iznosi 10 ms (tzv. M metoda). Na osovini motora je priključen reduktor prijenosnog omjera izračunatog pod a). Izlazna osovina reduktora je spojena na radni mehanizam. Kolika je razlučivost mjerenja brzine vrtnje. Da li je važno na koju stranu reduktora (prema motoru ili prema radnom mehanizmu) treba postaviti mjerni član brzine vrtnje? Ako jeste, obrazložite razlog!



Sl. 7. Utovar šljunka pomoću utovarne trake

Rješenje:

a) Prijenosni omjer reduktora računa se kao:

$$i = \frac{\omega_T}{\omega_M}$$

$$\text{te uz } \omega_T = \frac{v}{R} \quad i \quad \omega_M = \frac{n_n \pi}{30}$$

slijedi

$$i = \frac{30 \cdot v}{n_n \cdot \pi \cdot R} = 2.09$$

b) Moment odnosno snaga računa se kao

$$M = F_t \cdot R = m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot R \cdot \frac{1}{i}$$

$$\text{te uz } m = \varphi \cdot V = \varphi \cdot \dot{V} \cdot \frac{1}{v} \quad i \quad v = \frac{\omega_M}{i} \cdot R$$

dobivamo

$$M = \frac{\dot{V} \cdot \varphi \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot l}{\omega_M} = \frac{885 \text{ Nm}}{\omega_M \text{ s}}$$

$$P = M \cdot \omega_M$$

$$P = \frac{885}{\omega_M} \cdot \omega_M = 885 \text{ W}$$

Iz izraza za moment i snagu vidljivo je da je moment funkcija brzine motora dok snaga nije.

c)

$$M_N = \frac{P_N}{\omega_N} = \frac{P_N}{\frac{n_N \cdot \pi}{30}} = 11.42 \text{ Nm}$$

$$s_N = \frac{n_s - n_N}{n_s} = \frac{1000 - 920}{1000} = 0.08 = 8\%$$

$$P_{In} = 3 \cdot U_N \cdot I_N \cdot \cos \varphi_N$$

$$I_n = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos \varphi_N}$$

Vrijedi

$$P_{IN} = \frac{P_N}{\eta} = 1195 \text{ W}$$

Na osnovu prethodnog dobiva se

$$I_{IN} = 2.42 \text{ A}$$

- d) Prekretni moment i prekretno klizanje.

