

2. Metode bazirane na dijagnostičkim algoritmima se koriste za detekciju pravog klizanja. Jednostavna primena ovog metoda se sastoji u definisanju praga klizanja koji inicira upravljački proces nakon što je taj prag dostignut. U okviru upravljačkog procesa forsirano se smanjuje struja vučnog motora, što dovodi do smanjenja momenta motora i analogno tome vučne sile.
3. Metode bazirana na razlici struja vučnih motora imaju prednost u odnosu na prethodne zato što se ne koriste konvencionalni senzori za brzinu već se na osnovu razlika struja pojedinih motora vrši detekcija pravog klizanja. Prilikom primene ovih metoda neophodno je kompenzovati debalans usled nejednakih prečnika točkova pogonskih osovina.
4. Ključ uspešne optimizacije vučne sile sastoji se u takvoj estimaciji koeficijenta adhezije kojom će se precizno odrediti njegov maksimum u funkciji klizanja. Adhezioni observer vrši estimaciju adhezionog momenta iz podataka o ugaonoj brzini i momenta motora. Osnovne prednosti ovakvih metoda zasnivaju se na njihovoj jednostavnosti u odnosu na poremećaje i varijacije parametara.
5. Suština hibridnih metoda najpre rešava problem tačnog određivanja brzine vozila tako što odredi referentnu brzinu kao minimum izmerenih ugaonih brzina osovina vučnog vozila. Klizanje se procenjuje na osnovu razlike obodnih brzina točkova i referentne brzine. Ukoliko sve pogonske osovine duže klizaju zbog stanja šina onda je navedeni metod detekcije klizanja neefikasan, pa se u razmatranje uvodi ubrzanje. Brzina smanjenja odnosno rasta pogonskog momenta je ograničena maksimalno dozvoljenim usporenjem odnosno ubrzanjem vozila.
6. Gradijentni metodi regulaciju vučne sile zasnivaju na: estimaciji klizanja i koeficijenta adhezije, određivanju priraštaja vučnog koeficijenta u funkciji klizanja, regulisanju pogonskih varijabli vozila na one vrednosti koje dovode pomenuti priraštaj na nulu. Poslednji korak je ekvivalentan regulisanju vučne sile na maksimalnu vrednost bez gubitka adhezije.

2.7 Kočenje voza

Posmatraćemo i kratko analizirati kočenje radi zaustavljanja voza a zatim i kočenje radi održavanja brzine na padovima poznatog gradijenta $i\%$. Proces

kočenja može se opisati sledećom diferencijalnom jednačinom:

$$\frac{1000G(1 + \epsilon)}{g} \frac{dv}{dt} = -F_k(v) - Gf_{ot}(v) + iG; \quad v(0) = v_k \quad (2.43)$$

U ovoj jednačini je:

- brzina u trenutku zavođenja kočenja $v_k[\frac{m}{s}]$
- ukupna težina kompozicije i faktor korekcije masa $G[kN]$; ϵ
- sila kočenja u funkciji brzine, $F_k(v)[N]$
- specifični otpori kretanju. $f_{ot}(v)[\frac{N}{kN}]$
- nagib $i[\frac{N}{kN}]$

Rešenjem ove jednačine dobija se izraz za brzinu u funkciji vremena $v(t)$. Vreme počinjemo da merimo od trenutka zavođenja kočenja a završavamo u trenutku t_z kada je $v(t_z) = 0$. Zaustavni put se određuje integracijom brzine:

$$s_z = \int_{t=0}^{t=t_z} v(t)dt$$

Ovako opisan metod određivanja pogodan je kad koristimo odgovarajuće softverske pakete na primer MATLAB.

Ocena zaustavnog puta se može dobiti izjednačavajući kinetičku energiju voza u trenutku zavođenja kočenja sa radom sila kočenja do zaustavljanja voza. Sledeći izraz dobijen je primenom ovakvog pristupa:

$$1000 \frac{G(1 + \epsilon)v_k^2}{2g} = s_z(f_{ot}G + \frac{P_k}{\eta v_{sr}}) \quad (2.44)$$

U izrazu (2.44) v_{sr} označava srednju brzinu tokom kočenja koja iznosi $v_{sr} = 0.67v_k$.

Kada je potrebno održavati stalnu brzinu v_{ko} prilikom spuštanja niz nagib snaga kočenja je data sledećim izrazom:

$$P_k = \eta(i - f_{ot})Gv_{ko} \quad (2.45)$$

U izrazima (2.44) i (2.45) jedinice za upotrebljene veličine su:

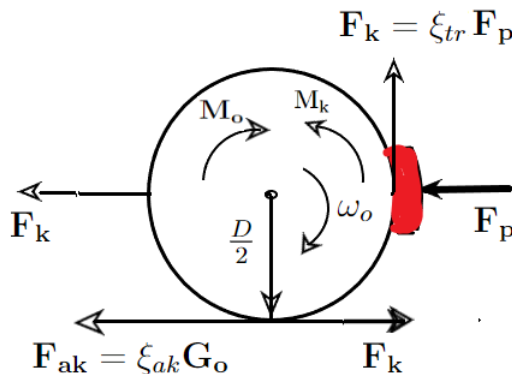
$$G[kN]; \quad v_k[\frac{m}{s}]; \quad f_{ot}[\frac{N}{kN}]; \quad P_k[W]; \quad s_z[m]$$

Proces kočenja primenom električne kočnice započinje kada vučni motori prelaze u generatorski režim transformišući kinetičku energiju voza u električnu energiju, koja se dalje procesira i vraća u mrežu ili se pretvara u toplotu u specijalnim kočnim otpornicima. Međutim, ovom vrstom kočenja nije moguće zaustaviti voz što uslovljava da je svaki voz opremljen nekom vrstom frikcionne kočnice sa upravljivom silom kočenja koja se primenjuje kao dodatak električnoj kočnici, ali koja može delovati nezavisno od električne kočnice pri svim brzinama uključujući sposobnost da zaustavi voz i da ga održi u stanju mirovanja. Upravljanje silom pritiska frikcionih elemenata kočnice je u stvari vezano za upravljanje pritiskom u pneumatskom delu kočionog sistema koje dovodi do realizacije sile pritiska kočnih elemenata na obrtne delove, točkove ili osovine vagona i lokomotive.

