

Električna vozila - Zadaci za samostalni rad studenata

1. Električni automobil mase $m = 1000$ kg pokreće se pomoću motora čija maksimalna ugaona brzina rotora iznosi $\omega_{max} = 300$ rad/s. Maksimalni moment motora $M_{max} = 50$ Nm raspoloživ je u celokupnom opsegu brzina od 0 do ω_{max} . Sprega motora sa pogonskom osovinom je takva da na raspolaganju stoje 4 stepena prenosa: I, II, III i IV. Pri maksimalnoj brzini motora ω_{max} , stepenima I, II, III i IV odgovaraju brzine vozila od 25, 50, 75 i 100 km/h, respektivno. Zanimajući otpore kretanju, odrediti vreme koje je potrebno za ubrzanje vozila iz stanja mirovanja do brzine od 100 km/h na ravnom putu. (zbirka, zadatak 1.1)

Rešenje: $t = 32,16$ s

2. Električno vozilo za manipulaciju i prevoz tereta u magacinima (viljuškar) pokreće se vučnim motorom jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom. Maksimalna raspoloživa vučna sila koja se može razviti iznosi $F_{max} = 1000$ N, i uz nju se vozilo za 3 sekunde zaleće do maksimalne brzine od $v_{max} = 2$ m/s. Otpori kretanju se mogu zanemariti. Efikasnost vučnog pretvarača za napajanje motora je 92 %. Odrediti iznos električne energije koja se utroši pri prelasku puta po dijagramu: 3 sekunde ubrzanja - 5 sekundi vožnje brzinom v_{max} - 3 sekunde usporjenja do zaustavljanja. (zbirka, zadatak 1.2)

Rešenje: $W_{\gamma} = 500,9$ J

3. Električni voz od $G = 220$ t na kraju faze reostatskog polaska, pri ubrzanju od $0,8$ m/s², dostiže ekonomsku karakteristiku pri brzini od 40 km/h . Kolika je u tom trenutku snaga koja je uzeta iz mreže, ako je ukupan stepen iskorišćenja 0,8? Kolika je snaga pri električnom kočenju na padu od 2 %? Pri tome se električni voz kreće istom brzinom sa kojom je dostigao ekonomsku karakteristiku, uz pretpostavljen isti stepen iskorišćenja. Koeficijent korekcije mase zbog obrtnih kretanja iznosi $\varepsilon = 0,15$, a stalni otpori vuče se računaju prema obrascu

$$\sum f_{ot} \left[\frac{\text{kp}}{\text{t}} \right] = 2,2 + 0,0003 \cdot \left(v \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right] \right)^2 . \quad (\text{zbirka, zadatak 2.3})$$

Rešenje: $P_1 = 2,89$ MW , $P_2 = 332$ kW

4. Lokomotiva ima 4 paralelno vezana vučna motora jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom. Težina lokomotive je 80 t. Koeficijent adhezije dat je formulom

$$\xi = 0,29 + \frac{8}{80 + 25 v \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right]} .$$

Nominalni napon motora je 2000 V, $R_a = 0,03$ Ω , $I_n = 600$ A, $k_c \Phi = 9,55$ Vs/rad. Prečnik pogonskih točkova je 0,8 m, dok je prenos reduktora $i = 5,75$.

- a) Kolika je maksimalna vučna sila pri polasku lokomotive, s obzirom na adheziono ograničenje, i kolika je polazna struja svih motora?
b) Pri brzini od $v = 50$ km/h, vukući voz čija težina iznosi 1000 t, ostvaruje se ubrzanje od $a = 0,1$ m/s². Odrediti struje pojedinačnih motora, ukupnu struju i srednju vrednost napona na motorima. Stalni otpori vuče se računaju po obrascu

$$\sum f_{ot} \left[\frac{\text{kp}}{\text{t}} \right] = 2,2 + 0,0003 \left(v \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right] \right)^2 , \quad \text{dok je koeficijent korekcije masa } \varepsilon = 0,1. \quad (\text{zbirka, zadatak 3.1})$$

Rešenje: a) $F_{vmax} = 306072$ N , $I_{upol} = 2229,5$ A .

b) $I_m^1 = 273,4$ A , $I_u = 1093,6$ A , $U_M = 1915$ V

5. Lokomotiva mase 80 t vuče voz od 1200 t. Koeficijent adhezije se menja prema obrascu:

$$\xi_a \left[\frac{\text{kp}}{\text{kg}} \right] = \frac{\xi_{a,max}}{1 + 0,01 \cdot v \left[\text{km/h} \right]} , \quad \xi_{a,max} = 0,3 \frac{\text{kp}}{\text{kg}} .$$

- a) Kolika je maksimalna vučna snaga, $\max(P_{v,max})$, definisana adhezijom?

