

Računske vežbe iz električnih vozila

Jednačina vuče i mehanički sistem električnog vozila:

1. Zadatak

Teretni voz ukupne mase $G_a + G_v = 1000$ t, od čega je masa lokomotive $G_a = 80$ t, zaustavljen je na signalu brdske pruge, uspona $i = 10$ ‰ i krivine poluprečnika $R = 300$ m. Sve osovine lokomotive su pogonske. Voz treba pokrenuti i provesti kroz stanicu. Uz pretpostavku da su u toku procesa ubrzavanja stalni otpori kretanju konstantni i jednaki $f_{ot} = 2,2$ kp/t, i da adhezione prilike i regulacione karakteristike lokomotive omogućavaju lokomotivi razvijanje konstantne vučne sile koja odgovara koeficijentu adhezije $\xi_a = 0,25$, odrediti:

- brzinu prolaska voza kroz stanicu udaljenu od signala 300 m i vreme vožnje od signala do stanice, ako se u trenutku prolaska kroz stanicu kompozicija još uvek ubrzava.
- utrošenu električnu energiju u posmatranom vremenskom intervalu od signala do stanice, ako je stepen korisnog dejstva lokomotive $\eta = 0,8$.

Ukupne otpore u krivini računati po empirijskom obrascu: $f_{kr} \left[\frac{kp}{t} \right] = \frac{650}{R[m] - 55}$.

2. Zadatak

Lokomotiva mase 80 t vuče voz od 1600 t. Koeficijent adhezije se menja prema obrascu:

$$\xi_a \left[\frac{kp}{kg} \right] = \frac{\xi_{amax}}{1 + 0,01 \cdot v [km/h]}, \xi_{amax} = 0,35 .$$

Stalne otpore vuče računati po obrascu: $f_{ot} \left[\frac{kp}{t} \right] = 2,2 + 0,0003 \cdot \left(v \left[\frac{km}{h} \right] \right)^2$.

- Kolika je snaga na obodu točka lokomotive ako se kompozicija kreće na usponu od 5 ‰ konstantnom brzinom uz maksimalno iskorišćenje adhezije?
- Koliko iznosi maksimalna vučna snaga definisana uslovima adhezije?
- Koliki je maksimalni uspon koji kompozicija može da savlada uz navedenu nenultu vrednost stalnih otpora vuče?
- Koliko je maksimalno polazno ubrzanje? Koeficijent korekcije mase je $\varepsilon = 15$ %.

3. Zadatak

Na padu od $i=40\text{‰}$ nalazi se zakočena električna lokomotiva. Lokomotiva poseduje šest pogonskih osovina raspoređenih u tri obrtna postolja. Posle otpuštanja kočnica na obrtnim postoljima, lokomotiva je krenula nizbrdo. Usled kvara kočionog sistema, kolski slogovi trećeg obrtnog postolja ostaju zakočeni, tako da se ne okreću. Osim trenja blokiranog točka o šine, ostali stalni otpori vuče mogu zanemariti. Za koeficijent trenja pri klizanju usvojiti vrednost $\mu_{kl} = 0,05$. Prešavši put od $l=1\text{km}$, lokomotiva nailazi na horizontalnu deonicu, pri čemu osovine trećeg obrtnog postolja i dalje ostaju zakočene i ne okreću se. Nailaskom na horizontalnu deonicu, započinje i kočenje lokomotive, sa namerom da se ista zaustavi. Koeficijent korekcije obrtnih masa ima vrednost od $\varepsilon=0,2$ dok se koeficijent adhezije može smatrati konstantnim i jednakim vrednosti $\xi_a = 0,2$. Izračunati:

- a) dužinu kočionog puta, l_k , pri srednjem usporenju od $a = 0,7 \text{ m/s}^2$.
- b) najmanju moguću dužinu kočionog puta, l_{kmin} .