Ako frikcionni elementi, kočne papuče, u procesu kočenja deluju na obode točkova silom upravljivog intenziteta F_p i ako je koeficijent trenja oboda točka i kočne papuče ξ_{tr} tada je intenzitet sile kočenja $F_k = \xi_{tr} F_p$. Kočna sila uslovljava pojavu kočnog momenta M_k , koji se može razložiti na dejstvo sprega sila F_k na rastojanju $\frac{D}{2}$ kao što je prikazano na slici (2.17). Sila adhezije na dodiru točka i šine pri kočenju F_{ak} je suprotnog smera od sile F_k . Uslov da se prilikom kočenja točak obrće, a ne kliza po šini, je određen nejednakošću (2.46),

$$F_{ak} \geq F_k \quad (2.46)$$

Znak jednakosti u izrazu (2.46) određuje intenzitet maksimalne sile kočenja koja se može primeniti a da ne dođe do klizanja točka po šini.



Slika 2.17

Maksimalna sila pritiska frikcionih elemenata- kočnih papuča je:

$$F_p = \frac{\xi_{ak}}{\xi_{tr}} G_o = \delta G_o$$

$G_o[kN]$ predstavlja normalnu silu pritiska kočene osovine na šine, bezdimenzioni faktor δ definiše koeficijent pritiska frikcionih kočnih elemenata na osovinu u procesu kočenja. Empirijske vrednosti koeficijenta δ su date u sledećoj tabeli

Tip vozila	koeficijent δ
Teretna kola	0.6-0.7
Putnička kola	0.7-0.9
El.lokomotiva	0.5

Intenzitet ukupne sile kočenja $\sum F_k$ dejstvom frikcionih elemenata na vozilu može se odrediti na sledeći način:

$$\sum F_k = \xi_{tr} \delta \sum G_o$$

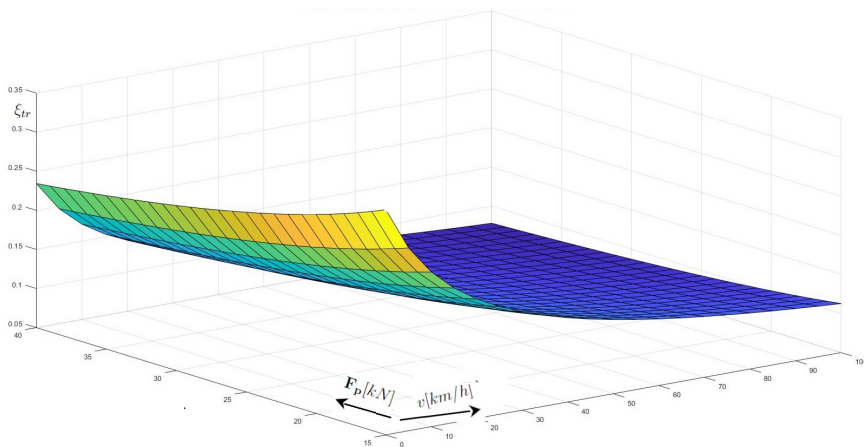
Gde $\sum G_o$ predstavlja ukupan osovinski pritisak svih kočnih osovin. Relativna vrednost sile kočenja $\sum f_k$ je:

$$\sum f_k = 1000 \frac{\sum F_k}{G} = 10 \xi_{tr} \delta \left(\frac{\sum G_o}{G} 100 \right) = 10 \xi_{tr} \delta p_k \quad \left[\frac{N}{kN} \right] \quad (2.47)$$

U izrazu (2.47) definisana je veličina p_k , u praksi poznata kao procenat kočenja, odnosno procentualna vrednost količnika ukupne sile pritiska svih kočnih osovin $\sum G_o$ i težine kompozicije $G = G_L + G_v$. Za koeficijent trenja ξ_{tr} postoje brojne empirijske formule koje se najčešće nazivaju po autoru. Na primer za papuče od sivog liva, funkcionalnu zavisnost koeficijenta trenja od sile pritiska kočione papuče i brzine je data sledećom formulom:

$$\xi_{tr} = 0.6 \left(\frac{1.6 F_p [kN] + 100}{8 F_p [kN] + 100} \right) \left(\frac{v [km/h] + 100}{5v [km/h] + 100} \right) \quad (2.48)$$

Kad je sila \mathbf{F}_p konstantna najveća vrednost ξ_{tr} ima se pri brzini $v = 0 [km/h]$. Zavisnost $\xi_{tr}(\mathbf{F}_p, v)$ (2.48) prikazana je na slici (2.18).



Slika 2.18

Računski primer

Odrediti karakteristične vrednosti $F - v$ dijagrama za lokomotivu koja se koristi za vuču putničkih i teretnih vozova sa sledećim podacima:

1. Međugradski putnički voz

- Masa voza sa lokomotivom $m_1 = 500t$
- Broj kola u sastavu voza bez lokomotive $n_v = 12$
- Brzina $v_1 = 200 \frac{km}{h}$
- Uspon na trasi $i_1 = 5\text{‰}$
- $k_s S_e = 1.5m^2$

2. Ekspresni teretni voz stalnog sastava

- Masa sa lokomotivom $m_2 = 1800t$
- Brzina $v_2 = 110 \frac{km}{h}$
- Uspon na trasi $i_2 = 8\text{‰}$

3. Teretni voz mešovitog sastava

- Masa sa lokomotivom $m_3 = 1600t$
- Brzina $v_3 = 80 \frac{km}{h}$
- Uspon na trasi $i_3 = 14\text{‰}$

Potrebno je stalne otpore vuče u prvom slučaju računati polazeći od formule (2.16) Za teretnu vuču potrebno je koristiti sledeće forme Štralovih izraza za relativne vrednosti stalnih otpora:

$$f_{2ok} = 1.2 + 0,0002v^2 \left[\frac{N}{kN} \right]$$

$$f_{3ok} = 1.6 + 0.0002v^2 \left[\frac{N}{kN} \right]$$

Rešenje

Težine vozova u navedenim slučajevima su:

$$G_1 = m_1g = 4905[kN] \quad G_2 = m_2g = 17658[kN] \quad G_3 = m_3g = 15696[kN]$$