$$M_K = 2.3 \cdot M_N = 26.26 \text{ Nm}$$

Prema Kloss – ovoj relaciji vrijedi

$$\frac{s_N}{s_K} + \frac{s_K}{s_N} = 2 \cdot \frac{M_K}{M_N} / s_N \cdot s_K$$

$$s_k^2 - \frac{M_K \cdot s_N}{M_N} \cdot s_k + s_N^2 = 0$$

$$s_k = 0.35 = 35\%$$

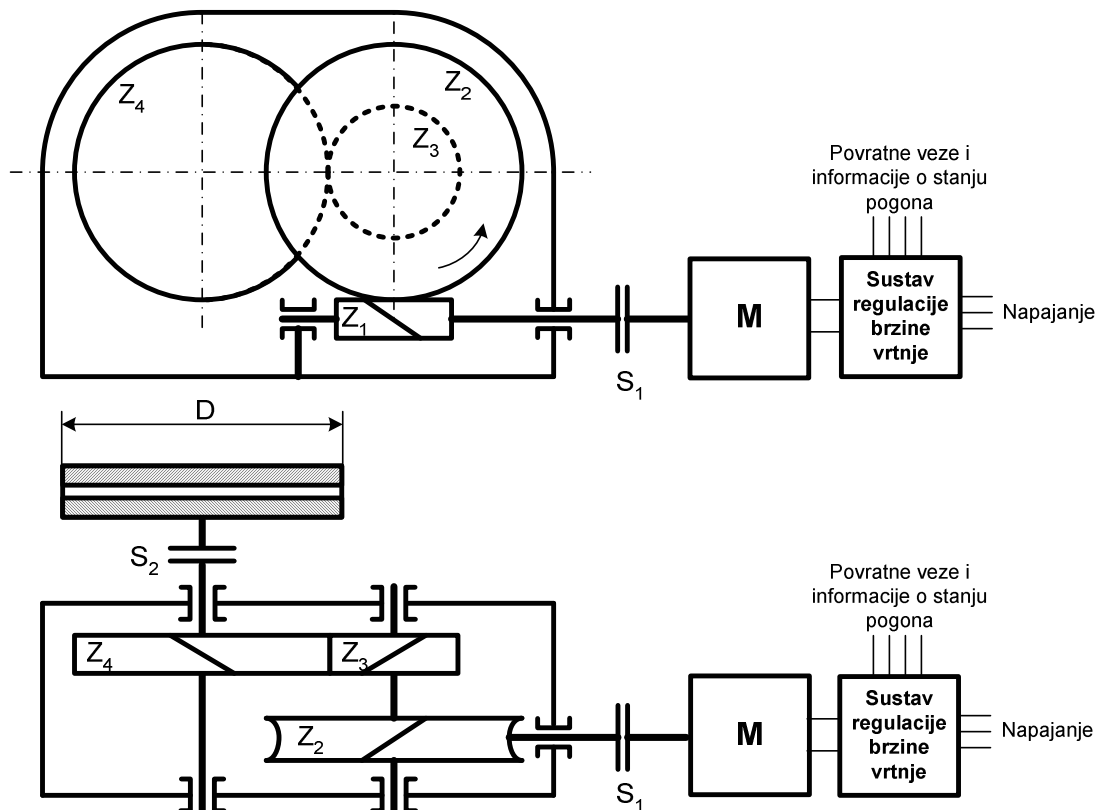
- e) Zahtjevi pogona utovara šljunka ne zahtijevaju promjenu smjera vrtnje ni kočenje jer je pretpostavljeno da motor ima ugrađenu kočnicu što bi bilo prikladnije od kočenja motorom. Zbog toga je dovoljno upotrijebiti jednokvadrantni pogon. Ako se radi o kaveznom asinkronom motoru prikladno bi bilo upotrijebiti frekvencijski pretvarač s regulacijom brzine vrtnje motora.
- f) Kod M metode mjerenja brzine vrtnje mjeri se broj impulsa u vremenu uzorkovanja. Točnost mjerenja je veća ako je broj impulsa u tom vremenu veći, pa iz toga proizlazi da je pogodnije montirati enkoder na kraj osovine motora tj. kraj osovine koji ima veću brzinu vrtnje. Ako je (R) rezolucija mjerenja brzine vrtnje na strani motora, najmanja razlučivost brzine vrtnje radnog mehanizma će biti $R \cdot i$. Upotrijebljen je enkoder s 1024 impulsa po okretaju. Brzinu se mjeri M metodom tj. mjeri se broj impulsa u vremenu. Ako je vrijeme uzorkovanja minimalno 10 ms potrebno je odrediti koliko se u tom vremenu može izbrojati impulsa enkodera. Dakle minimalni broj impulsa je jednak jedan. To znači da se minimalno može izbrojati 1imp u 10 ms tj. $1\text{imp}/0.01\text{s} = 100 \text{ imp/s}$. Ako je rezolucija enkodera 1024 imp/okr slijedi da minimalna brzina koja se može izmjeriti (razlučivost) iznosi

$$\frac{100 \frac{\text{imp}}{\text{s}}}{1024 \frac{\text{imp}}{\text{r}}} = 0.9765 \text{ r/s} = 5.86 \text{ r/min} = 5.86 \text{ rpm}.$$