4. Zadatak

Automobil mase 2000 kg ima u sebi SUS motor zanemarive inercije. Posmatrani automobil je prepravljen tako da ima električni pogon sa asinhronim motorom snage 50kW pri čemu se postižu iste mehaničke karakteristike kao u originalnom sistemu. Momenat inercije rotora pogonskog motora iznosi $J_m = 0.45 \text{ kgm}^2$, svakog od 4 točka $J_t = 0.3 \text{ kgm}^2$, a osovine $J_o = 0.1 \text{ kgm}^2$. Maksimalan momenat motora je 20 Nm i pretpostavlja se da je dostupan do brzine od 150 km/h kada počinje da opada po zakonu $1/v$. Prenosni mehanizam koji je direktno spregnut sa vratilom motora ima prenosni odnos $i = 100$. Odrediti minimalno vreme potrebno da vozilo dostigne 100 km/h ako je:

- a) prečnik točkova 0,75 m i ako su otpori kretanju jednaki $f_{ot}[\text{kp/t}] = 13,04 \cdot v[\text{m/s}]$
- b) prečnik točkova 0,5 m i ako se otpori kretanju jednaki $f_{ot} [\text{N}] = 53.33 \cdot v[\text{km/h}]$.
- c) uporediti vreme koje je potrebno za dostizanje brzine od 100 km/h pre i posle adaptacije koristeći parametre sistema date pod b
- d) uporediti energije obrtnih masa automobila pre i posle adaptacije

Putni dijagrami:

1. Zadatak

Manipulaciono vozilo (viljuškar) pokreće nezavisno pobuđena MJS koji ima gubitke u armaturnom namotaju dok se ostali gubici mogu zanemariti. Tokom kretanja postoji samo inercioni otpor. Prenosni odnos mehaničkog sistema jednak je i_p , a prečnik točkova je D . Pretpostavljajući da je profil brzine trapeznog oblika sa jednakim promenama brzine pri zaletanju i kočenju, kao i to da u datom vremenskom intervalu T treba preći zadati put L , odrediti optimalnu promenu brzine, koja rezultuje minimalnim utroškom energije.

2. Zadatak

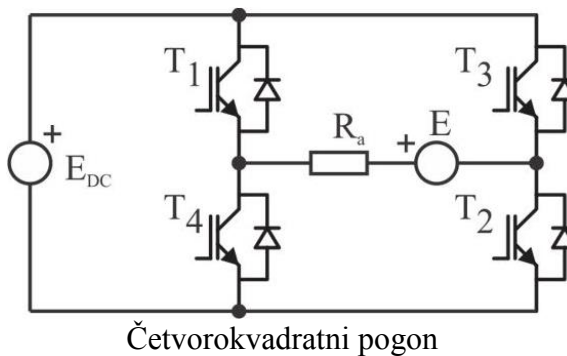
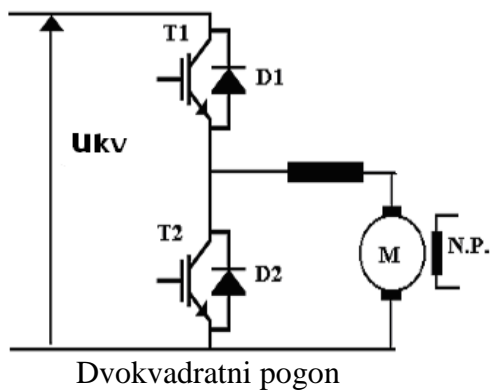
Teretnu kompoziciju mase 1000t vuče diodna lokomotiva zanemarivih gubitaka snage i faktora snage bliskog jedinici napajana preko kontaktnog voda napona $U_{KV} = 25$ kV. Vožnja se obavlja na trasi koja u prvoj sekciji dužine $L/2$ ima uspon od i , u drugoj sekciji dužine $L/4$ ima pad od $2 \cdot i$ dok je treća sekcija dužine $L/4$ ravna. Specifični otpori pri kretanju na ravnoj trasi iznose $f = 2$ kp/t dok je $i = 0.01$. Trajanje vožnje u jednom smeru je $2T$, nakon čega vozilo u krajnjim stanicama čini pauzu trajanja T , a potom kreće istom trasom nazad. Smatrati da je brzina kretanja $v = 12$ m/s konstantna, a procesi ubrzanja i kočenja veoma kratki. Nacrtati putne dijagrame i odrediti termički ekvivalent struje kontaktnog voda za jedan ciklus vožnje.