- b) Stalni otpori vuče na izvesnoj trasi su konstantni i iznose $\Sigma f_{ot} = 2,2 \text{ kp/t}$. Trasa poseduje uspon od $i = 10 \text{ ‰}$. Kolika je ukupna snaga, P , na obodu točkova lokomotive ako se kompozicija kreće opisanom trasom uz maksimalno iskorišćenje athezije?
- c) Koliko je maksimalno polazno ubrzanje, $a_{p,max}$ na ravnoj trasi, ako se stalni otpori vuče mogu zanemariti? Koeffcijent korekcije obrtnih masa je $\varepsilon = 10 \text{ ‰}$.

Rešenje: a) $\max(P_{v,max}) = \lim_{v \rightarrow \infty} P_{v,max}(v) = 6.54 \text{ MW}$.

b) $P = 2,285 \text{ MW}$

c) $a_{p,max} = 0,167 \text{ m/s}^2$

6. Električno vozilo za manipulaciju i prevoz tereta u magacinima (viljuškar) pokreće se vučnim motorom jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom. Maksimalni raspoloživi moment koji motor može da razvije iznosi $M_{max} = 50 \text{ Nm}$, dok je maksimalna brzina obrtanja $\omega_{max} = 125 \text{ rad/s}$. Sistem prenosa je takav da maksimalnoj brzini motora odgovara translatorna brzina viljuškara od $v = 2 \text{ m/s}$. Na osovini motora svedeni moment inercije obrtnih masa i masa vozila iznose $J_{ekv} = 0,8 \text{ kgm}^2$. Trenje i ostali otpori kretanju mogu se zanemariti. Odrediti najkraće vreme u kome viljuškar može da pređe put od $S = 12 \text{ m}$, imajući u vidu da u početnom i krajnjem položaju mora da bude u mirovanju ($v = 0$). (zbirka, zadatak 4.1)

