

**Električna vuča / Električna vozila – 3. kolokvijum  
Beograd, 02.02.2008. godine**

Prezime	ime		broj indeksa/god.			Ispit (kolokvijum) polažem: Prvi put Drugi put Treći put i ostalo		
U ćelijama ‘početak na strani’ i ‘kraj na strani’ uneti odgovarajući broj stranice vežbanke na kojoj započinje rešenje / završava se rešenje zadatka ili pitanja koji treba pregledati i oceniti. Kod zadataka koje ne treba pregledati, rubrike <i>početak</i> <i>na strani /kraj na strani</i> ostaviti prazne.								
Zadatak / pitanje:	1.	2.	3.	1.	2.			
Početak na strani								
Kraj na strani:								

Vežbanke se predaju 4 h po podeli teksta zadataka. U vreme predviđeno za rad, uračunato je vreme koje će biti utrošeno za čitanje ovog uputstva i unošenje podataka.

Po dobijanju teksta zadataka, pročitati pravila zapisana na ovom listu i potpisati se na dnu lista.

Ocenjivanje: Broj poena potreban za prolaznu ocenu određen je u skladu sa dokumentom ‘Organizacija predmeta’, dostavljenim svim studentima na početku semestra.

Numerisati stranice vežbanke u gornjem desnom uglu (neparne) / u gornjem levom uglu (parne), brojevima 1-2-3.... Popunite sve podatke u tabeli na 1. stranici vežbanke, uključujući i broj učionice/sale u kojoj polažete.

Rešavanje zadataka:

Konkretan, završni odgovor na svako podpitanje (1A, 1B...2A, 2B..) uokviriti pravougaonim ramom. Sa desne strane rama/zaokruženog rešenja zapisati odgovarajuću oznaku (1A, 1B...). Morate dati izvođenje ili proračun koji pokazuje kako ste do rešenja došli.

Predaja rada:

Svi moraju predati vežbanku i tekst zadataka sa unetim podacima i potpisom. Kada se odlučite da predate rad, ostanite na mestu, podignite ruku i sačekajte instrukcije dežurnog, koji će doći do Vašeg mesta i uzeti vežbanku i list sa zadacima.

U toku ispita:

nije moguće napuštati salu prvih 60 minuta. Dozvoljeno je imati pribor za pisanje, jednostavne ne-programabilne kalkulatore i vežbanku. U slučaju da imate pitanje ili zahtev, morate podići ruku i sačekati da Vam dežurni asistent posveti pažnju.

Rezultati ispita:

će biti istaknuti na oglasnoj tabli preko puta laboratorije 30, najkasnije 10 dana od dana održavanja ispita, kao i na sajtu masine.etf.bg.ac.yu. Tekst sa rezultatima će sadržati informacije o terminu za uvid u radove.

**Potpis kandidata:**

-----

**1. teorijsko pitanje (20 poena):**

Nacrtati električnu šemu trofaznog tranzistorskog vučnog pretvarača koji se napaja jednosmernim naponom iz kontaktnog voda.

- Na koji način se obezbeđuje naizmenični linijski napon varijabilne učestanosti i amplitude, potreban za napajanje motora?
- Kakav oblik ima fazna struja?
- Dati procenu valovitosti struje u funkciji komutacione učestanosti, napona napajanja i reaktanse rasipanja motora.

**2. teorijsko pitanje (20 poena):**

Na sekciji kontaktnog voda koji napaja jedna podstanica sistema 25 kV 50 Hz nalazi se više lokomotiva koje rekuperativno kočē.

- Šta biva sa energijom kočenja?
- Čime je ograničena maksimalna ukupna snaga kočenja?
- Odgovoriti na ista pitanja za slučaj da se lokomotiva sistema 3 kV JSS napaja iz udaljene podstanice, pri čemu je napon na priključcima podstanice konstantan (rekuperativna podstanica 3 kV JSS sa regulacijom napona).