Vučni sistem električnih vozila:

1. Zadatak (tranzistorski čoper)

Vozilo mase $G = 5t$ se pokreće pomoću vučnog motora jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom. Armaturni namotaj motora otpornosi $R_a = 1\Omega$ se napaja iz tranzistorskih čopera. Pobuda motora se održava na nominalnoj vrednosti. Kada se motor obrće ugaonom brzinom od $n_{ref} = 2000$ ob/min, vozilo se kreće brzinom od $v_{ref} = 50$ km/h. Ispitivanjem u laboratoriji pri ispitnom naponu od $U_{AB,0} = 700V$, struji od $I_{a,0} = 30A$, sa nominalnom pobudnom strujom i u motornom režimu rada, izmerena je brzina obrtanja od $n_0 = 1500$ ob/min. Napon kontaktnog voda je $U_{kv} = 700V$. Otpori kretanju su konstantni i iznose $\Sigma f_{ot} = 25$ kp/t. Padovi napona na prekidačima i termogenom otporu motorne prigušnice se mogu zanemariti. Učestanost rada čopera iznosi $f = 5$ kHz, a zbirna induktivnost motora i motorne prigušnice iznosi $L_{\Sigma} = 10$ mH.

- Ako se motor napaja iz dvokvadratnog čopera odrediti struju motora $I_{a,1}$, napon motora $U_{AB,1}$ i indeks modulacije čopera m_1 pri vožnji na ravnoj trasi brzinom od $v_1 = 25$ km/h.
- Ako pri $R_a = 0\Omega$, indeksu modulacije $m = 0.5$ i zakočenom rotoru valovitost struje ΔI iznosi 10%, nacrtati talasne oblike struja za sva četiri elementa dvokvadratnog čopera na vremenskom intervalu jednakom periodu rada čopera T .
- Tokom vožnje na nizbridici nagiba 30‰, motor se napaja iz četvorokvadrantnog čopera. Vozilo počinje da usporava, u početnom trenutku sa $0.1m/s^2$, održavajući brzinu na 30 km/h sa ciljem da se na opisanoj trasi zaustavi. Odrediti indeks modulacije u početnom i krajnjem trenutku kočenja.



2. Zadatak (4 motora osnovno - tramvaj)

Tramvaj sa četiri paralelno vezana vučna redna motora jednosmerne struje se na kontakti vod povezuje preko promenljivog otpora. Zbir omske otpornosti pobudnog i armaturnog namotaja svakog motora iznosi $R_a + R_p = 0,6 \Omega$. Prenosni odnos mehaničkog sistema iznosi $k_p = 15.2$ rad/m. Tramvaj se kreće na usponu konstantnom brzinom od 15km/h sa otporima pri vuči u iznosu od 11000 N. Parametri prikazani u tabeli dobijeni su tokom ispitivanja mašine sa naponom od 550V bez korišćenja rednih otpornika i otpornika za šantiranje polja.

M [Nm]	70	$M_n = 180$	320	475	550
n [ob/min]	1600	$n_n = 1100$	880	750	700
I [A]	20	$I_n = 40$	60	80	90

