

SILE KOJE DELUJU NA VOZILO

Opšti pogled

Motorna i priključna vozila su pri svom kretanju izložena dejstvu različitih sila. Ove sile se razlikuju ne samo po karakteru i načinu dejstva, već i po uticajima koje izazivaju na kretanje vozila i njegove performanse.

Sile koje deluju na vozilo mogu biti: sila koja ostvaruje kretanje - vučna sila, sile otpora kretanju, inercione sile različitog porekla, sile koje potiču od vetra i drugih uticaja. Centri dejstva ovih sila, odnosno njihovih rezultanti, po pravilu su različiti i moraju se za svaki slučaj posebno utvrđivati.

Sa stanovišta uticaja na vozilo sile mogu biti međusobno različite. U ovom smislu treba, pre svega, razlikovati propulzivne sile, koje teže da ubrzaju vozilo i otporne sile koje se suprotstavljaju kretanju, odnosno koje teže da ga uspore.

"Obimna sila" na pogonskim točkovima označava se sa F_O i određena je izrazom

$$F_O = \frac{M_O}{r_d}$$

Pri ubrzanom kretanju motornog vozila na usponu (α) na vozilo deluju sledeće sile:

- uticaj zemljine teže tj. težine ($G = m \cdot g$),
- otpor kotrljanju (R_f),
- otpor vazduha (R_v),
- otpor savladavanja uspona (R_u),
- otpor priključnog vozila ili radni otpor (R_{pot}),
- sila inercije vozila (R_a),
- reakcije tla (X, Y, Z).

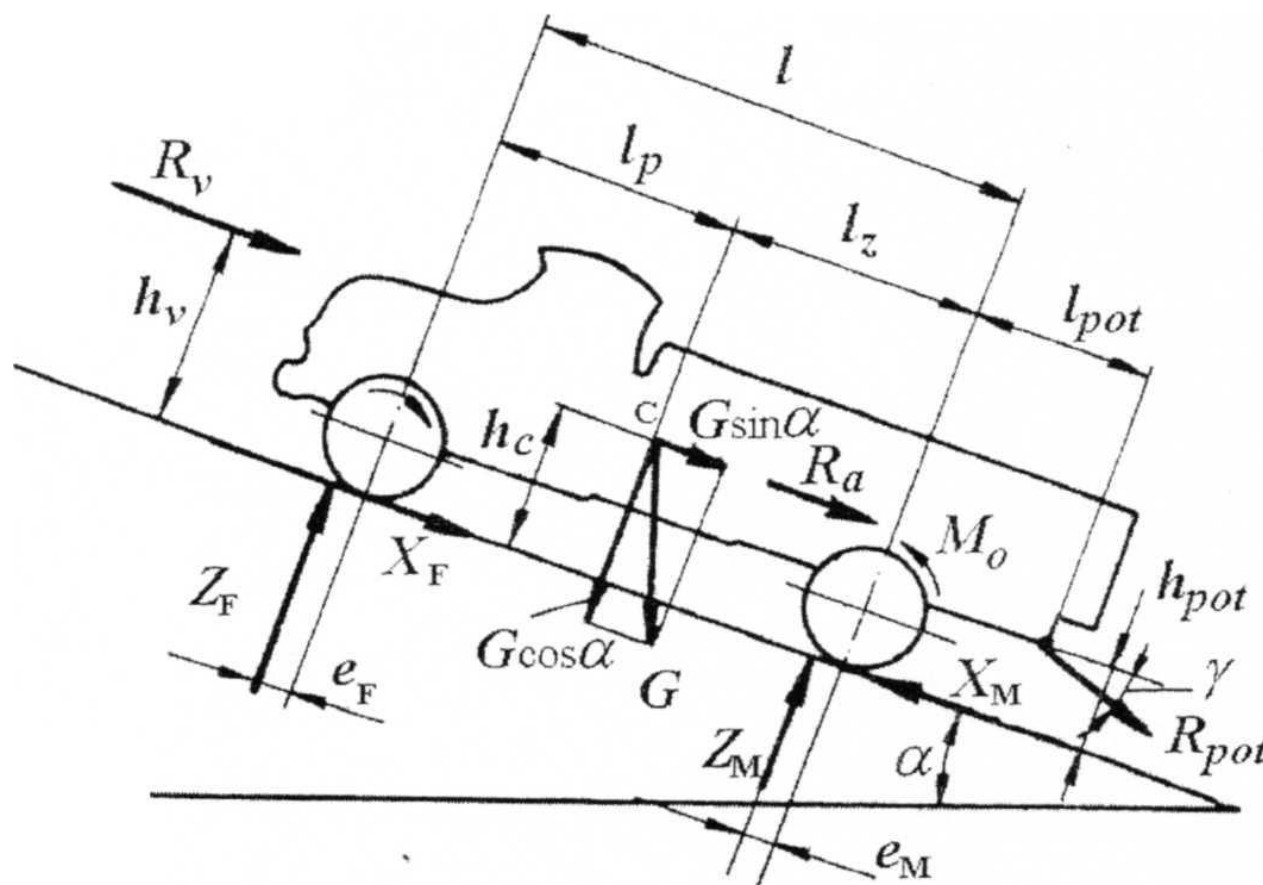
Pored ovoga treba razlikovati i različite bočne sile, koje prvenstveno teže da vozilo skrenu sa putanje po kojoj se kreće, tj. koje deluju na vozilo kao poremećaj, neposredno uticajan na opšte ponašanje vozila pri kretanju.