Ukupni relativni otpori vuče prema postavci zadatka su :

$$f_{v1} = 1 + 0.0025v_1 + 4.8 \frac{n_v + 1 + 2.7}{G_1} k_s S_e \left(\frac{v_1 + 15}{10} \right)^2 + i_1 = 17.15 \left[\frac{N}{kN} \right]$$

$$f_{v2} = 1.2 + 0,0002v_2^2 + i_2 = 11.62 \left[\frac{N}{kN} \right]$$

$$f_{v3} = 1.6 + 0.0002v_3^2 + i_3 = 16.88 \left[\frac{N}{kN} \right]$$

Pri vuči sa konstantnom brzinom vučna sila je jednaka otporima vuče. U navedenim slučajevima se dobijaju sledeće vrednosti:

$$F_{v1} = G_1 f_{v1} = 84.1[kN] \quad F_{v2} = G_2 f_{v2} = 205.2[kN] \quad F_{v3} = G_3 f_{v3} = 265[kN]$$

Na osnovu dobijenih vrednosti za vučne sile biramo F_{v3} za nominalnu vrednost vučne sile $F_n = 265[kN]$.

Nominalna snaga se dobija kao $\max[F_{v1}v_1, F_{v2}v_2, F_{v3}v_3] = 6.27[MW]$.

Bazna brzina predstavlja količnik između nominalne snage i nominalne vučne sile:

$$v_b = 3600 \frac{P_n}{F_n} = 85.2 \left[\frac{km}{h} \right] \quad P_n[MW] \quad F_n[kN]$$

Ovim su određene konture $F - v$ dijagrama Dobijene rezultate potrebno je uporediti i analizirati u odnosu na adheziona ograničenja vučne sile. Pretpostavimo da navedene zahteve može ispuniti lokomotiva tipa $B'_oB'_o$ težine $G_L = 840[kN]$.

Primenom izraza (2.36) nalazi se :

$$F_a(v) = G_L \left(\frac{7.5}{v + 44} + 0.161 \right)$$

$$F_a(v = 0) = 278.4[kN] > F_n$$

$$F_v(v = 200) = 3600 \frac{Pn}{v} = 112.86[kN]$$

$$F_a(v = 200) = 161[kN] > 112.86[kN] = F_v(v = 200)$$

Što znači da je nejednakost (2.38) ispunjena kako pri polasku tako i pri maksimalnoj brzini.

Glava 3

Vozni dijagram

3.1 Karakteristični režimi vožnje

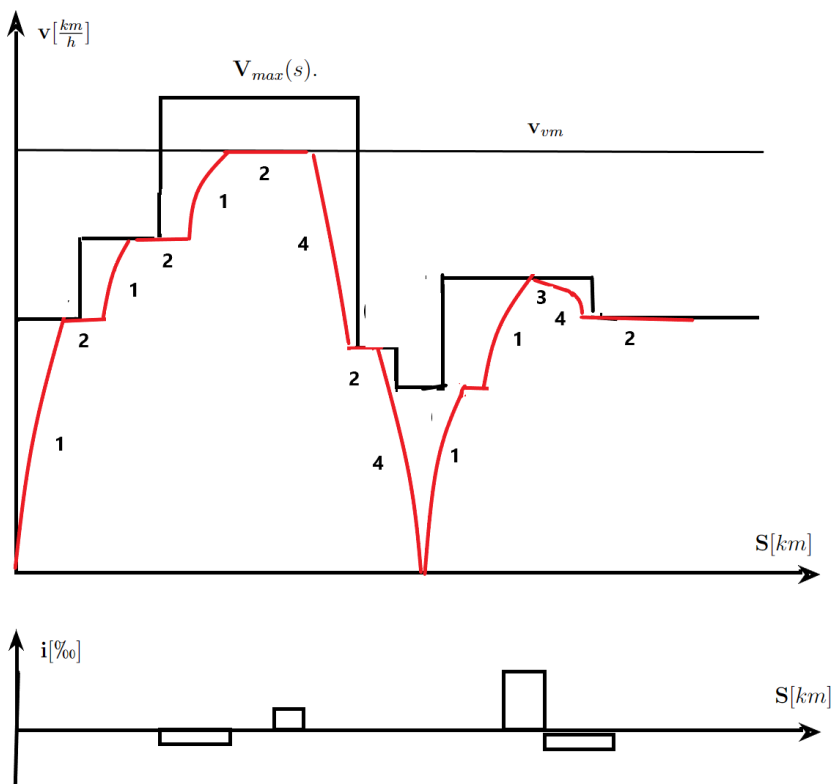
Na određenoj deonici pruge voz sa lokomotivskom vučom ili elektromotorni voz realizuje kombinaciju sledećih karakterističnih režima vožnje:

1. Vožnja sa pozitivnim priraštajem brzine-ubrzanje.
2. Vožnja konstantnom brzinom -krstarenje.
3. Vožnja pod dejstvom sila inercije - zalet sa negativnim priraštajem brzine.
4. Vožnja sa negativnim priraštajem brzine- kočenje

Dijagram u kome je prikazana promena brzine u funkciji pređenog puta $v(S)$ na određenoj deonici naziva se vozni ili putni dijagram. Uz ovaj dijagram se obično daje i dijagram svedenih infrastukurnih otpora u formi $i(S)[\%]$. Sastavni deo voznog dijagrama su i infrastrukturna ograničenja brzine na određenim deonicama trase $\mathbf{V}_{max}(S)$. Na slici (3.1) prikazan je vozni dijagram, gde su osim karkterističnih segmenata vožnje prikazane i granične dozvoljene brzine koje su određene tehničkim karakteristikama pruge kao i tehnička maksimalno dozvoljena brzina vučnog vozila \mathbf{v}_{vm}

3.1.1 Analiza osnovnih režima

Vozni dijagram predstavlja veoma važan podatak pri sastavljanju reda vožnje ali ima i značajnu ulogu u procesu definisanja energetski efikasne vožnje to jest, optimizacije vožnje po kriterijumu racionalne upotrebe električne energije za vuču vozova. Kada je poznata ukupna težina voza $G[kN]$