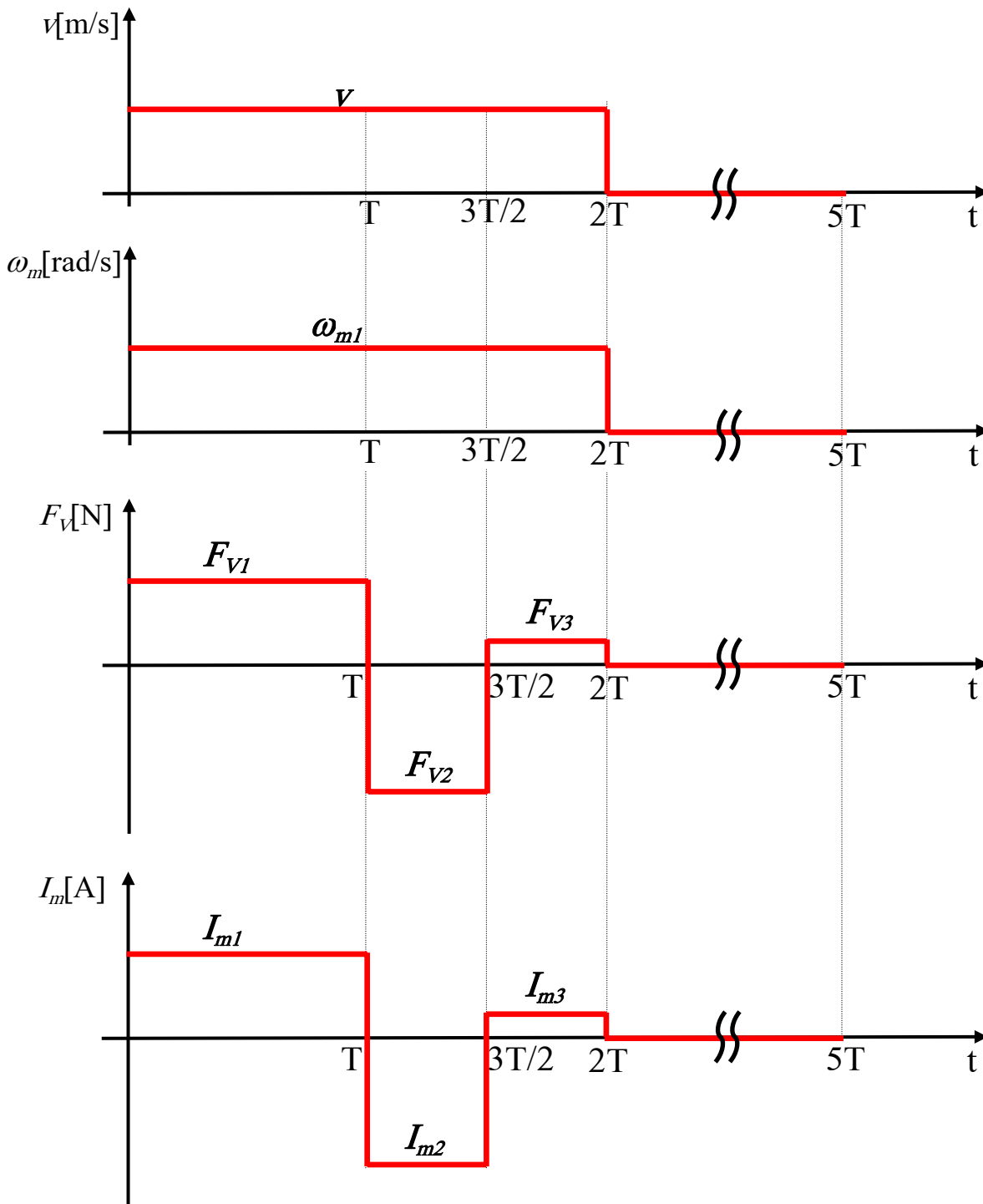
Rešenje: $t_{min} = 8 \text{ s}$

7. Električno vozilo treba da obavlja na trasi koja u prvoj sekciji dužine $L/2 \text{ [m]}$ ima uspon od $i \text{ [‰]}$, u drugoj sekciji dužine $L/4 \text{ [m]}$ ima pad od $2*i \text{ [‰]}$ dok je treća sekcija dužine $L/4$ ravna. Vozilo obavlja vožnju u oba smera. U toku vožnje, vozilo se kreće konstantnom brzinom $v \text{ [m/s]}$. Može se smatrati da faze ubrzanja i usporenja traju veoma kratko, pa se ovi intervali u odnosu na trajanje vožnje mogu zanemariti. Trajanje vožnje u jednom smeru je $2T = L/v$, nakon čega vozilo u krajnjim stanicama čini pauzu trajanja $3T$ a potom kreće istom trasom nazad. Pre nego što vozilo krene u naredni ciklus vožnje, u polaznoj stanici provede $3T$ u stanju mirovanja. Poznata je masa vozila $m \text{ [kg]}$, koeffcijent ε , kao i specifični otpor kretanju na ravnoj trasi od $f_o = \text{[N/kg]}$ (voditi računa da je f_o izraženo u N/kg). Poznat je i prečnik pogonskih točkova $D \text{ [m]}$ kao i odnos prenosa $i_{pren} = \omega_m / \omega_o$. Vozilo se pokreće pomoću vučnog motora JSS za koji je poznato $\Phi = \Phi_{nom}$, kao i $k_e = k_m$. U toku vožnje, napon na krajevima motora ne dostiže iznos nominalnog napona (tj. $E_{AB} \cdot U_m < U_{nom}$).
- a) Nacrtať putne dijagrame brzine, vučne sile, brzine obrtanja motora i struje motora.
- b) Smatrajući da se opisani ciklus vožnje neprekidno ponavlja, izraziti u funkciji poznatih veličina termički ekvivalent struje motora (tj. efektivnu vrednost računatu u vremenskom intervalu koji traje koliko i jedan ciklus vožnje)