Valja da se istakne da u zavisnosti od uslova pod kojima se kretanje ostvaruje, jedna ista sila može imati različite uticaje na vozilo. Na primer, sila težine vozila (G) koja se javlja kao rezultat uticaja zemljine teže, a deluje u centru mase (C) vozila - težištu, odnosno njena komponenta, može biti propulzivna ako se vozilo kreće na padu, otporna ako se kreće na usponu i poremećajna ako se kreće na bočno nagnutom putu.

U spoju točka i tla u načelu u sva tri pravca deluju reakcije i to:

- normalna-radijalna (Z_M i Z_F) u pravcu z ;
- tangentna (X_M i X_F) u pravcu x ;
- bočna (Y_M i Y_F) u pravcu y .

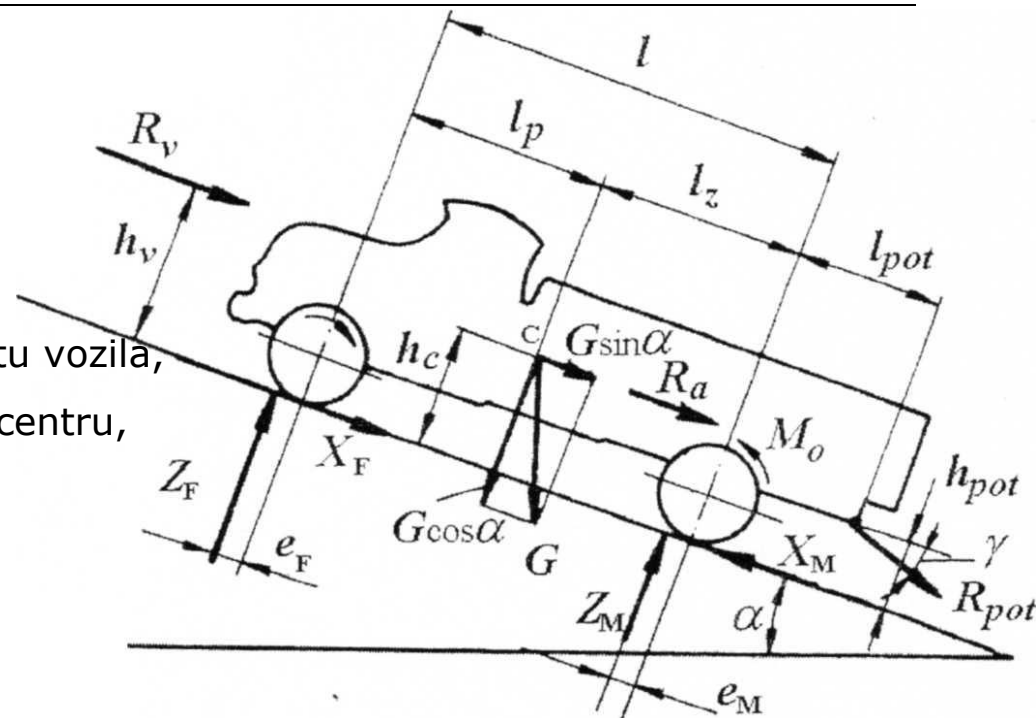
Ilustracije radi, na Slici 1 data je shema nekih karakterističnih sila koje deluju na jedno transportno vozilo u podužnoj ravni.



Slika 1

Oznake na Slici 1:

- $G = m \cdot g$ - ukupna težina vozila čija je napadna tačka u težištu C ,
- h_c, l_p, l_z - koordinate težišta vozila,
- R_a - otpor ubrzanja čija je napadna tačka u težištu vozila,
- R_v - otpor vazduha čija je napadna tačka u metacentru,
- h_v - koordinata metacentra,
- Z_M, Z_F - ukupne normalne reakcije tla na pogonskim i gonjenim točkovima,
- R_{pot} - otpor na poteznici,
- h_{pot}, l_{pot} - koordinate koje definišu napadnu tačku sile otpora na poteznici,
- γ - ugao koji zaklapa sila na poteznici sa horizontalom,
- l - osno rastojanje prednjih i zadnjih točkova,



Pored toga, na vozilo prilikom kretanja utiču i sledeći momenti:

- M_{fM}, M_{fF} - momenti otpora kotrljanja pogonskih i vučenih točkova,
- M_{aF} - moment inercijalnih sila vučenih točkova.

Masa i težina vozila

U težištu (C) vozila mase (m) deluje sila koja potiče od uticaja zemljine teže tj. težine vozila (G):

$$G = m \cdot g$$

gde je:

g - ubrzanje zemljine teže.