- Odrediti napon na motorima i ukupnu struju paralelne veze motora ako je $R_s = 0\Omega$.
- Uz pretpostavku da je $a_{pol} \approx 0m/s^2$ i $U_{AB} = 550V$ odrediti zavisnost snage gubitaka na R_s u funkciji od brzine tramvaja na zadatoj trasi i vrednost R_s u režimu polaska.
- Neka su tri vučna motora dekuplovana, dok preostali motor radi u nominlanom režimu rada. Odrediti obrtnu brzinu aktivne mašine nakon priključenja otpornika $R = 0,8 R_p$ paralelno pobudnom namotaju.
- Neka se umesto rednog otpornika postavi motorna prigušnica (parametara $R_l = 0,03\Omega$ i $L_l \gg L_a$) i tranzistorski leg (parametri prekidača $V_D = 1,1V$ i $V_T = 1,5V$). Kolika se maksimalna brzina bez slabljenja polja može postići na trasi gde je $F_v = 1064N$?
- Sa kojom učestanošću radi čoper pri polasku tramvaja ako je struja polaska svakog motora $I_a = 90$ A. Minimalno vođenje tranzistora je $t_{on(min)} = 0,55$ ms, $f = 250Hz$.

3. Zadatak (4 motora napredno - voz)

Lokomotiva mase 80t, nominalne snage 4MW vuče vagone ukupne težine 720t. Napon kontaktnog voda $U_{KV} = 25$ kV, 50 Hz, se dovodi na graduator koji obezbeđuje podešavanje primarnog napona izolacionog transformatora prenosnog odnosa 25 kV / 2 kV. Na sekundar transformatora povezan je ispravljač koji preko motorne prigušnice ($L_1 \rightarrow \infty$, $R_1 = 0,01 \Omega$) napaja 4 paralelno vezana redna motora jednosmerne struje parametara: $U_{nom} = 1500V$, $I_{nom} = 500A$, $R_a = R_p = 30m\Omega$, $K_e \Phi_{nom} = 9Vs/rad$. Pri struji motora većoj od 200A magnetno kolo na putu pobudnog fluksa je u stanju dubokog zasićenja i fluks se može smatrati konstantnim, $\Phi = \Phi_{max}$. Ekvivalentna reaktansa u naizmeničnom kolu iznosi 0.1 [p.u.], nezavisno od stepena graduatora, dok se omska otpornost naizmeničnog kola zanemaruje. Prenosni odnos mehaničkog sistema iznosi $k_p = 6.283$ rad/m. Voz se kreće konstantnom brzinom ravijajući ukupnu vučnu silu od $F_v = 100000$ N.

- Neka su prečnici točkova koji su spregnutih sa motorima M2, M3 i M4 međusobno jednaki ($D_2 = D_3 = D_4$) dok je prečnik D_1 za 1% veći od ostalih. Odrediti rotorske struje svih motora za režim $v = 50$ km/h.
- Neka se koristi graduator sa 43 koraka i diodni ispravljač pri kretanju na opisanoj trasi brzinom bliskoj 8m/s. Odrediti stepen graduatora, tačnu brzinu kretanja i brzinu koja se postiže uvećanjem stepena graduatora za jedan.
- Neka se koristi poluupravljivi tiristorski most i graduator sa 25 koraka na ulazu. Odrediti stepen graduatora i ugao paljenja mosta koji obezbeđuje vučnu silu pri polasku na granici adhezije, uzimajući u obzir zahtev za minimiziranjem reaktivne snage i efektivne vrednosti struje u kontaktnom vodu. Koeficijent adhezije dat je izrazom: $\xi = 0,29 + \frac{8}{80 + 25 \cdot v[km/h]}$
- Za deo zadatka pod c), nacrtati talasne oblike struja i napona na sekundaru izolacionog transformatora i izlazu ispravljača. Zanemarujući trajanje komutacionog procesa odrediti efektivnu vrednost struje kontaktnog voda, aktivnu i reaktivnu snagu na sekundaru izolacionog transformatora.
- Neka se koristi punoupravljivi tiristorski most sa simetričnim okidanjem i graduator sa 25 koraka. Odrediti stepen graduatora, ugao paljenja, efektivnu vrednost struje kontaktnog voda i gubitke snage u motoru i prigušnici za režim polaska. Zanemarujući proces komutacije nacrtati talasni oblik napona i struja na sekundaru i izlazu ispravljača.
- U režimu ubrzanja dostignuta je maksimalna vrednost ispravljenog napona za deseti stepen graduatora. Potrebno je izvršiti prelaz na sledeći stepen graduatora. Objasniti zašto je potrebno simultano sa komutacijom graduatora promeniti i ugao paljenja tiristorskog mosta. Odrediti ugao paljenja α pre i posle komutacije graduatora.
- Ako se opisani voz kreće na nizbrdici razvijajući vučnu silu od 50000N, odrediti maksimalnu brzinu pri kojoj lokomotiva može raditi u režimu rekuperativnog kočenja bez slabljenja polja. Karakteristike tiristora iziskuju ograničenje ugla paljenja na 165 stepeni.