Razlučivost mjerenja brzine vrtnje na strani motora je iznosi 5.86 rpm. Inače, općenita formula koja povezuje rezoluciju (R), broj impulsa enkodera po okretaju (N) i vrijeme uzorkovanja (T_s) glasi:

$$R = 1\text{imp} = \frac{60}{N[\text{imp/r}] \cdot T_s[\text{s}]} [\text{rpm}].$$

9. Za pogon translacijskog gibanja kod velike lučke dizalice koristi se dvostupanjski pužni prijenos. Ovakav prijenos omogućava zbog velikog prijenosnog odnosa transport velikih tereta. Dvostupanjski pužni prijenosnik z_1z_2 , kojemu drugi stupanj čini cilindrični zupčasti par s kosim zubima z_3z_4 , spojen je osovinom promjera $d_1=33$ mm, preko spojke S_1 , na istosmjerni nezavisno uzbuđeni motor M (s konstantnom uzbuđom) nazivnih podataka $n_n=1440$ rpm, $P_n=10$ kW, $U=220$ V, $\eta=0.95$, $R_a=0.08$ Ω . Prijenosnik je izlaznom osovinom, preko spojke S_2 , spojen na pogonski kotač promjera $D=80$ cm (sl. 8). Koeficijenti korisnog djelovanja spojke S_1 iznosi $\eta_{S1}=0.97$, spojke S_2 $\eta_{S2}=0.97$, valjnih (kotrljajućih) ležaja $\eta_L=0.99$, pužnog prijenosa z_1z_2 $\eta_P=0.885$ i zupčastog prijenosa z_3z_4 $\eta_Z=0.98$. Odredite:
- Koliko mora iznositi prijenosni omjer pužnog pogona i_{12} da bi se nazivno opterećena dizalica gibala brzinom 0.75 m/s? Prijenosni omjer cilindričnog zupčastog para iznosi $i_{34}=2$!
 - Koliki iznosi moment na izlaznoj spojci S_2 uz uvjete kao pod a)? Koliki maksimalni teret može prevesti dizalica? Iznos navedite u kg!
 - Kolika je postotna promjena brzine vrtnje motora kod nominalno opterećene dizalice u odnosu na brzinu praznog hoda?
 - Da li se može kočiti maksimalnim momentom iznosa $2M_n$ (na strani motora) s obzirom na dozvoljeno tangencijalno naprezanje pogonske osovine motora koje iznosi 20 MPa? Koliko mora iznositi promjer izlazne osovine prijenosnika da bi se moglo kočiti s $2M_n$ uz isto dozvoljeno tangencijalno naprezanje?
 - Koliko mora iznositi napon armature pogonskog istosmjernog motora da bi se uz nominalno opterećenje postigla brzina transporta od 0.5 m/s?
 - Sustav translacijskog gibanja dizalice definiran je kao digitalni sustav regulacije brzine vrtnje istosmjernog motora, a mjerni član brzine vrtnje je istosmjerni tahogenerator. Tahogenerator je zbog nepristupačnosti osovine motora montiran na stranu tereta tj. na pogonski kotač. Ako je karakteristika mjernog člana $60V/1500rpm$, kolika je razlučivost (rezolucija) mjerenja brzine vrtnje motora, ako se za analognu digitalnu pretvorbu koristi 12 bitni A/D pretvornik napajan s $\pm 10V$? Minimalnu rezoluciju izrazite kao minimalnu translacijsku brzinu gibanja dizalice. Izračunajte iznos naponskog djelitelja izlaznog napona istosmjernog tahogeneratora tako da se osigura mjerenje brzine vrtnje u rasponu od 0 do 1500 rpm.