**3. teorijsko pitanje (20 poena):**

a) Nacrtati električnu šemu monofazno napajanog punoupravljivog tiristorskog ispravljača sa 4 tiristora koja se simetrično okidaju, napajanog iz idealnog naponskog izvora preko reaktanse  $X = L_e \omega$  koja se nalazi u naizmeničnom kolu. Ispravljač je opterećen strujnim ponorom. Izvesti i nacrtati oblik ispravljenog napona kao i oblik struje u naizmeničnom kolu, uzimajući pri tome u obzir proces komutacije.

b) Izračunati srednju vrednost ispravljenog napona u funkciji struje opterećenja i ugla paljenja. Izračunati prividnu, aktivnu i reaktivnu snagu izvora naizmeničnog napona.

### **1. zadatak (9+5+6=20 poena):**

Jednofazna električna lokomotiva sistema 25 kV pogoni se pomoću četiri paralelno vezana redna motora jednosmerne struje, čiji su parametri:  $U_n = 1800$  V,  $I_n = 500$  A,  $R_a = R_p = 0,02$   $\Omega$ ,  $k_m \Phi_{\max} = 8$  Nm/A. Pri struji motora većoj od 400 A, magnetno kolo na putu pobudnog fluksa je u stanju dubokog zasićenja i fluks se može smatrati konstantnim,  $\Phi_p = \Phi_{\max}$ . Lokomotiva poseduje graduator napona koji omogućuje podešavanje napona od 0 do 25 kV, u koracima od  $\Delta U' = 1$  kV. Graduator je povezan sa primarom transformatora prenosnog odnosa  $m_t = 25$  kV / 2 kV. Omska otpornost naizmjeničnog kola se može zanemariti. Ekvivalentna induktivnost naizmjeničnog kola svedena na sekundarnu stranu (2 kV) transformatora zavisi od stepena graduatora i ta se zavisnost može opisati kao  $L''_e = (0,4 - i_g \cdot 0,01)$  mH. Prenosni odnos i prečnik pogonskih točkova su takvi da ugaonoj brzini obrtanja motora od  $n_{\text{ref}} = 1500$  ob/min odgovara brzina lokomotive od  $v_{\text{ref}} = 90$  km/h. Sekundar transformatora priključen je na punoupravljivi tiristorski most sa simetričnim okidanjem tiristora. Ispravljeni napon dovodi se na paralelnu vezu motora preko prigušnice u jednosmernom kolu koja umanjuje talasnost struje indukta i čiji je omski otpor  $R_l = 16$  m $\Omega$ . Lokomotiva je teška  $G_a = 120$  tona, dok je masa vučenog dela voza  $G_v = 880$  tona. Koeficijent korekcije obrtnih masa vučnog i vučenih vozila smatrati jednakim  $\epsilon = 0,1$ . Lokomotiva se nalazi u režimu polaska ( $v = 0$ ) ostvarujući ubrzanje od  $a_{\text{pol}} = 0,05$  m/s<sup>2</sup>, na ravnoj i pravoj trasi sa konstantnim stalnim otporima vuče u iznosu od  $\Sigma f_{\text{ot}} = 8$  kp/t. Za opisani radni režim odrediti:

- odrediti stepen graduatora  $i_{g,\text{pol}}$  i ugao paljenja tiristora  $\alpha_{\text{pol}}$ , ako su te veličine dejstvom regulatora podešen na vrednosti koje daju minimalnu reaktivnu snagu.
- efektivnu vrednost struje u kontaktnom vodu,  $I_{k,\text{pol}}$ , gubitke snage u svim motorima  $P_{\gamma,\text{mot}}$  i prigušnici  $P_{\gamma,l}$ . Pri izračunavanju efektivne vrednosti struje kontaktnog voda zanemariti promenu struje sekundara vučnog transformatora koja je posledica komutacije.
- Kada se u nastavku procesa ubrzavanja graduator bude prebacivao sa 6. na 7. otecep, za koliko se tada mora, istovremeno sa pomeranjem klizača graduatora, povećati i ugao paljenja,  $\alpha_{6,7}$ . Koliku brzinu,  $v$  [km/h], ima kompozicija u tom trenutku.