Slika 3.1: Primer voznog dijagrama

i faktor korekcije mase ϵ , ekvivalentna masa voza m_e izražena u tonama se dobija iz izraza:

$$m_e = \frac{G[kN](1 + \epsilon)}{g} [t]$$

Analitički izrazi koji opisuju pojedine režime su:

1. Ubrzavanje

$$m_e \left(\frac{dv}{dt} \left[\frac{m}{s^2} \right] \right) = F_v(v)[kN] - \sum F_{ot}(v)[kN] = F_u(v)[kN] \quad (3.1)$$

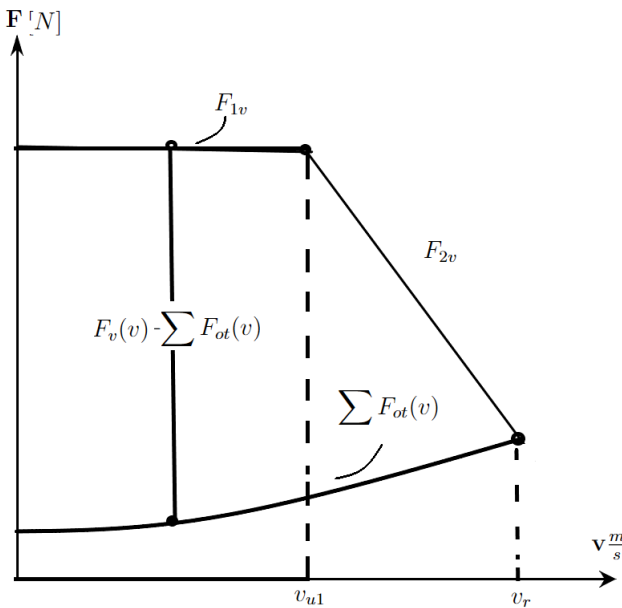
U deonici ubrzanja, pozitivna razlika vučne sile i sile otpora određuje rezultantnu silu ubrzanja F_u u funkciji brzine, što je prikazano na slici (3.2). Ubrzanje nije konstantno, stoga prosta primena Njutnove formule za konstantno ubrzanje može biti samo aproksimacija dok je za

tačnu ocenu brzine potrebno rešiti diferencijalnu jednačinu koja se formira iz izraza (3.1)

2. Vožnja konstantnom brzinom,

$$\frac{dv}{dt} = 0; \quad F_v(v) = \sum F_{ot}(v) \quad (3.2)$$

Vučna sila je jednaka zbirnoj sili vučnih otpora. Konstantna brzina v_r je određena presekom ovih krivih što je prikazano na slici (3.2)



Slika 3.2

3. Vožnja pod zaletom.

$$m_e \left(\frac{dv}{dt} \left[\frac{m}{s^2} \right] \right) = - \sum F_{ot}(v) [kN] \quad (3.3)$$

Usporenje koje se realizuje ovim načinom vožnje se aproksimira konstantom kada se sila otpora vuče aproksimirana konstantnom.

4. Kočenje se opisuje jednačinom (3.4).

$$m_e \left(\frac{dv}{dt} \left[\frac{m}{s^2} \right] \right) = -F_k(v) [kN] - \sum F_{ot}(v) [kN] \quad (3.4)$$

U izrazima (3.1),(3.2),(3.3),(3.4) je

$$\sum F_{ot}(v)[kN] = 10^{-3}G[kN] (f_{ok}(v) + f_k \pm i) \left[\frac{N}{kN} \right]$$

$$\sum F_{ot}(v)[kN] = C_R[kN] + B_R \left[\frac{kNs}{m} \right] v + A_R \left[\frac{kNs^2}{m^2} \right] v^2$$

Vučna sila se aproksimira polinomima poznatih koeficijenata koji važe u definisanom opsegu brzina $[v_k; v_{k+1}]$; $k = 1 \dots$

$$F_{kv}[kN] = C_{kv}[kN] + B_{kv} \left[\frac{kNs}{m} \right] v + A_{kv} \left[\frac{kNs^2}{m} \right] v^2; \quad v_k \leq v < v_{k+1} \quad (3.5)$$

Ako polinomni izraz vučnu silu (3.5) u definisanom opsegu brzina i izraz za otpore vuče zamenimo u (3.1) dobijaju se diferencijalne jednačine (3.6) čije rešavanje relativno jednostavno jer se svodi na metod razdvajnja promenljivih, uz napomenu da je brzina dobijena implicitno.

$$\frac{dv}{dt} = a_k v^2 + b_k v + c_k \quad v_k \leq v < v_{k+1} \quad (3.6)$$

$$a_k = \frac{A_{kv} - A_R}{m_e} \quad (3.7)$$

$$b_k = \frac{B_{kv} - B_R}{m_e} \quad (3.8)$$

$$c_k = \frac{C_{kv} - C_R}{m_e} \quad (3.9)$$

Rešenje jednačine (3.6) sa poznatim početnim uslovima (t_k, v_k) je:

$$\int_{v_k}^v \frac{dv}{a_k v^2 + b_k v + c_k} = t - t_k \quad (3.10)$$

Brzina v u svim gore navedenim jednačinama je izražena u $\left[\frac{m}{s} \right]$. Vučna sila se između dve poznate vrednosti brzina v_k i v_{k+1} prikazuje pomoću polinoma najviše drugog stepena. U prethodnom razmatranju posmatran je segment ubrzanja kroz određivanje zavisnosti promene brzine u vremenu.

Vozni dijagram, međutim prikazuje promenu brzine u funkciji puta $v(S)$. Prethodni izrazi se lako prevode u formu pogodnu za određivanje ove zavisnosti u procesu ubrzanja ako se koristi relacija:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dS} \frac{dS}{dt} = \frac{dv}{dS} v \quad (3.11)$$

Zamenjujući (3.11) u (3.6) i rešavajući diferencijalnu jednačinu razdvajanjem promenljivih dobija se:

$$\int_{v_k}^v \frac{v dv}{a_k v^2 + b_k v + c_k} = S - S_k \quad (3.12)$$

Gde je S_k pozicija na voznom dijagramu kojoj odgovara brzina v_k . Ako je u pitanju pokretanje iz mirovanja tada je $v_k = 0$. Iako je rešavanje integrala u izrazima (3.10) i (3.12) relativno jednostavno jer se transformacijama polinoma u imeniocu dovode u formu tabličnog integrala, dobijeni izrazi nisu pregledna forma zavisnosti $v(t)$ ili $v(S)$. Zato je uobičajeno da se koriste numeričke metode rešavanja diferencijalnih jednačina uz računarsku podršku pri određivanju $v(t)$ ili $v(S)$.