Sl. 8. Dvostupanjski pužni prijenos translacijskog gibanja dizalice

Rješenje:

- a) Ukupni prijenosni omjer prijenosnika i je omjer između brzine vrtnje osovine motora i brzine vrtnje izlazne osovine prijenosnika. Ukupni prijenosni omjer je umnožak prijenosnog omjera pužnog prijenosa i_{12} i prijenosnog omjera cilindričnog zupčastog prijenosa i_{34} .

$$i = \frac{\omega_n}{\omega_T}$$

$$\omega_T = \frac{v}{R}$$

$$i = \frac{\omega_n}{\omega_T} = \frac{\frac{n_n \cdot \pi}{30}}{\frac{v}{R}} = \frac{n_n \cdot R \cdot \pi}{30 \cdot v} = \frac{1440 \cdot 0.4 \cdot \pi}{30 \cdot 0.75} = 80.42$$

$$i = i_{12} \cdot i_{34}$$

$$i_{12} = \frac{i}{i_{34}} \text{ uz zadani } i_{34} = 2 \text{ te izračunamo } i = 80.42 \text{ dobivamo}$$

$$i_{12} = \frac{80.42}{2} = 40.21$$

- b) Pogonski motor radi u nazivnoj radnoj točki. Poznavajući ukupni prijenosni omjer prijenosnika određen pod a) može se odrediti moment u spojci S_2 . Potrebno je uračunati i korisnost prijenosnika i spojki.

$$\eta_{uk} = \eta_s^2 \cdot \eta_L \cdot \eta_p \cdot \eta_Z = 0.97^2 \cdot 0.99 \cdot 0.885 \cdot 0.98 = 0.807$$

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n}{\frac{n_n \cdot \pi}{30}} = \frac{30 \cdot P_n}{n_n \cdot \pi} = 66.31 Nm$$

$$M_t = i \cdot M_n \cdot \eta_{uk} = 80.42 \cdot 66.31 \cdot 0.807 = 4303.45 Nm$$

Poznavajući promjer pogonskog kotača određuje se sila na njemu, a iz sile i masa potencijalnog tereta kojeg može prevoziti dizalica u nazivnim uvjetima rada istosmjernog motora.

$$M_t = F_t \cdot R$$

$$F_t = \frac{M_t}{R} = \frac{4303.45}{0.4} = 10758.62 N$$

$$F_t = m_t \cdot g$$

$$m_t = \frac{F_t}{g} = \frac{10758.62}{9.81} = 1096.69 kg$$

- c) Brzine P.H. i odnose kao omjer napona napajanja i protuelektromotorne sile ($E = k\Phi n$). Naime, u P.H. je protu EMS jednaka naponu napajanja dok u nazivnoj radnoj točki protu EMS iznosi:

$$U_n = I_n \cdot R_a + E$$

$$E = U_n - I_n \cdot R_a$$

$$I_n = \frac{P_n}{\eta \cdot U_n} = \frac{10000}{0.95 \cdot 220} = 47.85 A$$

$$E = 220 - 47.85 \cdot 0.08 = 216.17 V$$

Dakle omjer brzina P.H. i nazivne brzine motora odnose se kao:

$$\frac{216.17}{220} = 0.9826,$$

tj. brzine se u nazivnoj točki smanji za 1.74% u odnosu na brzinu P.H.

- d) Potrebno je provjeriti da li je osovina ispravno dimenzionirana!

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n}{\frac{n_n \cdot \pi}{30}} = \frac{30 \cdot P_n}{n_n \cdot \pi} = \frac{30 \cdot 10000}{1440 \cdot \pi} = 66.31 Nm$$

$$\tau = \frac{M}{W_p} = \frac{2 \cdot M_n}{\pi \cdot d_1^3} \text{ uz } d_1 = 33 mm \text{ i } M_t = 123.63 Nm \text{ dobivamo:}$$

$$\tau = \frac{132.63}{\pi \cdot 0.033^3} = 18.8 MPa$$

$$\tau = 18.8 MPa < 20 MPa$$

Iz rezultata je vidljivo da se može kočiti s $2M_n$ bez opasnosti od pucanja osovine.