Ukupna masa vozila predstavlja zbir sopstvene mase (m_s) i mase korisnog tereta (m_k), tj.

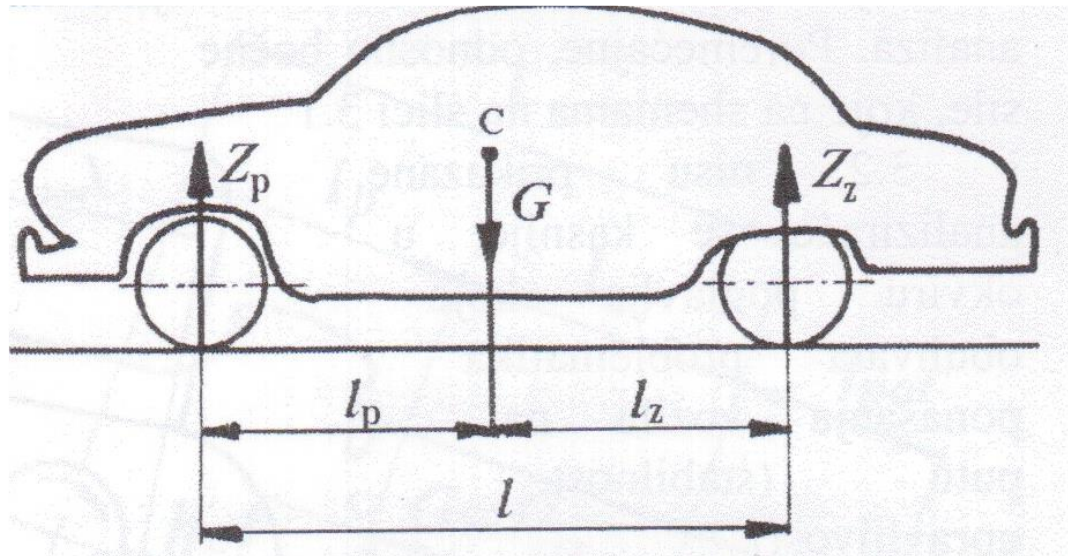
$$m = m_s + m_k$$

Kod radnih vozila ukupna eksploataciona masa m_e određena je zbirom sopstvene mase m_s i mase balasta m_b , tj.

$$m_e = m_s + m_b$$

Kao što je istaknuto, masa odnosno težina vozila različito utiče na njegovo kretanje. Povećavanjem mase, odnosno težine povećavaju se otpori kretanju (kotrljanju, uspinjanju i ubrzavanju), ali se potencijalno omogućavaju veće sile, pa time i povoljnije vučne karakteristike.

Treba da se ukaže na raspodelu ukupne mase, odnosno težine vozila na tlo, tj. na položaj težišta, pošto ovo bitno utiče na ukupne performanse vozila. Razmotrićemo vozilo na točkovima i to za slučaj kada se nalazi u miru, tj. kada se ne kreće (tzv. statička opterećenja osovina ili mostova, za razliku od dinamičkih koja se javljaju pri kretanju).



Slika 2

Kada vozilo stoji nepokretno na horizontalnom putu, statička opterećenja mostova, odnosno normalne reakcije tla određene su, prema Slici 2, izrazima:

$$G_{pst} = Z_p = G \cdot \frac{l_z}{l}$$

$$G_{zst} = Z_z = G \cdot \frac{l_p}{l}$$

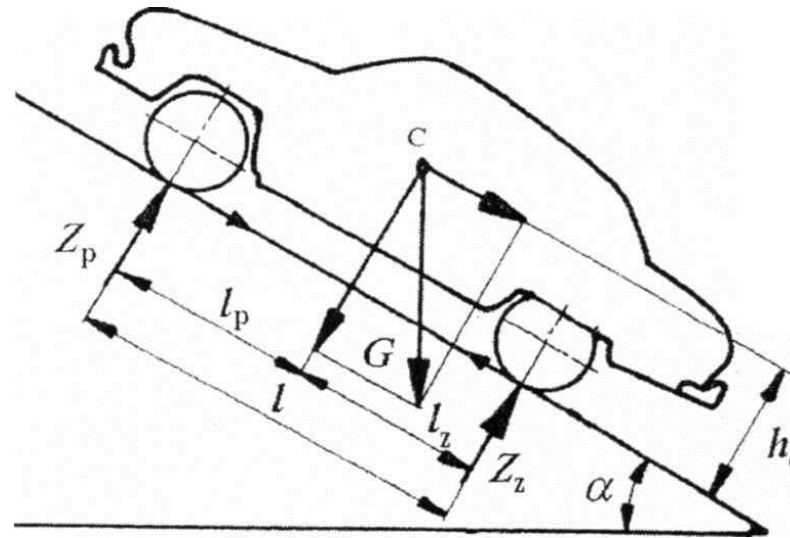
jer je

$$G_{st} = G_{pst} + G_{zst} = Z_p + Z_z$$

Ovde je:

- G_{pst} i G_{zst} - statičko opterećenje prednjeg i zadnjeg mosta,
- Z_p i Z_z - normalne statičke reakcije tla prednjeg i zadnjeg mosta,
- l_p i l_z - rastojanje težišta vozila od ose prednjih, odnosno zadnjih točkova u uzdužnoj ravni,
- l - osno rastojanje prednjih i zadnjih točkova.