### **2. zadatak (3+10+7=20 poena):**

Kompozicija opisana u prethodnom zadatku se kreće pravom trasom koja poseduje pad od  $i_{\text{pad}} = -15$  ‰ i pri tome rekuperativno koči. Stalni otpori kretanju su nepromenjeni ( $\Sigma f_{\text{ot}} = 8$  kp/t). Karakteristike tiristora (vreme odmaranja) iziskuju ograničenje ugla paljenja na  $\alpha_{\max} = 150^\circ$ . Pobudni namotaji sva četiri motora se napajaju iz nezavisnog tiristorskog ispravljača koji omogućava regulaciju pobudne struje. Minimalna vrednost pobudne struje koja se u režimu rekuperativnog kočenja sme dozvoliti je ona koja će oslabiti polje motora za najviše 40% od njegove maksimalne vrednosti.

- Nacrtati električnu šemu opisane lokomotive u režimu rekuperativnog kočenja.
- Odrediti maksimalnu brzinu,  $v_{\max}$ , kojom se može kretati lokomotiva na opisanom padu.
- U jednom trenutku su uglovi paljenja tiristora iznosili  $\alpha_1 = \alpha_3 = 100^\circ$ , a  $\alpha_2 = \alpha_4 = \alpha_{\max}$ , graduator je bio na  $i_g = 15$  otecpu, vozilo se kretalo brzinom od  $v = 45$  km/h, a fluks je posedovao maksimalnu vrednost,  $\Phi_p = \Phi_{\max}$ . Odrediti da li u opisanom radnom režimu lokomotiva ubrzava, usporava ili se kreće konstantnom brzinom. Ako je lokomotiva u režimu promene brzine, odrediti njeno ubrzanje,  $a_\uparrow$  [m/s<sup>2</sup>], ili usporenje,  $a_\downarrow$  [m/s<sup>2</sup>].

**Detaljni odgovori na sva teorijska pitanja se mogu pronaći u skripti sa predavanja, koja je dostupna studentima na internet stranici predmeta <http://vozila.efg.bg.ac.yu/>**

**U tekstu koji sledi će biti prikazana samo skica zahtevanog odgovora.**

### **1. teorijsko pitanje – odgovor:**

Odgovor na ovo pitanje je dat u skripti na stranama 214-225.

Trofazni tranzistorski vučni pretvarač je prikazan na strani 214. Pošto se pretvarač napona napaja iz mreže jednosmernog napona, na ulazu pretvarača treba da se nalazi, redom, odgovarajući LC filter, čoper podizač napona (napon jednosmernog voda značajno varira, a invertoru je neophodno stabilno napajanje jednosmernim naponom) i kondenzator u jednosmernom međukolu.

**a)**

Treba navesti da se promenljiva amplituda i učestanost napona dobija primenom impulsno širinski modulisanog napona na fazne priključke motora. Neophodno je objasniti da se to postiže uključivanjem prekidača u granama invertora u ritmu kojim komanduje odgovarajući regulacioni podsistem. Neophodno je navesti izraze za vremena uključivanja prekidača u granama mosta u kojima će figurisati modulacioni parametar  $A$ . Polazeći od spektralnog sastava signala koji se vodi na priključke motora, neophodno je objasniti kako zašto motor dominantno reaguje na niskofrekventnu komponentu osnovnog harmonika.

**b)**

Kao odgovor je neophodno nacrtati talasni oblik faznog napona i struje na vremenskom intervalu koji odgovara periodu prekidanja.

**c)**

Polazeći od zamenske šeme jedne faze statorskog namotaja, prikazane na strani 224, neophodno je izvesti izraz za trenutnu vrednost struje u toku jedne prekidačke periode. U izvođenju usvojiti da je indeks modulacije jednak 0,5. U tim uslovima će se dobiti maksimalni strujni ripl. Treba uočiti da je amplituda ripla proporcionalna naponu jednosmernog međukola, a opada sa porastom prekidačke učestanosti i ekvivalentne induktivnosti rasipanja motora.

### **2. teorijsko pitanje – odgovor:**

**a)**

Glavni element podstanica jednofaznog sistema 25 kV, 50 Hz je visokonaponski transformator, sa visokim naponom od 110 kV na primarnoj strani i naponom od 25 kV na sekundaru. Stoga su te podstanice u mogućnosti da vrše transfer aktivne snage u oba smera. Zbog toga se energija rekuperativnog kočenja više lokomotiva vraća u elektroprivrednu mrežu.