Na izlaznoj osovini je $\eta_{uk} \cdot i$ puta veći moment. Prema tome dobiva se:

$$M_t = i \cdot M_n \cdot \eta_{uk}$$

$$\tau = \frac{M}{w_p} = \frac{2 \cdot M_t}{\pi \cdot d_2^3} = \frac{32 \cdot M_t}{\pi \cdot d_2^3}$$

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_t}{\pi \cdot \tau}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot i \cdot M_n \cdot \eta_{uk}}{\pi \cdot \tau}}$$

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 80.42 \cdot 66.31 \cdot 0.807}{\pi \cdot 20 \cdot 10^6}}$$

$$d_2 = 129.89 \text{ mm}$$

Može se primijetiti da promjer izlazne osovine mora biti ~4 puta veći od promjera osovine motora (ako su izrađene iz istog materijala)

- e) Iz poznatih relacija za istosmjerni motor određuje se napon statora motora da bi dizalica kretala brzinom 0.5 m/s.

$$v = 0.5 \text{ m/s}$$

$$n_1 = i \cdot \frac{30 \cdot v}{R \cdot \pi} = 80.42 \cdot \frac{30 \cdot 0.5}{0.4 \cdot \pi} = 954.92 \text{ rpm}$$

$$\frac{E_n}{E} = \frac{n_n}{n_1}$$

$$E = \frac{954.92}{1440} \cdot 216.17 = 143.35 \text{ V}$$

$$U = I_n \cdot R_a + E = 47.85 \cdot 0.08 + 143.35 = 147.17 \text{ V}$$

f)

$$k_{\text{djelitelja}} = \frac{10}{60} = 0.167$$

$$2^{11} = 1500 \text{ rpm} \quad 1 \text{ bit za predznak}$$

$$2048 = 1500 \text{ rpm}$$

$$l = 0.73 \text{ rpm}$$

$$\text{razlucivost} = 0.73 \text{ rpm}$$

$$\text{razlucivost} = \frac{0.73 \cdot \pi}{30} \cdot R = 19.17 \text{ mm/s}$$

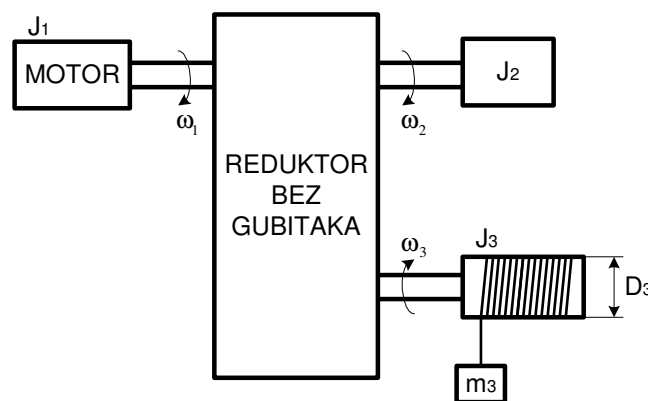
10. Za sustav na sl.9. izračunati:

- Ukupni moment tromosti (zamašne mase) reduciran na osovini motora.
- Ukoliko se želi regulirati brzina dizanja/spuštanja tereta (mase m_3) treba ugraditi inkrementalni enkoder kao mjerni član brzine. Ugradnja je moguća na bilo kojoj strani (na strani motora zamašne mase J_1 , zamašne mase J_2 i na strani bubnja J_3). S ciljem da se dobije što manja minimalna brzina dizanja/spuštanja tereta (najbolja razlučivost), potrebno je odrediti optimalno mjesto ugradnje inkrementalnog enkodera (obrazložiti zašto!!!). Uz tako odabrano mjesto ugradnje, odrediti iznos minimalne brzine dizanja/spuštanja tereta mase m_3 ako je poznato:.