Analiziraćemo proces kočenja do zaustavljanja pretpostavljajući da je kočna sila konstantna i određena u procentima $p\%$ težine voza:

$$F_k[kN] = \frac{p}{100}(1 + \epsilon)gm_v[t]$$

Proces kočenja se opisuje jednačinom (3.13)

$$m_e[t] \frac{dv}{dt} \left[\frac{m}{s^2} \right] = - (F_k + F_{ot}(v)) [kN] \quad (3.13)$$

$$\frac{dv}{dt} = av^2 + bv + c \quad (3.14)$$

$$a = \frac{-A_R}{m_e} \quad (3.15)$$

$$b = \frac{-B_R}{m_e} \quad (3.16)$$

$$c = \frac{-F_k - C_R}{m_e} \quad (3.17)$$

Zaustavno vreme T_k , i zastavni put S_k voza koji koči pod dejstvom sile F_k , počevši od brzine $v(0) = V_0$, pa do brzine $v(T_k) = 0$ izračunava se rešavanjem određenih integrala:

$$T_k = \int_{V_0}^0 \frac{dv}{av^2 + bv + c} \quad (3.18)$$

$$S_k = \int_{V_0}^0 \frac{v dv}{av^2 + bv + c} \quad (3.19)$$

Zavisno od znaka diskriminante $D = \sqrt{b^2 - 4ac}$ izrazi za zastavno vreme

T_k i zaustavni put S_k su:

$$T_k = \frac{2}{\sqrt{|D|}} \left[\arctan\left(\frac{b}{\sqrt{|D|}}\right) - \arctan\left(\frac{b+2aV_0}{\sqrt{|D|}}\right) \right] \quad D < 0 \quad (3.20)$$

$$T_k = 2 \left[\frac{1}{b+2aV_0} - \frac{1}{b} \right] \quad D = 0 \quad (3.21)$$

$$T_k = \frac{1}{\sqrt{D}} \left[\log \frac{b-\sqrt{D}}{b+\sqrt{D}} - \log \frac{2aV_0+b-\sqrt{D}}{2aV_0+b+\sqrt{D}} \right] \quad D > 0 \quad (3.22)$$

$$S_k = \frac{1}{2a} \log \frac{c}{aV_0^2 + bV_0 + c} - \frac{b}{2a} T_k \quad (3.23)$$

3.2 Primeri

Primer 1

Elektromotorni voz ekvivalentne mase $m_e = 100[t]$ se pokreće i ubrzava pod dejstvom vučne sile koja se menja u funkciji brzine na sledeći način:

$$F_{v1} = 60[kN] \quad (0 < v \leq 5) \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$F_{v2} = (70 - 2v)[kN] \quad (5 < v \leq 15) \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$F_{v3} = (55 - v)[kN] \quad (15 < v \leq 45) \left[\frac{m}{s} \right]$$

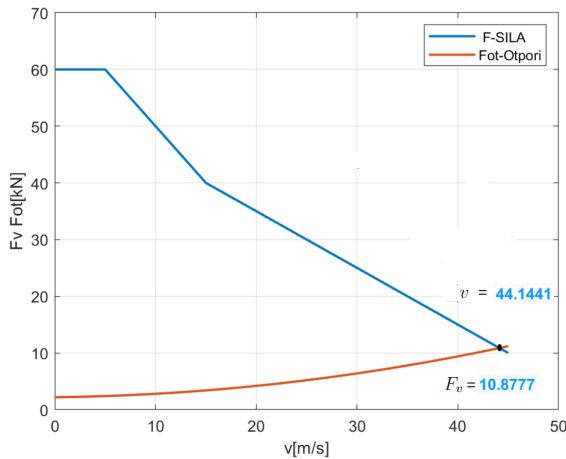
Sile otpora vuče su :

$$F_{ot}(v) = (2.2 + 2 * 10^{-2}v + 4 * 10^{-3}v^2)[kN]$$

1. Potrebno je odrediti zavisnost $v = f(t)$ u procesu pokretanja voza do uspostavljanja konstantne brzine određene ravnotežom vučne sile sa silom otpora vuči.
2. Odrediti ubrzanje voza $a(t)$ od pokretanja do dostizanja konstantne brzine.
3. Odrediti vozni dijagram ovakvog kretanja voza

Rešenje

Na slici (3.3) prikazan su dijagrami $F_v(v)$ i $F_{ot}(v)$. Presek ove dve krive određuje kontantnu brzinu koja se dostiže na kraju procesa ubrzavanja u



Slika 3.3

trenutku t_{max} . Ta brzina je $v_c = 44.1441[\frac{m}{s}] \approx 159[\frac{km}{h}]$. Kako je zavisnost vučne sile od brzine data kroz tri povezana segmenta najpre se za svaki segment postave izrazi koji definišu ubrzanja.

$$\frac{dv}{dt} = -4 * 10^{-5}v^2 - 0,0002v + 0,578 \quad 0 \leq v < 5 \quad (3.24)$$

$$\frac{dv}{dt} = -4 * 10^{-5}v^2 - 0,00202v + 0.678 \quad 5 \leq v < 15 \quad (3.25)$$

$$\frac{dv}{dt} = -4 * 10^{-5}v^2 - 0,0102v + 0,528 \quad 0 \leq v < 45 \quad (3.26)$$

Numerički metod se koristi aproksimaciju izvoda:

$$\left(\frac{dv}{dt}\right)_{t=t_k} \approx \frac{v(t_k + \Delta t) - v(t_k)}{\Delta t} \quad (3.27)$$

Ako se odabere Δt dovoljno malo uz oznake $v_k = v(t_k)$, $v_{k+1} = v(t_k + \Delta t)$ izrazi (3.24),(3.25) i (3.26) se transformišu u sledeće forme da bi se umesto kontinualne funkcije $v(t)$ dobio niz tačaka $v_k = v(t_k)$ $k = 1, 2 \dots$ koji

aproksimira kontinualnu funkciju $v(t)$.