Ako se vozilo nalazi na uzdužno nagnutom putu, tj. na putu sa padom ili usponom (na nizbrdici ili uzbrdici), raspodela težine po osovinama se menja, tj. menjaju se statička opterećenja mostova.



Slika 3

Prema Slici 3 statička opterećenja prednjeg i zadnjeg mosta u ovom slučaju su određena izrazima:

$$Z_p = G_{pst} = G \cdot \cos \alpha \cdot \frac{l_z}{l} \pm G \cdot \sin \alpha \cdot \frac{h_c}{l} = \frac{G}{l} \cdot (l_z \cdot \cos \alpha \pm h_c \cdot \sin \alpha)$$

$$Z_z = G_{zst} = G \cdot \cos \alpha \cdot \frac{l_p}{l} \pm G \cdot \sin \alpha \cdot \frac{h_c}{l} = \frac{G}{l} \cdot (l_p \cdot \cos \alpha \pm h_c \cdot \sin \alpha)$$

gde je:

h_c - visina težišta vozila.

Izrazi važe za slučaj da vozilo stoji na nizbrdici (gornji znaci) ili na uzbrdici (donji znaci).

Položaj težišta predstavlja jednu od osnovnih konstrukcijskih karakteristika svih vozila. Na njega u velikoj meri utiče ne samo koncepcija vozila, već i samo konstrukcijsko rešenje. Posebno treba da se ukaže da se položaj težišta kod svih vozila menja u zavisnosti od korisnog opterećenja, broja putnika, postojanja dodatnog balasta ili prikijučnog oruđa (kod radnih vozila), itd. Zbog toga je jedini ispravan način da se koordinate težišta za svako vozilo neposredno odrede analitički, ili još bolje eksperimentalno.

Radi opšte orijentacije, u Tablici T.1 navedene su prosečne vrednosti koordinata težišta za više karakterističnih vrsta vozila na točkovima. Napominje se da ove podatke treba primiti kao strogo orijentacione, s obzirom da ima dosta vozila kod kojih koordinate težišta i znatnije odstupaju od navedenih.

Tabela T.1

Vrsta vozila	$\frac{l_p}{l} = \frac{G_{zst}}{G}$	h_c [m]
Putnička, prazna	0.45 - 0.55	0.45 - 0.60
Putnička, opterećena	0.50 - 0.57	0.50 - 0.65
Teretna, prazna	0.50 - 0.55	0.65 - 0.90
Teretna, opterećena	0.70 - 0.75	0.85 - 1.10
Autobusi, opterećeni	0.45 - 0.55	0.80 - 0.1
Vojna vozila, specijalna		0.80 - 1.00
Trkačka vozila		0.35 - 0.45
Motocikli sa vozačem	0.55 - 0.45	0.40 - 0.60
Skuteri	0.80	0.40
Traktori na točkovima	0.60 - 0.65	0.65 - 0.80

Otpor kotrljanja

Otpor kotrljanja je jedan od najznačajnijih i uvek prisutnih otpora kretanja vozila. Osnovni pojmovi o otporu kotrljanja već su dati u okviru analize procesa kotrljanja kretača, i to za različite vrste tla. Objašnjeno je, naime, da se otpor kotrljanja izražava u obliku

$$R_f = R_{fF} + R_{fM} = \frac{M_{fF}}{r_d} + \frac{M_{fM}}{r_d}$$

Kako je moment otpora kotrljana određen izrazom:

$$M_{fF} = Z_F \cdot e_F$$

$$M_{fM} = Z_M \cdot e_M$$

dobija se:

$$R_f = Z_F \cdot \frac{e_F}{r_d} + Z_M \cdot \frac{e_M}{r_d} = Z_F \cdot f_F + Z_M \cdot f_M$$

Kako se obično usvaja:

$$f = f_F \cong f_M$$

biće:

$$R_f = (Z_F + Z_M) \cdot f$$

Za slučaj kretanja vozila na usponu iz $\Sigma Z = 0$ dobija se:

$$Z_F + Z_M = m \cdot g \cdot \cos \alpha$$

pa je

$$R_f = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha = G \cdot f \cdot \cos \alpha$$

odnosno u slučaju kretanja na horizontalnom putu:

$$R_f = G \cdot f$$

Gornji izraz približno važi za sve uslove kretanja, odnosno sve moguće procese kotrljanja točka.