Prijenosni omjer reduktora $i_{13}=10$, $i_{12}=5$

Promjer bubnja 15,7 cm

Enkoder s 500 imp/r, M metoda mjerenja brzine, vrijeme uzorkovanja 2ms



Sl. 9. Motor s karakterističnim radnim mehanizmom

Rješenje:

- Ukupna zamašna masa na osovini motora je jednaka zbroju svih zamašnih masa reduciranih na osovini motora tj. $J = J_1 + J'_2 + J'_3 + J'_{m3}$

Masa J_2 :

$$\frac{J_2 \cdot \omega_2^2}{2} = \frac{J'_2 \cdot \omega_1^2}{2}$$

$$J'_2 = J_2 \cdot \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2$$

Masa J_3

$$\frac{J_3 \cdot \omega_3^2}{2} = \frac{J'_3 \cdot \omega_1^2}{2}$$

$$J'_3 = J_3 \cdot \left(\frac{\omega_3}{\omega_1} \right)^2$$

Zamašna masa tereta m_3 :

$$E_k = \frac{m_3 \cdot v_3^2}{2} = \frac{m_3}{2} \cdot \left(\frac{D_3}{2}\right)^2 \cdot \omega_3^2$$

$$\frac{J'_{m3} \cdot \omega_1^2}{2} = \frac{m_3}{2} \cdot \left(\frac{D_3}{2}\right)^2 \cdot \omega_3^2$$

$$J'_{m3} = \frac{m_3}{2} \cdot \left(\frac{D_3}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{\omega_3}{\omega_1}\right)^2$$

Dakle ukupna zamašna masa reducirana na osovinu motora iznosi:

$$J = J_1 + J'_2 + J'_3 + J'_{m3} = J_1 + J_2 \cdot \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 + \left[J_3 + m_3 \cdot \left(\frac{D_3}{2}\right)^2 \right] \cdot \left(\frac{\omega_3}{\omega_1}\right)^2$$

- b) Kod M metode mjerenja brzine vrtnje mjeri se broj impulsa u vremenu uzorkovanja. Točnost mjerenja je veća ako je broj impulsa u tom vremenu veći, pa iz toga proizlazi da je pogodnije montirati enkoder na kraj osovine motora tj. kraj osovine koji ima veću brzinu vrtnje. Ako je (R) rezolucija mjerenja brzine vrtnje na strani motora, najmanja razlučivost brzine vrtnje radnog mehanizma će biti $R \cdot i$. Upotrijebljen je enkoder s 500 impulsa po okretaju. Brzinu se mjeri M metodom tj. mjeri se broj impulsa u vremenu. Ako je vrijeme uzorkovanja minimalno 2 ms potrebno je odrediti koliko se u tom vremenu može izbrojati impulsa enkodera. Općenita formula koja povezuje rezoluciju (R), broj impulsa enkodera po okretaju (N) i vrijeme uzorkovanja (T_s) glasi:

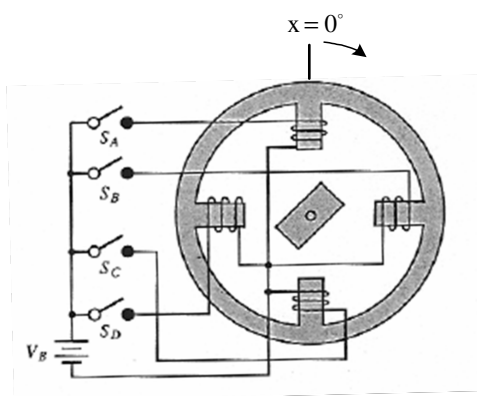
$$R = 1 \text{ imp} = \frac{60}{N[\text{imp/r}] \cdot T_s[\text{s}]} [\text{rpm}]$$

$$R = \frac{60}{500 \cdot 0.002}$$

$$R = 60 \text{ rpm}$$

Rezultat pokazuje da je ovako izveden sustav regulacije brzine vrtnje neprecizan jer minimalna mjerljiva brzina vrtnje iznosi 60 rpm. Za poboljšanje regulacijskih karakteristika najprikladnije je odabrati enkoder s većom rezolucijom (npr. 2048 ili 4096 imp/r)