**b)**

Maksimalna ukupna snaga kočenja svih lokomotiva je ograničena porastom napona na pantografu pojedinačnih lokomotiva, pri čemu je u najkritičnijem položaju najudaljenija lokomotiva. Naime usled nenulte podužne impedanse kontaktnog voda, dolazi do povećanog pada napona na kontaktnoj mreži. Taj napon se vektorski sabira sa naponom sa izlaz podstanice, uzrokujući povišenje napona na pantografu. Međunarodni propisi dozvoljavaju uvećanje ovog napona za maksimalno 10 %, dok je za pruge većih brzina taj kriterijum još stroži. U slučaju većeg prenapona na pantografu, u cilju zaštite električnih sklopova, reagovalaće odvodnik prenapona montiran na krovu lokomotive.

**c)**

Reverzibilnost podstanica JSS nije česta pojava, posebno kada se radi o starijim podstanicama. Međutim u novije vreme se grade reverzibilne podstanice jednosmernog sistema napajanja. U slučaju kada rekuperativno koče lokomotive koje se napajaju iz ovog sistema, javlja se još veći problem vezan za porast napona na kontaktnom vodu i pantografu lokomotive. Naime, napon koji rekuperirana struja stvara na podužnom otporu kontaktne mreže se algebarski sabira sa naponom sa izlaza podstanice. Usled toga će on brže dostići dozvoljenu maksimalnu vrednost. Iz tog razloga su međunarodni propisi koje definišu maksimalni porast napona nešto blaži, dozvoljavajući njegov porast do 20%.

### **3. teorijsko pitanje – odgovor:**

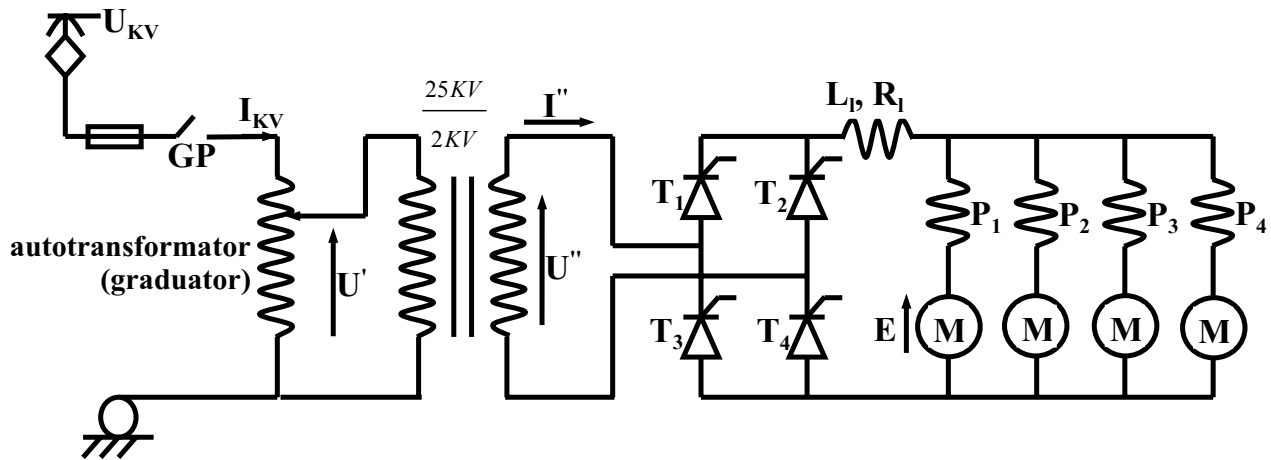
**a)**

Odgovor na ovo pitanje je dat u skripti na stranama 188-191.