U slučaju najvećih pojednostavljenja, usvaja se da je koeficijent otpora kotrljanja konstantna veličina i zavisi isključivo od vrste kretača (točak sa pneumatikom ili gusenica) i vrste tla. Ovo je veoma čest slučaj u orijentacionim analizama performansi vozila. Otuda i veoma mnogo empirijskih podataka koji se navode za veličinu koeficijenta otpora kotrljanja tretiranih na ovaj način. U Tabeli T.2. dat je pregled prosečnih vrednosti koeficijenta otpora kotrljanja, koje se navode u različitim izvorima.

Tabela T.2

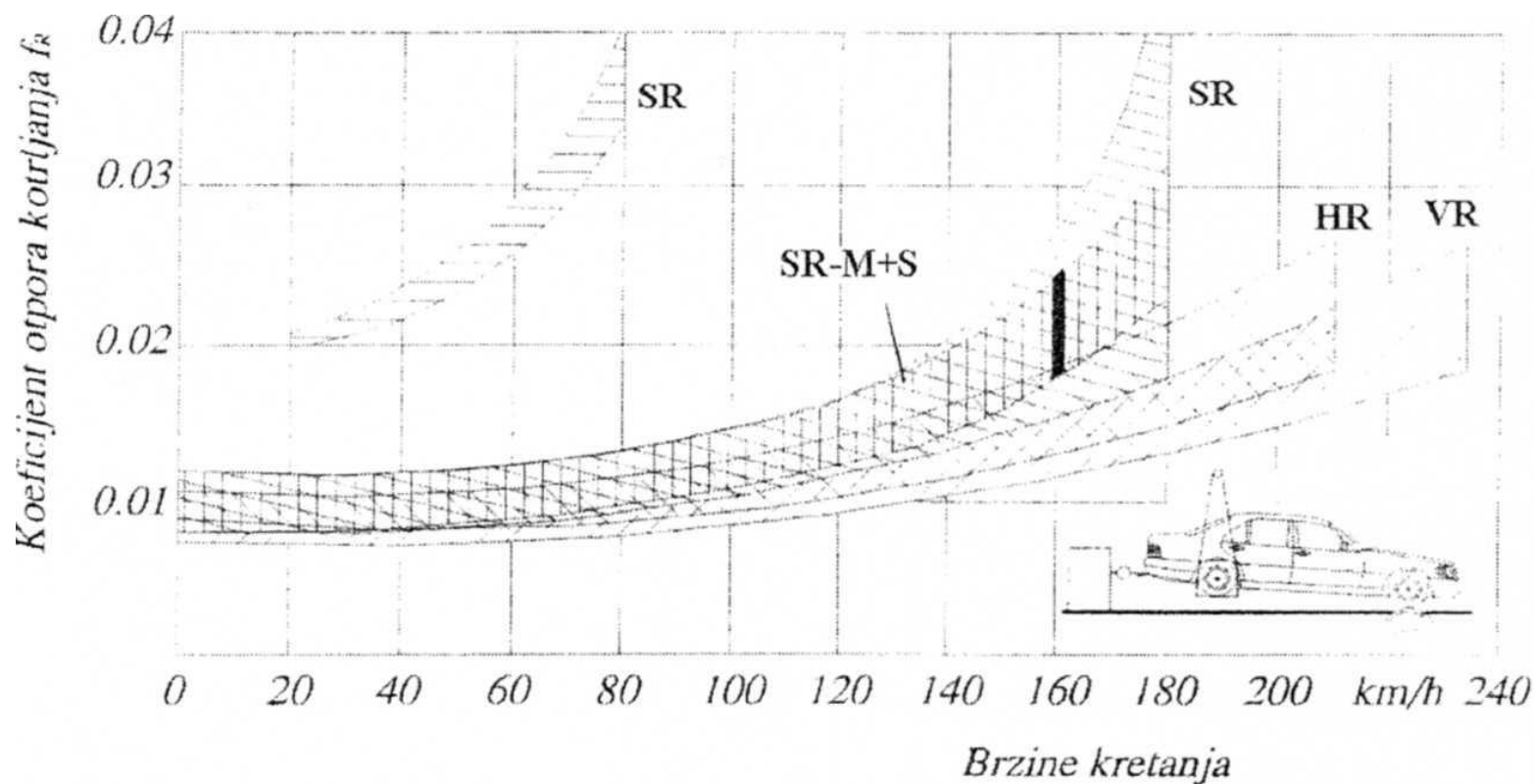
Vrsta i stanje podloge	Točak	Gusenica
Asfalt, odličan	0.010 - 0.018	
Asfalt, prosečan	0.018 - 0.020	
Asfalt, loš	0.020 - 0.023	
Beton, odličan	0.011 - 0.020	
Beton, loš	0.020 - 0.030	
Makadam, odličan	0.013 - 0.018	
Makadam, prosečan	0.018 - 0.023	
Makadam, loš	0.023 - 0.040	
Zemljani put, utaban	0.025 - 0.035	0.050 - 0.070
Zemljani put, prosečan	0.050 - 0.080	
Zemljani put, loš (blato)	0.160 - 0.200	0.100 - 0.150
Pesak, vlažan	0.150 - 0.300	0.100 - 0.150
Strnjika	0.080 - 0.100	0.060 - 0.080
Oranica	0.120 - 0.180	0.080 - 0.100
Polje pripremljeno za setvu	0.160 - 0.180	0.090 - 0.120
Utaban put na snegu	0.030 - 0.040	0.060 - 0.070

Za tačnije analize potrebno je ići na preciznije određivanje veličine koeficijenata otpora kotrljanja. Eksperimentalni metod je i ovde najbolji, a ako to nije moguće, onda bar treba ići na empirijske izraze koji otpor kotrljanja detaljnije opisuju, respektujući veći broj uticajnih činilaca.