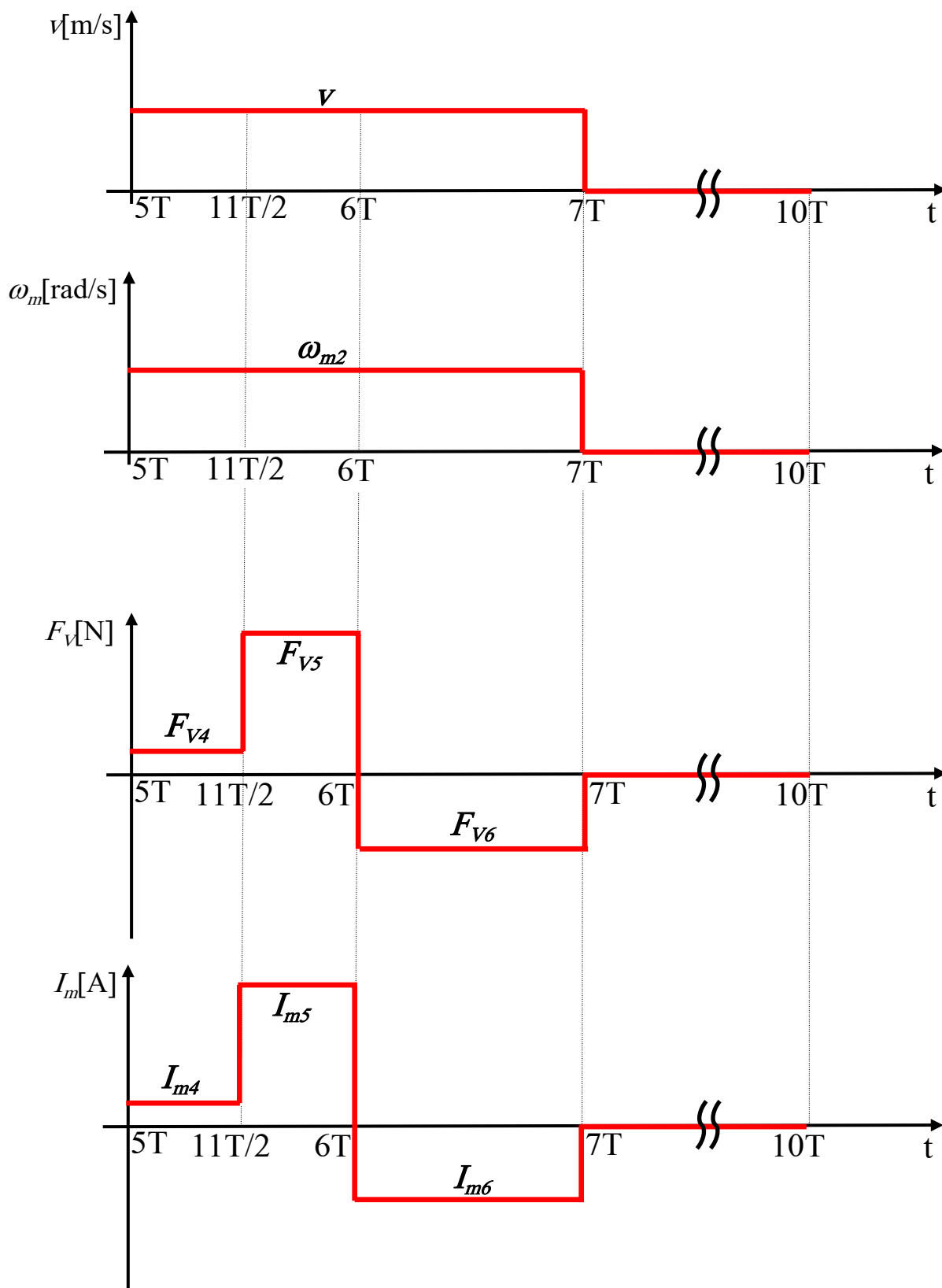
Rešenje:

a)

Izgled putnih dijagrama na prvoj polovini ciklusa vožnje, $t \in (0, 5T)$:



Izgled putnih dijagrama na drugoj polovini ciklusa vožnje, $t \in (5T, 10T)$:



Vrednosti veličina specificiranih na prethodnim dijagramima su:

$$\omega_{m1} = \omega_{m2} = \frac{2i_p}{D} v$$

$$F_{v1}[N] = m[kg] \cdot \left(\sum f_{ot} \left[\frac{N}{kg} \right] + \frac{i \left[\frac{\circ}{\dots} \right] \cdot g \left[\frac{m}{s^2} \right]}{1000} \right)$$

$$F_{v2}[N] = m[kg] \cdot \left(\sum f_{ot} \left[\frac{N}{kg} \right] - \frac{2i \left[\frac{\circ}{\dots} \right] \cdot g \left[\frac{m}{s^2} \right]}{1000} \right)$$

$$F_{v3}[N] = F_{v4}[N] = m[kg] \cdot \sum f_{ot} \left[\frac{N}{kg} \right]$$

$$F_{v5}[N] = m[kg] \cdot \left(\sum f_{ot} \left[\frac{N}{kg} \right] + \frac{2i \left[\frac{\circ}{\dots} \right] \cdot g \left[\frac{m}{s^2} \right]}{1000} \right)$$

$$F_{v6}[N] = m[kg] \cdot \left(\sum f_{ot} \left[\frac{N}{kg} \right] - \frac{i \left[\frac{\circ}{\dots} \right] \cdot g \left[\frac{m}{s^2} \right]}{1000} \right)$$

$$I_{m(i)} = \frac{D}{2i_p k_m \Phi_{nom}} F_{v(i)} \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$$

b)

- Termički ekvivalent struje motora se može iskazati kao:

$$I_{m,rms} = \frac{D \cdot m[kg]}{2i_p k_m \Phi_{nom}} \sqrt{0.4 \left(\sum f_{ot} \left[\frac{N}{kg} \right] \right)^2 + 0.6 \left(\frac{i \left[\frac{\circ}{\dots} \right] \cdot g \left[\frac{m}{s^2} \right]}{1000} \right)^2}$$

8. Voz ukupne mase $G = 1200$ t vuče lokomotiva napajana iz jednofaznog sistema 25 kV, 50 Hz. Lokomotiva poseduje četiri motora jednosmerne struje koji su paralelno vezani. Parametri svakog od motora su $U_n = 1500$ V, $I_n = 500$ A, $R_a = R_p = 30$ m Ω , $k_e \Phi_n = 9$ V/(rad/s). Koeficijent prenosa iznosi $k_p = 1500$ (ob/min) / 90 (km/h). Voz se kreće usponom od 8 ‰ ($0,8$ %) na trasi sa specifičnim otporom kretanju od 5 kp/t, brzinom od $v = 8$ m/s. Poznato je da je pobudni fluks motora blizak nominalnoj vrednosti. Odrediti snagu gubitaka u bakru (namotajima) jednog motora.

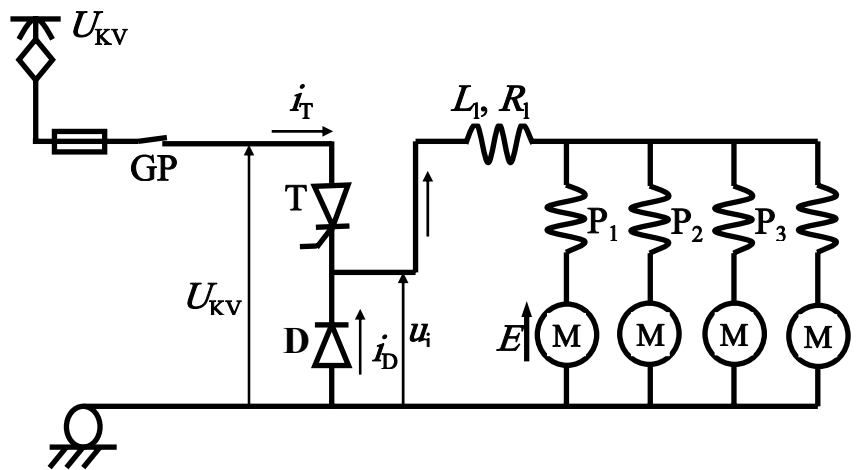
Rešenje: $P_{\gamma, Cu} = 27436$ W.