Najpre je neophodno nacrtati traženu električnu šemu. Ona je u skripti prikazana na strani 188. Polazeći od prikazane šeme, treba nacrtati vremenski dijagram napona na izlazu ispravljača. Kao baza za crtanje ovog dijagrama treba da posluži vremenski dijagram prostoperiodičnog napona na sekundaru transformatora. Na tom vremenskom dijagramu treba označiti ugao paljenja tiristora, ako i u kom vremenskom intervalu vodi koja komponenta sa električne šeme. Izračunavanje srednje vrednosti treba izvršiti pomoću odgovarajućeg integrala, na vremenskom periodu od  $\pi/\omega$  ili na ugaonom intervalu od  $0-\pi$  radijana. Pri tome, u proračun treba uzeti i "gubitak napona" koji je posledica vremenskog intervala komutacije u kom vode 3 od 4 prekidača mosta. do izraza za aktivnu snagu se najlakše dolazi polazeći od pretpostavke da je most bez gubitaka, usled čega je snaga aktivna snaga na "jednosmernoj" strani kola (proizvod srednje vrednosti napona i struje strujnog ponora) jednaka aktivnoj snazi naponskog izvora. Za izračunavanje prividne snage neophodno je izračunati efektivnu vrednost struje sekundara vučnog transformatora, koju zatim treba pomnožiti sa efektivnom vrednošću sekundarnog napona. Reaktivnu snagu treba izračunati kao srednju vrednost trenutne snage dobijene množenjem struje i fazno pomerenog napona (fazni pomeraj za  $1/4$  periode napona).

## 1. zadatak – rešenje:

a)



Polazak lokomotive je okarakterisan razvijanjem ukupne vučne sile u iznosu od:

$$F_v [N] = \left[ \sum f_{ot} \left[ \frac{kp}{t} \right] + 102(1 + \varepsilon) a \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right] (G_a [t] + G_v [t]) g = 133,5 \text{ kN}.$$

Udeo svakog od motora u razvijanju opisane vučne sile iznosi:

$$F_{v,1} [N] = \frac{F_{v,1} [N]}{4} = 33,38 \text{ kN}.$$

Iz jednakosti snaga translacionog i rotacionog kretanja (zanemarujući gubitke u prenosniku), određuje se vrednost elektromagnetnog momenta koji razvija svaki od paralelno spregnutih motora:

$$M_{em,1} = F_{v,1} \frac{v_{ref} \left[ \frac{km}{h} \right]}{n_{ref} \left[ \frac{ob}{min} \right]} \frac{30}{\pi} \frac{1}{3.6} = 5313 \text{ Nm}.$$

Iz izraza za elektromagnetni moment rednog motora, određuje se vrednost struje indukta motora,

$$M_{em,1} = k_m \Phi_{max} I_{a,1} \Rightarrow I_{a,1} = 664 \text{ A},$$

pomoću koje se izračunava srednja vrednost napona na izlazu iz punoupravljivog tiristorskog mosta:

$$U_i = R_1 \cdot 4 \cdot I_{a,1} + I_{a,1} (R_a + R_p) = 69,1 \text{ V},$$

Uočiti da je pri određivanju vrednosti rotorske struje usvojena pretpostavka da je fluks jednak svojoj maksimalno vrednosti. Kako je izračunata struja veća od 400A, pretpostavka je opravdana.

Ekvivalentna reaktansa naizmeničnog kola svedena na sekundarnu stranu vučnog transformatora, 2 kV, ima vrednost:

$$X_c'' = \omega L_c'' = 100 \cdot \pi \cdot (0,4 - i_g \cdot 0,01) \text{ mH} = (40\pi - i_g \cdot \pi) \text{ m}\Omega.$$

U cilju određivanja stepena graduatora i ugla paljenja, polazi se od izraza za srednju vrednost napona na izlazu iz punoupravljivog tiristorskog mosta:

$$U_i = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} i_g \Delta U'' \cos \alpha - \frac{2X_c''}{\pi} \cdot 4 \cdot I_{a,1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} i_g \Delta U'' \cos \alpha - \frac{2(40\pi - i_g \cdot \pi)}{1000\pi} \cdot 4 \cdot I_{a,1} = i_g \left( \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \Delta U'' \cos \alpha + \frac{I_{a,1}}{125} \right) - \frac{8I_{a,1}}{25}$$

gde je  $\Delta U'' = 2/25 \text{ kV} = 80 \text{ V}$ , napon na sekundaru vučnog transformatora koji odgovara jednom stepenu graduatora.