$$\begin{aligned} v_{k+1} &= v_k + \Delta t(-4 * 10^{-5} v_k^2 - 0,0002 v_k + 0,578); \\ k &= 1, \dots, N_1 - 1; v_0 = 0; v_{N_1-1} = 5 - \epsilon \\ v_{k+1} &= v_k + \Delta t(-4 * 10^{-5} v_k^2 - 0,00202 v_k + 0.678); \\ k &= N_1, \dots, N_2 - 1; v_{N_1} = 5; v_{N_2-1} = 15 - \epsilon \\ v_{k+1} &= v_k + \Delta t(-4 * 10^{-5} v_k^2 - 0,0102 v_k + 0,528); \\ k &= N_2, N_2 + 1 \dots; v_{N_2} = 15; \end{aligned}$$

ϵ je zadata mala pozitivna vrednost kojom je određen završetak iteracionog postupka pojedinih segmenata. Granična vrednost poslednjeg segmenta je određena tačkom preseka vučne sile i sile otpora vuče. Na ovaj način je određena zavisnost $v = f(t)$ u diskretnoj formi preko niza

$$\left[v(0), v(\Delta t), v(2\Delta t), \dots, v_{max} = v(t_{max}) = 44,14 \left[\frac{m}{s} \right] \right]$$

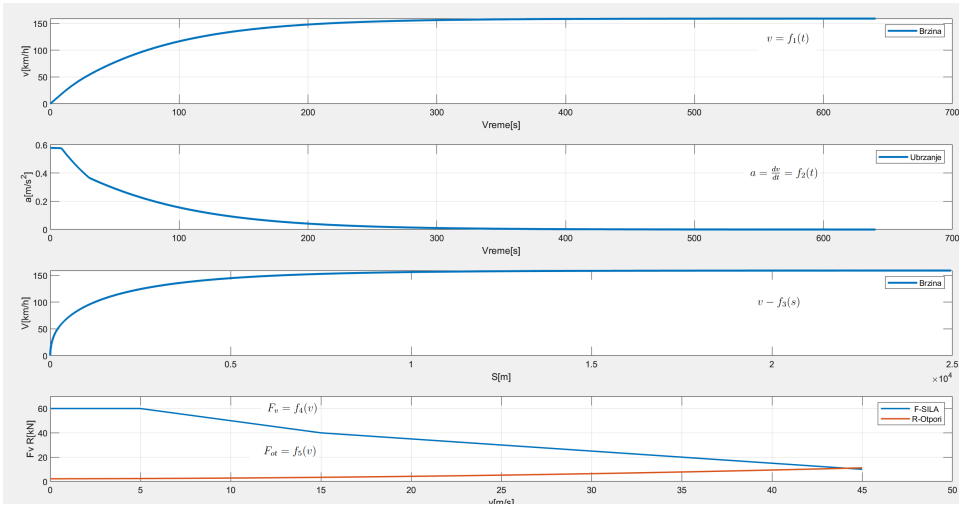
Ubrzanje od $v = 0$ do $v = 44,14 \left[\frac{m}{s} \right]$ je određeno izrazima (3.24),(3.25) i (3.26). Vozni dijagram određuje se u formi $[v_k, S_k]$ koristeći približnu formulu određenog integrala:

$$\begin{aligned} S(T) &= \int_0^T v(t) dt \\ S_k &= \Delta t \sum_{n=0}^k v_n \end{aligned}$$

Dijagrami $v(t), a(t), v(S), F_v(v), F_{ot}(v)$ su prikazani na slici (3.4):

Dijagrami na slici (3.4) su dobijeni programskom implementacijom podataka o vučnoj sili i sili otpora vuče u procesu koji počinje pokretanjem voza i ubrzavanjem do brzine koja je određena ravnotežom vučne sile i sile otpora vuče. Kod programske implementacije sadrži jedan skript program *avs.m* i dva funkcijska programa *ubrzanje.m* i *put.m*. Ulazni podaci o vučnoj sili odnosno njenim delovima koji odgovaraju određenim graničnim brzinama, sili otpora vuči, inkrementu vremena i masi voza su dati na početku programa *avs.m*. Prvi funkcijski program *ubrzanje.m* izračunava izlazne veličine koje čine uređeni nizovi brzine v_k , ubrzanja a_k i vremena t_k . Izlazne veličine drugog funkcijskog podprograma *put.m* su uređeni nizovi brzine i pređenog puta. Na osnovu izračunatih vrednosti dobijaju se i odgovarajući dijagrami koji su prikazani na slici (3.4).

% SKRIPT PROGRAM: *avs.m*



Slika 3.4

```

M=100;Dt=0.1;Vg=[0 5 15 45];
F=[60 0 0;70 -2 0; 55 -1 0];R=[2.2 2e-2 4e-3];
% Ulazne velicine su : M-ekvivalentna masa koja
% uracunava i uticaj rotacionih delova izrasena u [t]
% Dt vremenski inkrement [s];
% Vg Vektor granicnih brzina pojedinih segmenata [m/s];
% Matrica koeficijenata vucne sile u segmentima
% prikaznimu vrstama matrice;
% Vektor koeficijenata sile otpora vuca.
% Izlazne velicine su vektori cije su komponente
% clanovi nizova brzine, ubrzanja i vremena
%. v[m/s]; a[m/s ^2]; t[s]
[v , a , t ] = ubrzanje (M,Dt, Vg,F,R);
V=v (2 : length ( v ) );K=length ( t ) ;
T=t ( 1 :K-1);
Ns=length ( v ) ;
for n=1:Ns
    [S(n) ,V(n)]=put ( v , n , Dt ) ;
end
vd=linspace ( 0 ,45 ,1000);
nd=length ( vd ) ;Fd=zeros ( 1 ,nd);
k1=find ( vd==5);Fd ( 1 : k1)=60;
    
```



```

k2=find(vd==15);Fd(k1+1:k2)=70-2*vd(k1+1:k2);
k3=find(vd==45);Fd(k2+1:k3)=55-vd(k2+1:k3);
Rd=1e-3*(2200+20*vd+4*vd.^2);
Vosa=[0 50 0 70];
subplot(4,1,1);plot(t,v*3.6,LineWidth=2);grid;
legend('Brzina');xlabel('Vreme[s]');ylabel('v[km/h]');
subplot(4,1,2);plot(T,a,LineWidth=2);grid;
legend('Ubrzanje');xlabel('Vreme[s]');ylabel('a[m/s^2]');
subplot(4,1,3);plot(S,V*3.6,linewidth=2);grid;
legend('Brzina');xlabel('S[m]');ylabel('V[km/h]');
subplot(4,1,4);plot(vd,Fd,vd,Rd,linewidth=1.5);axis(Vosa);
grid;xlabel('v[m/s]');ylabel('Fv-R[kN]');
legend({'F-SILA','R-Otpori'});