11. Za gibanje rotora koračnog motora u koracima od 45° geometrijskih odrediti:
- Tabelarni prikaz stanja sklopki S_A - S_D . Spoj koračnog motora i sklopki prikazan je na sl. 10.
 - Odredite koliko mora iznositi trajanje jedne sekvence da bi se rotor vrtio brzinom od 750 rpm (okr/min). Sekvenca je vremenski interval u kojem stanje svih sklopki (S_A - S_D) ostaje nepromijenjeno.
 - Ako se koračni motor želi koristiti za sustav regulacije (upravljanja) položaja izlazne osovine motora, da li je za mjerenje položaja osovine potrebno mjerenje položaja (kuta) rotora? Ako jeste, koji biste mjerni član koristili? Dati obrazloženje!
 - Koja je rezolucija sustava regulacije (upravljanja) položaja?



Sl.10. Upravljanje koračnim motorom

Rješenje:

- Redoslijed uklapanja sklopki prikazan je u tab. 1.

$X [^\circ]$	S_A	S_B	S_C	S_D
0	1	0	0	0
45	1	1	0	0
90	0	1	0	0
135	0	1	1	0
180	0	0	1	0
225	0	0	1	1
270	0	0	0	1
315	1	0	0	1
360	1	0	0	0

Tab. 1. Redoslijed uklapanja sklopki

- b) Brzinu od 750 okr/min možemo izraziti i kao 750/60 okr/s. Slijedi:

$$x = 45^\circ = \frac{2\pi}{8} \text{ rad} = \frac{1}{8} \text{ okr}$$

$$n = \frac{x}{T} = \frac{1}{8 \cdot T} \text{ okr/s}$$

$$T = \frac{1}{8 \cdot n} \text{ s}$$

Konačno za brzinu 750/60 okr/s dobivamo:

$$T = 0.01 \text{ s.}$$

- c) U načelu se upravljanje položajem radi u otvorenoj petlji pa mjerni član nije potreban. Ako motor nije preopterećen, broj generiranih impulsa (broj stanja, u ovom slučaju postoji ih 8) određuje željenu poziciju rotora. Uobičajeno se koračni motor odabire tako da se nikad ne prekorači opterećenje definirano njegovom statičkom momentnom karakteristikom, tako da se uvijek postigne tražena pozicija rotora. Za ostvarivanje sustava regulacije pozicije osovine motora potrebno je poznavati trenutno stanje reguliranje veličine. Za mjerenje pozicije osovine najprikladnije je odabrati enkoder. Pomoću enkodera moguće je ostvariti veću rezoluciju mjerenja pozicije u odnosu na tahogenerator zbog veće točnosti enkodera kod malih pomaka.

Ukoliko su sklopke S_A - S_D izvedene kao elektroničke preklopke te njima upravlja digitalni sustav regulacije brzine vrtnje tada je moguće estimirati položaj osovine motora na osnovu trenutnog stanju (uklopljeno ili isklopljeno) sklopki S_A - S_D . Treba uočiti da je u tom slučaju rezolucija mjerenja pozicije osovine samo 45° .

- d) Iz tablice 1. vidljivo je da je minimalni pomak osovine motora ostvariv ovim načinom upravljanja 45° . Samim time određena je i rezolucija sustava regulacije položaja osovine motora. Dakle rezolucija iznosi:

$$R = 45^\circ.$$

- 12 Nacrtati strukturnu blok shemu elektromehaničkog sustava s istosmjernim motorom (nezavisna i konstantan uzbuda) upravljanog naponom armature. Motor zamašne mase J_1 mehanički je povezan putem osovine krutosti c i prigušenja h s radnim mehanizmom zamašne mase J_2 . Podaci motora: otpor armature R_a , konstante k_e i k_m , L_a i m_{tr} se zanemaruju. Svi mehanički gubici se također zanemaruju.