9. Tramvaj pogonjen rednim motorom jednosmerne struje kreće se ravnom trasom brzinom v_0 . Otpori kretanju su konstantni i mogu se smatrati nezavisnim od brzine. Pobudni namotaj je šantiran otpornikom čiji je omski otpor trostruko veći od omskog otpora pobudnog namotaja. Odrediti brzinu v_1 kojom će se kretati tramvaj nakon isključenja otpornika za šantiranje polja.

Rešenje: $v_1 = 0.866 \cdot v_0$

10. Tramvaj težine $G = 28$ t ima četiri vučna motora jednosmerne struje sa rednom pobudom. Parametri svakog od motora su $U_{nom} = 800$ V, $I_{nom} = 500$ A, $R_a = R_p = 25$ m Ω ,

$k_e \Phi_{nom} = 3$ V/(rad/s). Poznato je da je pobudni fluks motora blizak nominalnoj vrednosti. Jedinstvena motorna prigušnica otpornosti $R_1 = 0,05$ Ω i induktivnosti $L_1 \gg L_a$ priključena je između čopera spuštača napona i paralelne veze četiri motora. Prečnik točkova tramvaja je $D = 0,75$ m. Prenosnik motor - pogonska osovina je takav da za jedan pun obrtaj točka motor načini $i_p = 5$ obrtaja. Stalni otpori vuče su $\Sigma f_{ot} = 12$ kp/t. Napon kontaktnog voda $U_{kv} = 700$ V može se smatrati konstantnim. Pri provođenju čoperska dioda ima pad napona $V_D = 1$ V, a čoperski tiristor $V_T = 1,5$ V. Komutaciono kolo čopera zanemariti. Nominalna učestanost čopera je $f_n = 500$ Hz, a minimalno vreme vođenja tiristora je $t_{on(min)} = 0,3$ ms. Tramvaj se kreće po trasi uspona $i = 5$ ‰.



- a) Odrediti vrednost minimalne brzine tramvaja, v_{min} [km/h], pri kojoj se još uvek može na opisanoj trasi primenjivati nominalna prekidačka učestanost čopera.
- b) Za granični režim rada opisan u tački a), nacrtati vremenske dijagrame napona na izlazu čopera, $u_i(t)$, struje čoperske diode, $i_D(t)$, i struje čoperskog tiristora, $i_T(t)$, na vremenskom intervalu od 2 prekidačke periode.
- c) Kolika se maksimalna brzina, v_{max} [km/h], može postići na opisanoj trasi ukoliko se ne vrši slabljenje polja, već se upravljanje brzinom vrše samo promenom srednje vrednosti napona na izlazu čopera? Izračunati vrednost indeksa modulacije u tom slučaju.
- d) Odrediti indeks modulacije čopera pri vožnji na opisanoj trasi, brzinom od 25 km/h.
- e) Primenom 4 identična otpornika za šantiranje polja na sva 4 motora postignuta je brzina kretanja na opisanoj trasi od $1.1 v_{max}$. Kolika je maksimalna vrednost otpora otpornika, R_{max} , kojima se to moglo postići? Smatrati da se priključenjem otpornika za šantiranje polja intenzitet fluksa menja linearno proporcionalno promeni pobudne struje.

Rešenje:

- a) $v_{min} = 8.7 \frac{km}{h}$
- b) pogledati skriptu sa predavanja
- c) $v_{max} \left[\frac{km}{h} \right] = 62.21 \frac{km}{h} \quad m = m_{max} = 1$
- d) $m = 0.41$
- e) $R_{max} = 119 m\Omega$.

11. Električno vozilo težine $G_a=5$ tona pogoni se pomoću nezavisno pobuđenog motora jednosmerne struje. Namotaj indukta motora priključen je na izlaz tranzistorskog čopera spuštača napona koji poseduje 2 tranzistora i 2 diode. Komutaciona frekvencija čopera je $f=2$ kHz. Pri provođenju, pad napona na diodama je $V_D=1,8$ V, a na tranzistorima snage $V_T=3,9$ V. Napon kontaktne mreže je konstantan i iznosi $U_{KV}=750$ V. Ugaonoj brzini obrtanja motora od $n_{ref}=1500$ ob/min odgovara brzina vozila $v_{ref}=18$ m/s. Omska otpornost namota indukta motora je $R_a=100$ mΩ. Omska otpornost motorne prigušnice je $R_m=9$ mΩ, dok su konstante motora $k_e \Phi_n = k_m \Phi_n = 3$ V/(rad/s) = 3 Nm/A. Vozilo razvija vučnu silu $F_v=3500$ N pri indeksu modulacije čopera od $m=0,5$. Odrediti brzinu kretanja vozila, v .