4. Zadatak (pogon sa asinhronom)

Električno vozilo pogoni se četvoropolnim asinhronim motorom vezanim u zvezdu i napajanim iz trofaznog tranzistorskog invertora (TTVP). Nominalni napon i učestanost motora iznose $U_n=3 \times 380\text{V}$, $f_n=50\text{ Hz}$. Ostali poznati parametri motora su: $I_0=9\text{A}$, $L_{\gamma s}=L_{\gamma r}=4\text{mH}$, $R_r=0.6\Omega$ i $R_s=0\Omega$. Strujni limit invertora iznosi $I_{s\max}=25\text{ A}$.

- a) Odrediti maksimalni polazni momenat na vratilu. U proračunu uvažiti $L_{\gamma s}=L_{\gamma r}=0\text{mH}$.
- b) Motor se napaja nominalnom frekvencijom na auto putu i razvija maksimalni momenat. Ako se tokom vožnje baterija ispraznila za 15% u odnosu na svoju početnu vrednost, odrediti vrednost prevalnog momenta i njegov odnos prema nominalnom prevalnom momentu. U proračunu zanemariti induktivnost magnetisanja.

5. Zadatak (pogon sa sinhronom)

Vektorsko upravljani sinhroni motor sa stalnim magnetima napajan invertorom koristi se za pogon električnog automobila. Invertor na izlazu daje napon jednak nominalnom naponu motora. Parametri statorskog namotaja su $R_s=0.015$, $X_d=0.45$, $X_q=0.35$. Parametri prenosnog mehanizma su poznati. Indukovana elektromotorna sila postaje jednaka nominalnim naponom pri $\omega=1.1\text{ p.u.}$

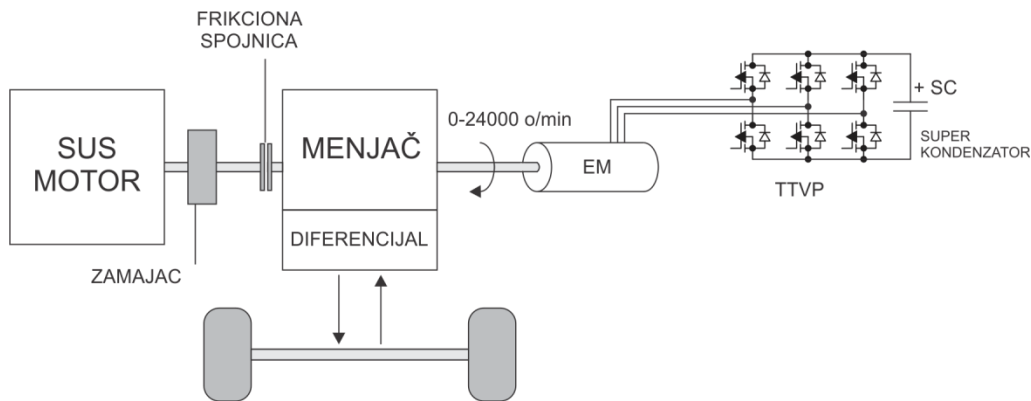
- a) Na vozilu se dogodio kvar takav da su priključci motora u kratkom spoju. Odrediti silu kočenja u funkciji brzine vozila.
- b) Odrediti maksimalnu brzinu obrtanja pri kojoj motor može razviti nominalni motorni momenat uz nominalnu struju motora ukoliko je ulazni napon invertora opao za 10% u odnosu na nominalnu vrednost.