Pri sporom kretanju vozila koeficijent otpora kotrljanja ne zavisi od brzine kretanja, tj.

$$f = \text{const.}$$

Pri kretanju većim brzinama po ravnom tlu i putevima, koeficijent otpora kotrljanja raste u zavisnosti od brzine (Slika 5).



Slika 5

Vrednost koeficijenta otpora kotrljanja za pneumatike putničkih vozila. Merenja su izvršena pomoću čeličnog valjka prečnika 2 m, u određeno vreme i pri nazivnom pritisku, za brzinu kretanja od 160 km/h. Područja svih dobijenih izmerenih veličina se odnose na pneumatike bez unutrašnje gume različitih proizvođača, za prečnike naplatka 12"-16" i za profile sa punom dubinom šare na uobičajenom naplatku. Prvo slovo skraćenica označava dozvoljeno područje brzine kretanja: S do 180. H do 210, V preko 210 km/h. Druga oznaka označava vrstu pneumatika: R - radijalni pneumatiki, M+S - pneumatiki za blato i sneg.

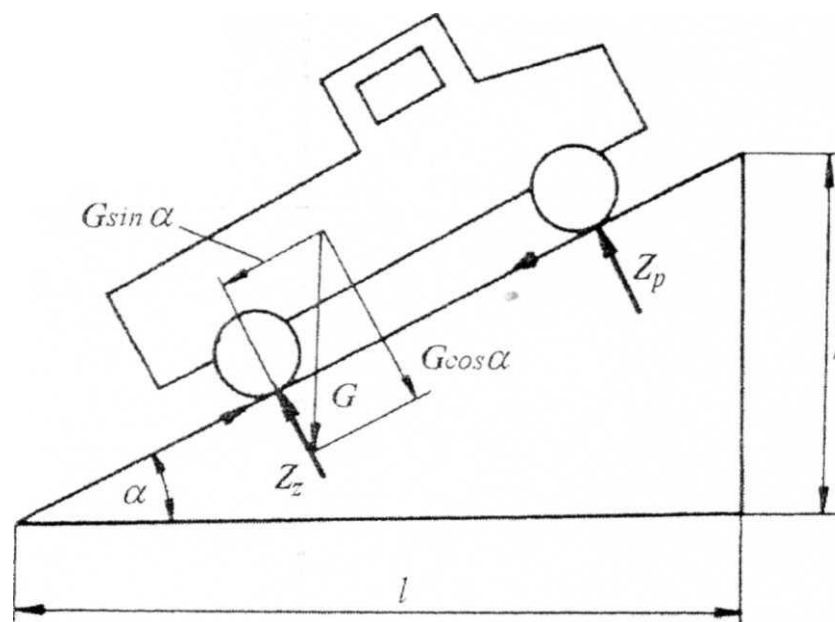
U najvećem stepenu koeficijent otpora kotrljanja zavisi od konstrukcijskih karakteristika pneumatika (broja slojeva, rasporeda niti korda, debljine i stanja protektora). Smanjenje broja slojeva korda debljine protektora, kao i primena sintetičkih materijala sa malim histerezisnim gubicima, utiču na snižavanje koeficijenta otpora kotrljanja.

Ispitivanja su pokazala da pri kretanju vozila sa brzinom do 50 km/h koeficijent otpora kotrljanja se može usvojiti da je konstantan. Intenzivno njegovo povećanje se javlja pri brzini kretanja većoj od 100 km/h.

Svi empirijski izrazi posebno uvažavaju uticaj brzine kretanja na koeficijent otpora kotrljanja točka. Ovo je posebno izraženo pri većim brzinama kretanja. Pored toga, značajan uticaj na koeficijent otpora kotrljanja ima i unutrašnji pritisak u pneumatiku, a i temperatura pneumatika.

Otpor savladavanja uspona

U slučaju kada se vozilo kreće po putu sa usponom, njegovom kretanju suprotstavlja se otpor savladavanja uspona R_u koji zavisi od mase, odnosno težine vozila i ugla uspona. Ovaj otpor predstavlja komponentu sile težine G , paralelan je sa površinom puta, a suprotnog je smera u odnosu na smer kretanja.



Slika 6

Na osnovu Slike 6 otpor uspona određen je izrazom:

$$R_u = m \cdot g \cdot \sin \alpha = G \cdot \sin \alpha$$

Druga komponenta težine $G \cos \alpha$ koja je normalna na površinu puta, pritiska vozilo uz tlo, tako da utiče na veličinu otpora kotrljanja.