Rešenje: $v = 13,66 \frac{m}{s}$.

12. Jednofazna diodna lokomotiva težine $G_a=80$ [t] poseduje 4 vučna motora i vuče kompoziciju od 30 vagona od kojih je svaki težak 30 [t]. Trasa je prava i ima uspon od pet promila. Stepen graduatora postavljen je na maksimum ($N=43$) tako da se na primaru transformatora 25kV/2kV ima napon od 25 kV. Poznato je da stalni otpori kretanju iznose $\Sigma f_{ot}=3$ [kp/t] dok je otpor vazduha zanemariv, kao i da se svi serijski padovi napona mogu zanemariti. Ekvivalentna induktivnost naizmeničnog kola se može zanemariti, $L_\gamma \approx 0$. Prenosni mehanizam je takav da brzini kretanja od 100 [km/h] odgovara brzina obrtanja svakog od 4 vučna motora od 1500 [o/min]. Poznato je da se u namotaju indukta pri nominalnom fluksu i brzini od od 1500 [o/min] indukuje elektromotorna sila $E_{ab}=1500$ V. Odrediti brzinu kojom se lokomotiva kreće u slučaju da je pobudni fluks na nominalnoj vrednosti.

Rešenje: $v_1 = 120$ km/h.

13. Jednofazna električna lokomotiva napajana iz kontaktnog voda na kome je napon efektivne vrednosti 25 kV i učestanosti 50 Hz pokreće se pomoću četiri jednaka, paralelno povezana redna motora jednosmerne struje, čiji su parametri poznati: $U_n=1200$ V, $I_n=500$ A, $R_a+R_p=0,05$ Ω, $k_m \Phi_{max}=9$ Nm/A. Pri struji motora većoj od 250 A, magnetno kolo na putu pobudnog fluksa je u stanju dubokog zasićenja i fluks se može smatrati konstantnim, $\Phi=\Phi_{max}$. Lokomotiva poseduje graduator napona koji omogućuje podešavanje napona od 0 do 25 kV, u koracima od 1 kV. Graduator je povezan sa primarom transformatora prenosnog odnosa $m_t=25$ kV / 2 kV. Termogena (aktivna) otpornost naizmeničnog kola se može zanemariti. Ekvivalentna induktivnost naizmeničnog kola svedena na primarnu stranu (25 kV) transformatora može se smatrati nezavisnom od stepena graduatora i ona iznosi $L_e=31,25$ mH. Prenosni odnos i prečnik pogonskih točkova su takvi da ugaonoj brzini obrtanja motora od 1200 ob/min odgovara brzina lokomotive od 60 km/h. Sekundar transformatora priključen je na punoupravljivi tiristorski most sa simetričnim okidanjem tiristora (tj. ugao paljenja je jednak za sva četiri tiristora u mostu). Ispravljeni napon dovodi se na paralelnu vezu motora preko motorne prigušnice u jednosmernom kolu koja umanjuje valovitost struje indukta i čiji je omski otpor $R_l=10$ mΩ.

a) Nacrtati kompletnu električnu šemu opisane jednofazne tiristorske lokomotive.

b) Odrediti stepen graduatora, N , i ugao paljenja tiristora, α [°], u režimu $v=30$ km/h, $F_v=8000$ [kp]. Zanemarujući period trajanja komutacije, izračunati efektivnu vrednost struje u kontaktnom vodu, $I_{kv,rms}$.

c) Za režim kretanja opisan u tački b) nacrtati vremenske dijagrame: napona na izlazu tiristorskog mosta ($u_i(t)$), struje sekundara transformatora, ($i''(t)$), napona, ($u''(t)$), sekundara transformatora, kao i struje kontaktnog voda, $i_{KV}(t)$, na vremenskom intervalu od 40 ms. Pri crtanju opisanih vremenskih dijagrama zanemariti trajanje perioda komutacije.