Sistem za punjenje električnog vozila:

1. Zadatak

Automobil svedene mase $m' = m(1+\epsilon) = 1000\text{kg}$ poseduje uređaj za rekuperaciju kinetičke energije, kao na slici. Maksimalna brzina automobila je $v_{max} = 120\text{ km/h}$. Automobil se kreće u ciklusima, ubrzava od $v_{max}/2$ do v_{max} a nakon toga usporava do $v_{max}/2$. Ciklus traje 5 minuta. Faza usporavanja obavlja se uz korišćenje KERS sistema sa silom kočenja $F_k = 2000\text{ N}$ svedeno na obod točka. Stepenn iskorišćenja električnog motora i energetskog pretvarača su $\eta_{em} = 85\%$ i $\eta_{TTVP} = 95\%$. Napon super kondenzatora se menja u opsegu $[520-820]\text{V}$.

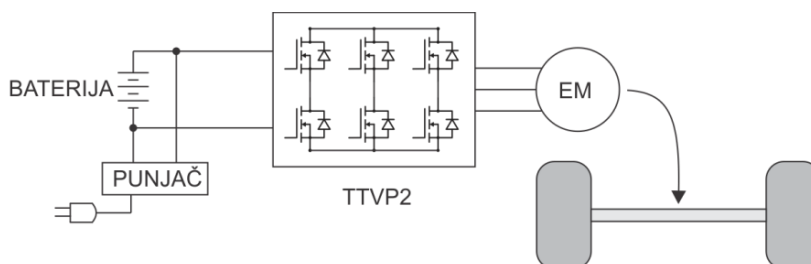
- Odrediti uštedu energije svedenu na obod točkova koju KERS pruža u toku 60 min.
- Odrediti nominalni napon i struju električne mašine U_{nom} , I_{EM} , i struju super kondenzatora I_{SC} tokom opisanog kočenja u kritičnom slučaju.
- Odrediti minimalnu kapacitivnost super kondenzatora $C_{SC(min)}$ za posmatranu trasu



2. Zadatak

ZEV (sa slike tokom vožnje ima srednju vučnu snagu $P_{sr} = 12\text{ kW}$, svedeno na pogonske točkove. Maksimalna snaga punjenja je $P_{in(max)} = 20\text{ kW}$ na mrežnom priključku. Poznato je da su stepen korisnog dejstva električnog motora, energetskog pretvarača i punjača jednaki $\eta_{em} = 85\%$ i $\eta_{TTVP} = 95\%$ i $\eta_{PU} = 98\%$, dok se baterija može smatrati idealnom ($\eta_{BAT} = 100\%$). Kapacitet baterija iznosi 50 kWh . Tokom noći vozilo provodi 7 h priključeno na opisani punjač. Tokom dana automobil se kreće u ciklusima po kružnoj putanji u trajanju od 1h. Nakon načinjenog kruga vozilo se priključuje na punjač (koji se nalazi samo na početku trase) i puni se 8 min.