Treba da se istakne da se nagib puta (kako uspon tako i pad) obično izražava ne preko sinusa ugla nagiba, već preko vrednosti tangensa ugla tj. "u" (uspon) $\operatorname{tg} \alpha$ ili još češće u procentima, tj.:

$$"u" (\text{uspon}) [\%] = 100 \cdot \operatorname{tg} \alpha = 100 \cdot \frac{h}{l}$$

U slučaju malih vrednosti ugla uspona, tj. za uglove do oko 10 -12°, može se bez veće greške usvojiti daje:

$$\operatorname{tg} \alpha \approx \sin \alpha$$

Neophodno je da se naglasi da u slučaju kada se radi o većim uglovima uspona ova predhodna aproksimacija može da dovede do znatne greške.

Ponovo se ističe da u slučaju kretanja vozila niz nagnuti put, komponenta težine $G \cdot \sin \alpha$ deluje u pravcu kretanja tj. da težina dobija karakter propulzivne sile.

Veličina koeficijenta otpora kotrljanja i nagiba puta su osnovni parametri koji definišu karakteristike puta sa stanovišta otpora kretanju. Zato se često govori o ukupnom otporu puta R_{ψ} , koji je definisan izrazom:

$$R_{\psi} = R_f + R_u = (G \cdot f \cdot \cos \alpha + G \cdot \sin \alpha)$$

ili

$$R_{\psi} = G \cdot (f \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) = G \cdot \psi$$

gde je:

$\psi = f \cos \alpha + \sin \alpha$ - koeficijent ukupnog otpora puta.

U Tabeli T.4 dati su usponi na putevima.

Tabela T.4

1. Putevi povezani sa izgrađenim oblastima		
Projektovana brzina (km/h)	Dozvoljen uspon (%)	Klasifikacija puta
40	10.0	Kružni putevi
60	6.5	Putevi opšte namene
80	5.0	Savezni putevi
100	4.5	Savezni autoputevi
120	4.0	
140	4.0	

2. Gradski putevi	
Klasifikacija puta	Dozvoljen uspon (%)
Putevi sa dve ili četiri trake, bez nadgradnje u industrijskom području	5(7)
Putevi sa dve trake u stambenom području	6(10)
Sporadni putevi u stambenom podrucju	10(12)
Lokalni putevi, pogodni za vožnju	10(15)

3. Najveći uspon za puteve u Alpima	
Klasifikacija puta	Dozvoljen uspon (%)
Planinski put	30

Otpor vazduha

Kako se svako kotrljanje po tlu, pa i kretanje vozila, ostvaruje u vazdušnoj sredini tj. atmosferskom prostoru, njemu se suprotstavljaju određene sile otpora koje se obuhvataju pojmom otpora vazduha. Otpor vazduha predstavlja rezultat složenih aerodinamičkih pojava sredine u kojoj se vozilo kreće, te prema tome on predstavlja rezultujuću silu većeg broja komponenata.

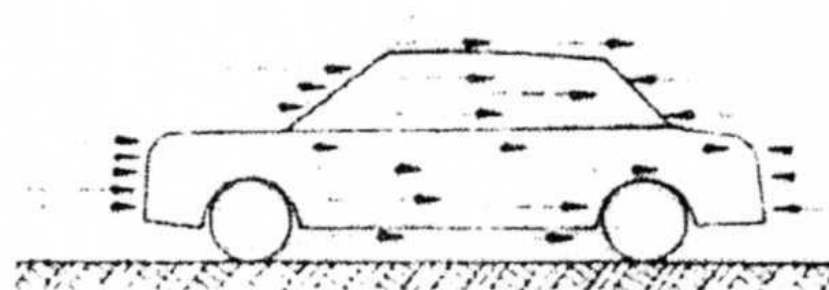
Opstrujavanje nekog tela može se i slikovito prikazati što je na Slici 7 i dato za jedno putničko vozilo. Ova vozila su karakteristična i po tome što se izrazito opstrujavanje vazduha javlja i između poda vozila i tla.

Spoljašnjem opstrujavanju pridodaje se i unutrašnje prostrujavanje koje se javlja zbog hlađenja pogonskog agregata i klimatizacije - ventilacije putničkog prostora.

a)



b)



Slika 7

- a) Slika strujanja vozila sa spoljašnjim opstrujavanjem (pune linije) i unutrašnjim prostrujavanjem (isprekidane linije).
- b) Formiranje otpora usled vrtloženja (strelice sa punom linijom) i usled trenja u graničnom sloju (strelica sa isprekidanim linijama).

Osnovne komponente otpora vazduha potiču od vrtloženja, tj. od razlike pritisaka na prednjem i zadnjem delu vozila, kao i od trenja u graničnom sloju između čestica vazduha i površine vozila. Kako komponenta otpora vazduha od vrtloženja uglavnom zavisi od oblika tela, to se ovaj otpor naziva otpor oblika, dok komponenta otpora vazduha usled trenja u graničnom sloju zavisi uglavnom od veličine površine i njene glatkoće, pa se ovaj otpor naziva otporom trenja. Udeo vrtloženja i stvaranja ukupnog otpora vazduha je daleko veći i on u stvari definiše vrednost ukupnog otpora vazduha.