Rješenje:

Ako zanemarimo induktivitet namota statora L_a istosmjerni motor može se opisati s dvije jednačbe:

$$m_m = k_m \cdot i_a = m_T + J_1 \frac{d\omega}{dt}$$

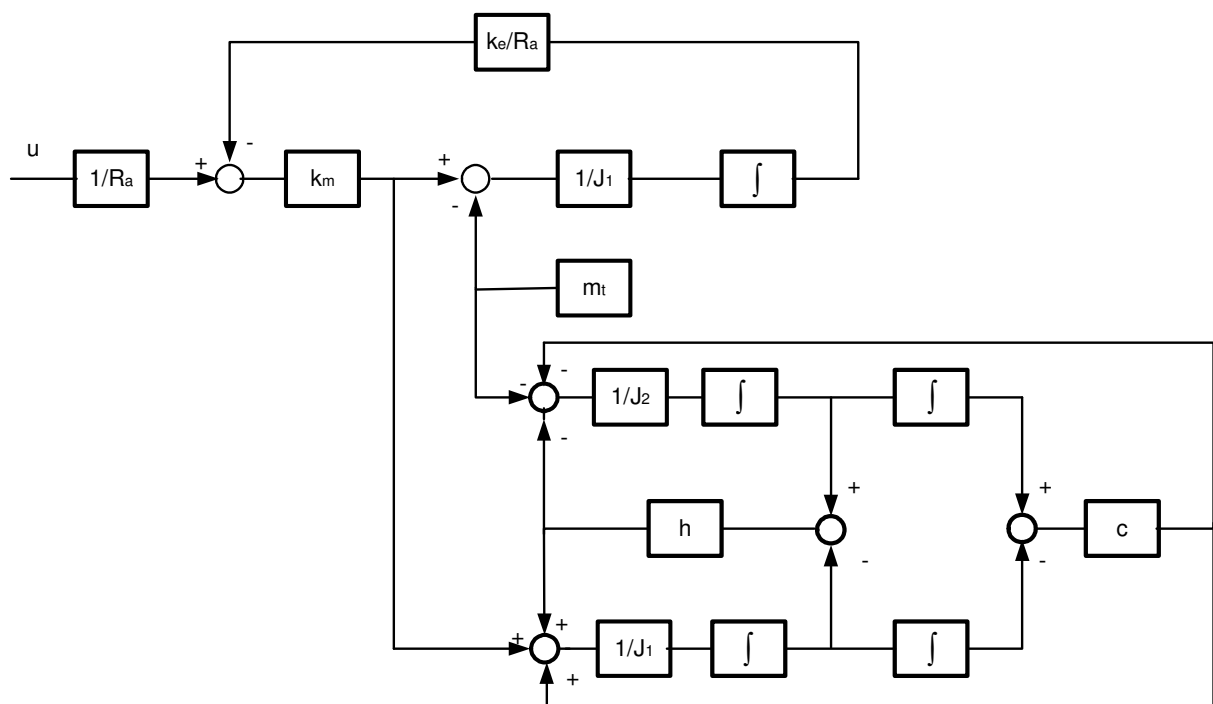
$$u = i_a \cdot R_a + k_e \cdot \omega$$

Torzioni model dvije mase međusobno povezane osovinom konačne krutosti opisuje se na slijedeći način:

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} - c(\varphi_2 - \varphi_1) - h(\omega_2 - \omega_1) = m_m$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} + c(\varphi_2 - \varphi_1) + h(\omega_2 - \omega_1) = -m_T$$

Ova dva sustava su međusobno povezana pa se može nacrtati blok shema koja opisuje ponašanje ovog elektromehaničkog sustava (sl. 11.).



Sl. 11. Elektromehanički sustav