Pri gruboj regulaciji napona, za  $\alpha = 0^\circ$  dobija se vrednost za stepen graduatora  $i_g$ ,

$$i_{g,pol} = \frac{\left[ U_i + \frac{8I_{a,1}}{25} \right]}{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \Delta U'' + \frac{I_{a,1}}{125}} = 3,64 \Rightarrow i_{g,pol} = 4.$$

Pri finoj regulaciji napona, za usvojenu vrednost stepena graduatora  $i_{g,pol} = 4$ , računa se ugao paljenja tiristora  $\alpha_{pol}$ :

$$\cos \alpha_{\text{pol}} = \frac{\left[ U_i + \frac{8I_{a,1}}{25} - \frac{i_g I_{a,1}}{125} \right]}{i_{g,\text{pol}} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \Delta U''} = 0,904 \Rightarrow \alpha_{\text{pol}} = 25,31^\circ.$$

**b)**

Efektivna vrednost struje sekundara je jednaka je struji na izlazu iz ispravljača, kojom se napajaju paralelno spregnuti redni motori iznosi:

$$I'' = I_i = 4I_{a,1} = 2656 \text{ A}.$$

Svođenjem na naponski nivo primara vučnog transformatora ova struja ima vrednost:

$$I' = I'' \cdot \frac{2}{25} = 212,5 \text{ A},$$

dok je efektivna vrednost struje kontaktnog voda:

$$I_{\text{KV}} = I' \cdot \frac{i_g}{25} = 34 \text{ A}.$$

$$\text{Gubici snage u motoru iznose: } P_{\gamma,\text{mot}} = 4(R_a + R_p) I_{a,1}^2 = 70,5 \text{ kW},$$

$$\text{a u motornoj prigušnici: } P_{\gamma,1} = R_1 (4 I_{a,1})^2 = 112,9 \text{ kW}$$

**c)**

Da bi se nastavilo povećavanje napona u trenutku kada se graduator nalazi na šestom stepenu i dostignuta je maksimalna vrednost ispravljenog napona za ovaj stepen ( $\alpha = 0$ ), treba izvršiti komutaciju graduatora na viši stepen, ali tako da se simultano promeni i ugao paljenja tiristorskog mosta i tako očuva srednja vrednost napona na izlazu ispravljača:

$$6 \left( \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \Delta U'' + \frac{I_{a,1}}{125} \right) - \frac{8I_{a,1}}{25} = 7 \left( \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \Delta U'' \cos \alpha_{6,7} + \frac{I_{a,1}}{125} \right) - \frac{8I_{a,1}}{25} \Rightarrow \cos \alpha_{6,7} = \frac{6 \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \Delta U'' - \frac{I_{a,1}}{125}}{7 \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \Delta U''} = 0,847 \Rightarrow \alpha_{6,7} = 32,11^\circ$$

Srednja vrednost napona na izlazu ispravljače će u tom trenutku iznositi:

$$U_i = 6 \left( \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \Delta U'' \cos 0 + \frac{I_{a,1}}{125} \right) - \frac{8I_{a,1}}{25} = 251,5 \text{ V}.$$

Elektromotorna sila motora tada iznosi:

$$E_a = U_i - 4R_1 I_{a,1} - I_{a,1} (R_a + R_p) = 182,4 \text{ V}.$$

Njoj odgovara brzina rotora od:

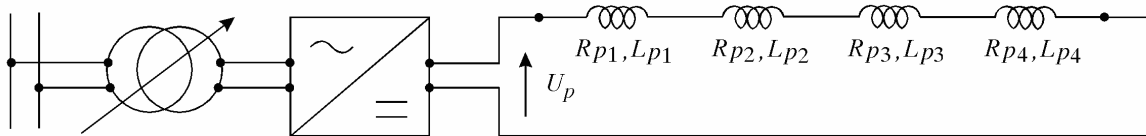
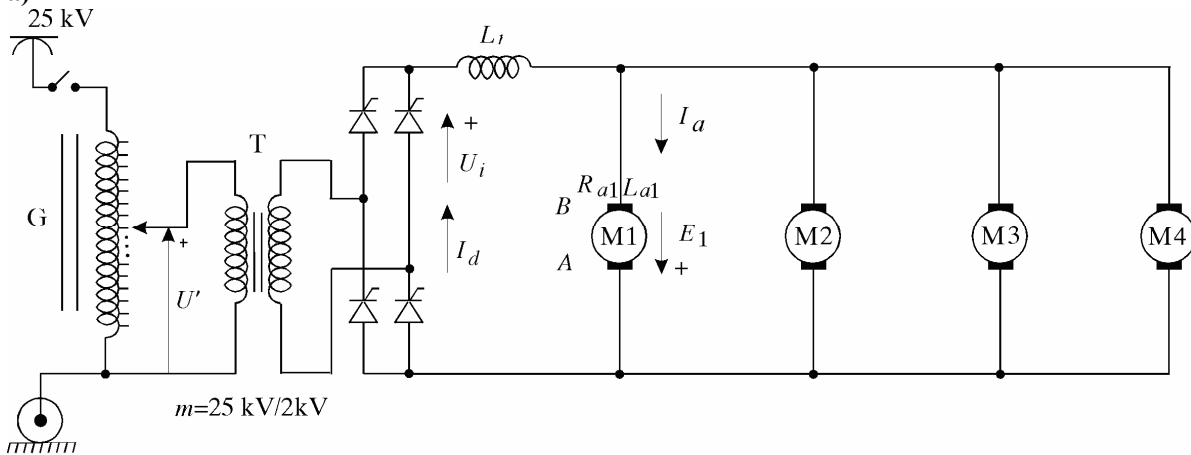
$$\omega_m = \frac{E}{k_c \Phi_{\text{max}}} = 22,8 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \Rightarrow n_m = \omega_m \frac{30}{\pi} = 217,7 \frac{\text{ob}}{\text{min}}.$$

Stoga će brzina vozila biti:

$$v = n_m \frac{v_{\text{ref}}}{n_{\text{ref}}} = 13,06 \text{ km}.$$

## 2. zadatak – rešenje:

a)



b)

Da bi se izračunala sila otpora u opisanom režimu kretanja, primenjuje se opšta jednačina vuče:

$$F_v [\text{N}] = F_{ot} [\text{N}] = (G_a [t] + G_v [t]) g \left[ \sum f_{ot} + i_{pad} \right] = -68670 \text{ N}.$$

Vrednost vučne sile je negativna jer se lokomotiva kreće na padu i njeni motori rade u režimu rekuperativnog kočenja (generatorski režim rada), energija se vraća u mrežu, zahvaljujući punoupravljujućem tiristorskom mostu.

Iz jednakosti snaga translatornog i rotacionog kretanja (zanemarujući gubitke u prenosniku), određuje se vrednost elektromagnetnog momenta koji razvija svaki od paralelno spregnutih motora:

$$M_{em,1} = \frac{F_v}{4} \frac{v_{ref} \left[ \frac{\text{km}}{\text{h}} \right]}{n_{ref} \left[ \frac{\text{ob}}{\text{min}} \right]} \frac{30}{\pi} \frac{1}{3,6} = -2732 \text{ Nm}.$$

Maksimalna brzina u režimu rekuperativnog kočenja se ima pri najvišem stepenu graduatora ( $i_g=25$ ) i simetričnom okidanju tiristora sa maksimalnim dozvoljenim uglom ( $\alpha=\alpha_{max}$ ) – videti predavanja i poslednji zadatak sa računskih vežbi. U takvim uslovima će vrednost reaktanse naizmeničnog kola iznositi:

$$X''_{e,25} = \omega L''_{e,25} = 100 \cdot \pi \cdot (0,4 - 25 \cdot 0,01) \text{ mH} = 47,12 \text{ m}\Omega.$$

Postavlja se pitanje, koliku vrednost pobudnog fluksa treba imati, da bi se postigao režim sa maksimalnom brzinom?