```

Funkcijski program *ubrzanje.m*:

```

function [v,a,t] = ubrzanje(M,Dt,Vg,F,R)
%funkcijski program za izracunavanje v(t) i a(t)
% u pojedinim segmentima zadate vucne sile.
% Prvi segment v(k) i a(k)
k=1;
v(k)=Vg(1);
vcont=Vg(1);
t(k)=0;
while vcont<=Vg(2)
    v(k+1)=v(k)+Dt*(F(1,:)-R)/M*[1;v(k);v(k)^2];
    a(k)=(F(1,:)-R)/M*[1;v(k);v(k)^2];
    t(k+1)=t(k)+Dt;
    vcont=v(k+1);
    k=k+1;
end
% Drugi segment v(k) i a(k)
vcont=Vg(2);
while vcont<=Vg(3)
    v(k+1)=v(k)+Dt*(F(2,:)-R)/M*[1;v(k);v(k)^2];
    a(k)=(F(2,:)-R)/M*[1;v(k);v(k)^2];
    t(k+1)=t(k)+Dt;
    vcont=v(k+1);
    k=k+1;
end
% Treći segment v(k) i a(k)

```

```

DFR=(F(3,:) - R) * [1; v(k); v(k)^2];
while DFR >= 0.01
v(k+1)=v(k)+Dt*DFR/M;
a(k)=DFR/M;
    t(k+1)=t(k)+Dt;
    k=k+1;
    DFR=(F(3,:) - R) * [1; v(k); v(k)^2];
end
end

```

Funkcijski program za izračunavanje pređenog puta *put.m*

```

function [S,V] = put(v,k,Dt)
% Ulaz je vektor brzine duzine k i inkrement vremena Dt
% izlaz su nizovi V(k) i S(k)
% tabelarno zadata funkcija v=f(s)
S=sum(v(1:k))*Dt;
V=v(k);
end

```

Primer 2

Elektromotorni voz počinje da koči stalnom silom $F_k = 0.09G_v[kN]$ pri brzini od $140[\frac{km}{h}]$. Ekvivalentna masa koja uključuje i uticaj inercije rotacijskih sistema iznosi $m_e = 100[t]$. Poznata je sila otpora kretanju u funkciji brzine $v\frac{m}{s}$:

$$F_{ot}[kN] = 2.2 + 2 * 10^{-2}v + 4 * 10^{-3}v^2.$$

Izračunati zaustavno vreme T_k i zaustavni put S_k

Rešenje

Početna brzina kočenja iznosi $V_0 = \frac{140}{3.6} = 38.9\frac{m}{s}$. Težina voza je $G_v = 981[kN]$ dok sila kočenja iznosi $F_k = 0.09 * 981 = 88,3[kN]$. Koeficijente a, b, c su:

$$\begin{aligned}
 a &= -\frac{0.004}{100} = -0.00004 \\
 b &= -\frac{0.02}{100} = -0.0002 \\
 c &= -\frac{88.3 + 2.2}{100} = -0.905
 \end{aligned}$$

Kako je $D = -1.4476 * 10^{-4} < 0$ primenjujemo formulu (3.20) sa gore navedenim vrednostima koeficijenata (a, b, c). Vreme koje protekne od zavodenja kočenja pa do zautavljanja voza je $T_k \approx 42[s]$. Na osnovu formule (3.23) izračunava se zaustavni put $S_k = 805[m]$.

Primer 3

Električna lokomotiva $B'_o B'_o$ mase $m_L = 80t$ vuče voz mase $m_V = 820t$ na trasi između stanica A i B. Voz polazi iz stanice A a zaustavlja se u stanici B. Koeficijent korisnog dejstva elektromehaničke konverzije lokomotive $\eta = \frac{P_m}{P_e} = 0.8$. Prema voznom dijagramu kretanje voza se odvija na sledeći način.

- Faza ubrzanja $a_u = 0.12 \frac{m}{s^2}$. Faza ubrzavanja se okončava kada voz dostigne brzinu $v_m = 80 \frac{km}{h}$.
- Faza vožnje pod zaletom smenjuje prethodnu fazu ubrzanja i traje $t_z = 120s$
- Faza vožnje konstantnom brzinom postignutom na kraju zaleta traje $t_{us} = 40min$
- Druga faza vožnje pod zaletom smenjuje prethodnu vožnju konstantnom brzinom i traje dok se brzina ne smanji na $v_{z2} = 45 \frac{km}{h}$
- Faza kočenja počinje od brzine koja je dostignuta tokom vožnje pod zaletom pa sve do zaustavljanja. Voz se koči sa usporenjem od $a_k = -0.15 \frac{m}{s^2}$

Poznato je da je merodavni nagib trase puta ,uspon, $i_{us} = 1 \frac{N}{kN}$. Svedeni otpori kretanja voza su konstantni i iznose $\sum f_{ot} = 4 \frac{N}{kN}$. Faktor korekcije mase voza iznosi $\epsilon = 0.07$, a koeficijent adhezije koji određuje maksimalno raspoloživu vučnu silu iznosi $\xi_{max} = 0.30$.