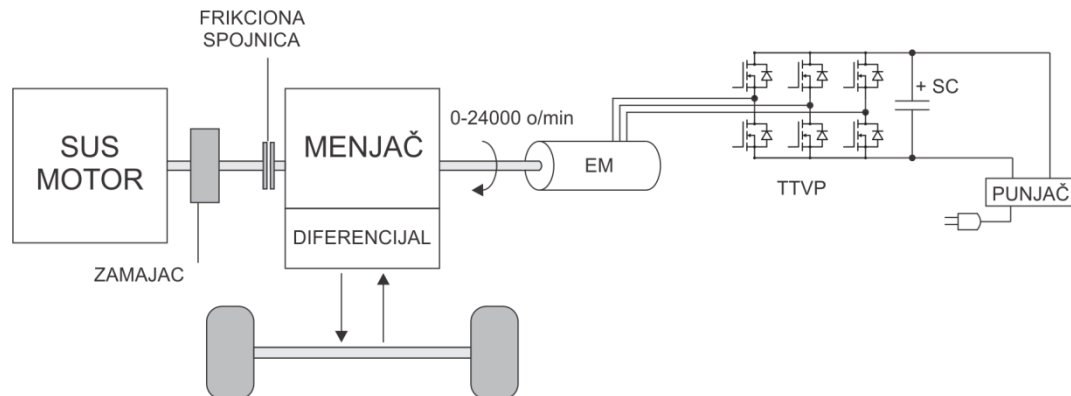
- Koji broj uzastopnih ciklusa vozilo može da obavi sa potpuno napunjenom baterijom?
- Kakav par punjač-baterija je potrebno obezbediti vozilu tako da može da izdrži celodnevnu vožnju u uslovima opisane trase?
- Ukoliko se vozilo modifikuje tako da mu se doda gasna turbina postaje serijski hibrid. Koja snaga turbine je potrebna da vozilo ostvari celodnevnu vožnju u opisanim uslovima trase?



3. Zadatak

Paralelni hibridni automobil ima SUS motor mehaničke snage $P_{\text{meh(max)}} = 60 \text{ kW}$. Poznato je da je stepen korisnog dejstva električne mašine, energetskog pretvarača i punjača jednak $\eta_{\text{em}} = 90\%$ i $\eta_{\text{TTVP}} = 95\%$ i $\eta_{\text{PU}} = 92\%$. Kapacitet kondenzatora je 50 kWh dok je snaga električnog motora $P_{\text{em}} = 50 \text{ kW}$. Automobil se vozi najpre van grada na auto-putu, uz pomoć SUS motora, dovoljno dugo da napuni baterije. Potom obavlja kretanje u gradu gde se oslanja samo na električni pogon, u trajanju od Δt . Srednja snaga vuče u gradskim uslovima je $P_{\text{sr}} = 18 \text{ kW}$, a na auto-putu $P_{\text{srap}} = 44 \text{ kW}$.

- Odrediti najveće moguće vreme vožnje u gradu Δt .
- Odrediti kapacitet kondenzatora tako da obezbedi kretanje u gradu od 8 h.
- Koja je potrebna snaga punjača tako da uz ukupno vreme punjenja od 1h vozilo može da načini 8 sati vožnje u gradu (tako je ukupan boravak u gradu 9h)? Smatrati da su punjači dostupni na bilo kojoj lokaciji u gradu.
- Odrediti minimalno vreme potrebno da se tokom vožnje na auto-putu baterija napuni na 100% vrednosti.
- Kolika je maksimalna snaga kojom raspolaže vozilo?



4. Zadatak

Električno vozilo mase 500 kg kreće se po trasi sa specifičnim otporima kretanju od $f_{\text{ot}}[\text{kp/t}] = 30 + 5v$ [km/h]. Pomoćni električni uređaji na vozilu imaju snagu od 500 W . Masa baterija jednaka je 300 kg dok je specifična snaga baterija jednaka 100 Wh/kg . Vozilo poseduje motor snage 100 kW sa koeficijentom korisnog dejstva od $0,85$.

- Odrediti autonomiju vozila ukoliko se krstari auto-putem brzinom od 60 km/h .
- Odrediti kako na autonomiju utiče promena krstareće brzine sa 60 na 80 km/h .
- Da li se povećava autonomija vozila ukoliko se u njega doda još 100 kg baterija identičnih karakteristika istih kao već ugrađene (pri brzini od 60 km/h)?
- Kojom brzinom treba da se kreće vozilo sa dodatnim ugrađenim baterijama kako bi autonomija bila ista kao pod a. Koliku uštedu u vremenu transporta donosi ugradnja dodatnih baterija (u odnosu na a)? Zanimariti potrošnju ostalih električnih uređaja.