Polazeći od jednakosti usmerenog napona na izlazu ispravljača (pogledati poslednji zadatak sa računskih vežbi), određuje se izraz za brzinu rotora u režimu kočenja:

$$-\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot 80 \cdot \cos \alpha_{max} + \frac{2}{\pi} X''_{e,25} 4I_{a,1} = E_a - (R_a + 4R_l) I_{a,1}$$

tj.

$$-\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot 80 \cdot 25 \cdot \cos \alpha_{max} + \frac{|M_{em,1}|}{k_m \Phi_p} \left( \frac{8}{\pi} X''_{e,25} + R_a + 4R_l \right) = k_e \Phi_p \omega \Rightarrow \omega = \frac{-\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot 80 \cdot 25 \cdot \cos \alpha_{max} + \frac{|M_{em,1}|}{k_m \Phi_p} \left( \frac{8}{\pi} X''_{e,25} + R_a + 4R_l \right)}{k_e \Phi_p}$$

Iz poslednjeg izraza se uočava da se smanjenjem fluksa povećava vrednost brzine. Dakle, maksimalna brzina kočenja se postiže sa minimalnim dozvoljenim fluksom. Prema tekstu zadatka, minimalna vrednost fluksa pobude motora iznosi:

$$k_m \Phi_{p,min} = k_e \Phi_{p,min} = 0,6 k_m \Phi_{max} = 4,8 \frac{\text{Vs}}{\text{rad}}.$$

Maksimalna ugaona brzina rotora će, stoga, biti:

$$\omega_{\max} = \frac{-\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot 80 \cdot 25 \cdot \cos \alpha_{\max} + \frac{|M_{\text{em},1}|}{k_m \Phi_{p,\min}} \left( \frac{8}{\pi} X''_{e,25} + R_a + 4R_l \right)}{k_e \Phi_{p,\min}} = 349,1 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \Rightarrow n_{\max} = \frac{30}{\pi} \omega_{\max} = 3334 \frac{\text{ob}}{\text{min}}.$$

Maksimalna brzina kompozicije iznosi:

$$v_{\max} = n_{\max} \frac{v_{\text{ref}}}{n_{\text{ref}}} = 200 \frac{\text{km}}{\text{h}}.$$

c)

U opisanom režimu će vrednost elektromotorne sile motora iznositi:

$$E_a = k_e \Phi_{\max} \omega = k_e \Phi_{\max} n \frac{\pi}{30} = k_e \Phi_{\max} v \frac{n_{\text{ref}}}{v_{\text{ref}}} \frac{\pi}{30} = 628 \text{ V}.$$

Kako je graduator na 15. otepu, vrednost reaktanse naizmeničnog kola će iznositi:

$$X''_{e,15} = \omega L''_{e,15} = 100 \cdot \pi \cdot (0,4 - 15 \cdot 0,01) \text{ mH} = 78,5 \text{ m}\Omega.$$

Srednja vrednost napona na izlazu ispravljača se može zapisati kao:

$$U_i = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot 80 \cdot i_g \cdot (\cos \alpha_{\max} + \cos \alpha) - \frac{1}{\pi} X''_{e,15} 4 I_{a,1} = -E_a + (R_a + 4R_l) I_{a,1}.$$

Odavde se može izraziti i izračunati armaturna struja:

$$I_{a,1} = \frac{\frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot 80 \cdot i_g \cdot (\cos \alpha_{\max} + \cos \alpha) + E_a}{\frac{4}{\pi} X''_{e,15} + R_a + 4R_l} = 360,8 \text{ A}.$$

Moment kočenja koji se ima na osovini svakog od motora će iznositi

$$M_{k,1} = k_m \Phi_{\max} I_{a,1} = 2886,4 \text{ Nm}.$$

Stoga je sila kojom lokomotiva koči celu kompoziciju:

$$F_k = 4M_{k,1} \frac{n_{\text{ref}} \left[ \frac{\text{ob}}{\text{min}} \right]}{v_{\text{ref}} \left[ \frac{\text{km}}{\text{h}} \right]} \frac{\pi}{30} 3,6 = 72,54 \text{ kN}.$$

Kako je sila kočenja veća od apsolutne vrednosti sile otpora na ovoj trasi (68670 N), to će onda vozilo usporavati, a vrednost usporjenja će biti:

$$a_{\downarrow} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = \frac{F_k - |F_{\text{ot}}|}{102(1 + \varepsilon)(G_a [\text{t}] + G_v [\text{t}])g} = 0,0035 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$