1. Odrediti težinu voza, adhezionu težinu i maksimalno raspoloživu vučnu silu po kriterijumu adhezije.
2. Odrediti, vučnu silu u procesu ubrzanja F_{v1} , vreme ubrzavanja voza $t_{ub}[s]$ i dužinu puta ubrzavanja $S_{ub}[m]$. Izračunati vrednost električne energije u kWh koja je potrošena tokom ubrzanja.
3. Izračunati brzinu vožnje pod zaletom nakon $t_{z1} = 120s$ dostizanja brzine ,kao i pređeni put S_{z1}

4. Izračunati dužinu deonice koju voz prelazi konstantnom brzinom i vučnu silu lokomotive u tom režimu. Izračunati električnu energiju koju lokomotiva iskoristi za vuču tokom vožnje duž ove deonice. Na kom kilometru deonice je završena faza vožnje konstantnom brzinom.
5. Izračunati vreme t_{z2} i pređeni put na kraju vožnje pod zaletom S_{z2} kada započinje proces kočenja do zaustavljanja voza u stanici B.
6. Izračunati silu kočenja voza koja se koristi za zaustavljanje voza. Izračunati vreme usporjenja do zaustavljanja i mehaničku energiju koja je generisana tokom kočenja voza.
7. Izračunati utrošenu električnu energiju za vuču u fazama aktivne vuče (kad je $F_v > 0$), izračunati dužinu deonice između stanica A i B ,ukupno vreme putovanja i srednju brzinu vožnje na toj deonici.

Rešenje

1. Ukupna težina kompozicije je: $G_k = (m_L + m_v)g = 8829[kN]$
 Kako je lokomotiva tipa $B'_oB'_o$ adhezionna težina je: $G_a = m_Lg = 784,8[kN] \approx 785[kN]$
 Maksimalna vučna sila je $F_{vmax} = \xi_{max}G_a = 235,5[kN]$.
2. Ako masu kompozicije izrazimo u tonama a težinu kompozicije u $[kN]$ potrebna vučna sila iznosi:

$$F_{v1}[kN] = (1 + \epsilon)(m_L + m_v)a + (i_{us} + \sum f_{ot})G_k/1000 \approx 160[kN]$$

Vreme t_{ub} do dostizanja brzine $v_m = 80[\frac{km}{h}]$, pređeni put S_{ub} i utrošena električna energija su :

$$T_{ub} = \frac{v_m}{3,6a_u} = 185,2[s]; \quad S_{ub}[m] = (\frac{v_m}{3,6})^2 \frac{1}{2a} = 2058[m];$$

$$W_{e1} = \frac{F_{v1}[kN]S_{ub}[m]}{3600\eta} \approx 114[kWh]$$

3. Tokom vožnje pod zaletom je $F_v = 0$.

$$(1 + \epsilon)(m_L + m_v)a_{z1} + (i_{us} + \sum f_{ot})G_k/1000 = 0$$

$$a_z = -\frac{(i_{us} + \sum f_{ot})G_k}{1000(1 + \epsilon)(m_L + m_v)} = -0.0458[\frac{m}{s^2}];$$

$$v_{z1} = 80 + 3,6a_z t_{z1} = 60,2 \left[\frac{km}{h} \right];$$

$$S_{z1} = \frac{v_m t_{z1}}{3,6} + 0,5a_z t_{z1}^2 = 2337[m];$$

4. Pređeni put iznosi:

$$S_{us} = \frac{v_{z1} t_{us} 60}{3,6} \approx 40,133[km]$$

U režimu vožnje konstantnom brzinom vučna sila je jednaka sili otpora vuče i iznosi:

$$F_{us} = (i_{us} + \sum f_{ot}) G_k / 1000 \approx 44[kN]$$

. Utrošena energija tokom ovog dela vožnje je:

$$W_{e2} = \frac{F_{us} S_{us}}{3600\eta} \approx 674[kWh]$$

Ova deonica je završena na 44,528[km] od početne stanice.

5. Brzina voza pre prelaska na vožnju pod zaletom je $v_{z1} = 60,2 \left[\frac{km}{h} \right]$. Pod dejstvom sile otpora voz usporava do brzine $v_{z2} = 45 \left[\frac{km}{h} \right]$. Vreme vožnje pod zaletom u ovom delu vožnje i pređeni put iznose:

$$t_{z2} = \frac{v_{z2} - v_{z1}}{3,6a_z} = 92[s] \quad S_{z2} = t_{z2} \frac{v_{z1} + v_{z2}}{7,2} = 1346[m]$$

6.

$$F_k[kN] = -(m_L + m_v)(1 + \epsilon)a_k - (i_{us} + \sum f_{ot}) \frac{G_k}{1000} = 100,3[kN]$$

$$t_k = -\frac{v_{z2}}{3,6a_k} = 83,3[s];$$

$$S_k = -0,5 \frac{v_{z2}^2}{3,6^2 a_k} = 520,3[m]; \quad W_m = F_k S_k = 52186[kJ]$$

7. $W_e = W_{e1} + W_{e2} = 788,3[kWh]$ $S = S_{ub} + S_{z1} + S_{us} + S_{z2} + S_k = 46,394[km]$

$$T = \sum t = 2880[s] = 48[min] \quad v_{sr} = 3,6 \frac{S}{T} = 58 \left[\frac{km}{h} \right]$$

Glava 4

Vučni motor

Vučni motor predstavlja osnovni i najvažniji pogonski element vučnog sistema jer u najvećoj meri određuje koncepciju elektrovučnog vozila. Glavni faktori koji utiču na izbor vučnog motora su:

- način i opseg regulacije vučne sile,
- karakteristika pokretanja,
- stepena osetljivosti na varijacije napona u kontaktnoj mreži,
- način promene režima vuče u električno kočenje i obratno,
- složenost konvertora u pogonu vučnog motora,
- stepen korisnog dejstva,
- pouzdanost rada i učestanost pregleda u procesu održavanja.

Električna energija se mora na vozilu tako konvertovati da njene karakteristike budu najpovoljnije za napajanje vučnih motora. Sa druge strane vučni motori moraju biti tako odabrani da pri jednakoj snazi imaju najmanju težinu i zapreminu i da pri tom pružaju mogućnost energetski efikasnog regulisanja brzine.

U naizmjeničnim vučnim sistemima prvobitno je za vuču bio konstruisan i široko korišćen jednofazni komutatorski motor, čiji su najveći nedostaci bili posledica, transformatorskog dejstva statora na rotor, odnosno indukovano naizmjeničnog napona u namotajima rotora koji uzrokuje struje visokog intenziteta nakon spajanja odgovarajućih segmenata kolektora grafitnim četkicama.

Ove struje su bile ograničene jedino malim vrednostima omskog i induktivnog otpora u namotajima rotora i padom napona na četkicama što je bio