Rešenje:

a) pogledati skriptu sa predavanja

b) $N=8,85 \Rightarrow$ usvaja se $N=9$ $\alpha=10,32^\circ$ $I_{kv,rms}=33,3$ A

c) pogledati skriptu sa predavanja

14. Električno vozilo pogoni se pomoću dva paralelno vezana motora jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom, pobudni fluks jednak je Φ_p . Poznata je omska otpornost pobudnog namotaja R_p kao i omska otpornost namotaja indukta R_r . Svaki od motora spregnut je mehanički sa svojom pogonskom osovinom. Nominalni prečnik pogonskih točkova je D . Prenosnik je načinjen tako da za i obrtaja pogonska osovina načini jedan obrtaj. Motori se napajaju iz čopera spuštača napona. Vozilo se kreće brzinom v , pri čemu su struje indukta I_{a1} i I_{a2} , $I_{a1} > I_{a2}$. Odrediti koja pogonska osovina (spregnuta za motor 1 ili za motor 2) ima veći prečnik točkova i ovu razliku ΔD izraziti u funkciji poznatih veličina.

Rešenje: $D_1 > D_2$, $\Delta D = \frac{R_a D^2}{k_e \Phi_p \cdot 2 \cdot i \cdot v} (I_{a1} - I_{a2})$, gde je $D_1 * D_2 \approx D^2$, gde je $D = D_{sr}$

15. Električna lokomotiva pogoni se pomoću 4 redna motora jednosmerne struje koji su paralelno vezani. Graduator napona omogućava podešavanje ulaznog napona punoupravljivog tiristorskog ispravljača od 0 do 2 kV sa koracima od 80 V. Tiristori ispravljača imaju simetrično okidanje. Omska otpornost motorne prigušnice je $12 \text{ m}\Omega$, dok je $R_a + R_p = 32 \text{ m}\Omega$. Ekvivalentna induktivnost naizmeničnog kola svedena na naponski nivo ulaza u ispravljač iznosi $L'' = 300 \mu\text{H}$. Ukoliko je polazna struja svakog od motora 500 A, odrediti prividnu, reaktivnu i aktivnu snagu na nivou kontaktnog voda, smatrajući $U_{kv,rms} = 25 \text{ kV}$. **Pri proračunima zanemariti vreme i uticaj procesa komutacije.**

Rešenje: $S=480\text{kVA}$, $Q=290\text{kVA}_r$, $P=80\text{kW}$.

16. Jednofazna električna lokomotiva 25 kV poseduje punoupravljivi tiristorski most. Karakteristike tiristora (vreme odmaranja) iziskuju ograničenje ugla paljenja na 165 stepeni. Lokomotiva se pogoni se pomoću 4 paralelno vezana motora jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom. Parametri ovih motora su $U_n = 1800 \text{ V}$, $I_n = 500 \text{ A}$, $R_a = R_p = 30 \text{ m}\Omega$, $k_e \Phi_{\max} = 9 \text{ V}/(\text{rad/s})$; smatrati $\Phi_n = \Phi_{\max}$. Graduator napona omogućuje podešavanje napona od 0 do 25 kV u koracima od 1 kV. Prenosni odnos transformatora je $m_t = 25 \text{ kV}/2 \text{ kV}$. Omska otpornost naizmeničnog kola i motorne prigušnice se mogu zanemariti, dok je $L_e = 23 \text{ mH}$. Brzina obrtanja motora od $n_{\text{ref}} = 1500 \text{ ob/min}$ odgovara $v_{\text{ref}} = 90 \text{ km/h}$. Sekundar transformatora priključen je na punoupravljivi tiristorski most sa simetričnim okidanjem tiristora. Lokomotiva pokreće kompoziciju ukupne težine 1000 t. Kompozicija se kreće trasom koja poseduje pad od 10 promila. Specifični otpori vuče iznose 4 kp/t. Odrediti stepen graduatora i ugao paljenja koji će omogućiti razmenu minimalne reaktivne snage na kontaktnom vodu pri kretanju opisanom trasom, brzinom od $v=45 \text{ km/h}$ uz primenu punog polja.

Rešenje: $i_g=10$, $\alpha = 158,86^\circ$