Na osnovu prethodnog može se reći da se dovedena energija telu za njegovo kretanje u vazdušnoj sredini troši jednim delom na obrazovanje vrtloga u struji vazduha, pretvarajući se u kinetičku energiju stvorenih vrtloga, a delimično i na trenje, pretvarajući se u toplotnu energiju.

Na osnovu teorijskih analiza i rezultata ispitivanja, otpora vazduha R_v se približno određuje preko sledećeg analitičkog izraza:

$$R_v = C_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot V_r^n$$

gde je:

C_x - koeficijent otpora vazduha,

A - čelna površina vozila,

ρ - gustina vazduha,

V_r - relativna brzina vozila definisana izrazom: $V_r = V \pm V_v$, pri čemu je V brzina kretanja vozila, a

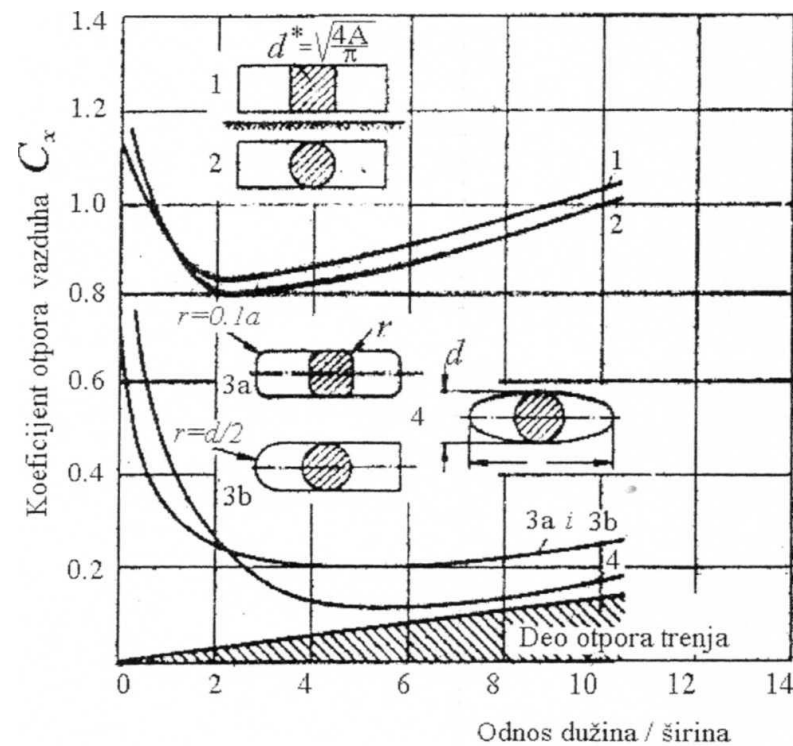
V_v komponenta brzine vetra u pravcu kretanja (u vučnim proračunima se usvaja $V_v = 0$),

n - eksponent brzine; na osnovu rezultata ispitivanja usvaja se da je brzina

od 1 do 330 m/s $n = 2$.

Koeficijent otpora vazduha C_x zavisi od ugla opstrujavanja, a izrazito od oblika vozila.

Prethodni proračun ove aerodinamičke karakteristike za oblike složenijeg izgleda - kao što je motorno vozilo - još uvek nije moguće.



Slika 8

Na Slici 8 prikazana je zavisnost promene koeficijenta otpora vazduha C_x za različite oblike od odnosa dužina/širina.

Na osnovu ove zavisnosti može se zaključiti:

- zaobljenja na čeonj površini (tela 3 i 4) imaju znatno manji koeficijent otpora vazduha nego tela bez zaobljenja (1 i 2);
- aerodinamički oblikovan zadnji kraj tela može još da smanji C_x (telo 4 u odnosu na 3a);
- za male razlike u obliku tela (oblik 4 u odnosu na oblik 3b), sa jedne i velike razlike u obliku tela (oblik 3b u odnosu na 2) sa druge strane može se konstatovati da kod loše oblikovane čeone površine dobro oblikovan zadnji kraj samo neznatno smanjuje C_x , pošto je ispred strujanje manje i time uticaj aerodinamičkog kraja tela ostaje bez značaja;
- C_x zavisi od dužine tela. Uglasto telo 1 kod koga je $a = 0$ predstavlja ploču sa $C_x \approx 1.15$, ako se dužina poveća smanjuje se C_x , a po dostizanju minimuma, sa povećavanjem "a" - koeficijent otpora oblika, zbog rastućeg uticaja otpora trenja približno linearno raste.

Kod putničkih vozila, autobusa i kombi vozila je

$$a/b = (2.3 \text{ do } 3.1)$$

gde je :

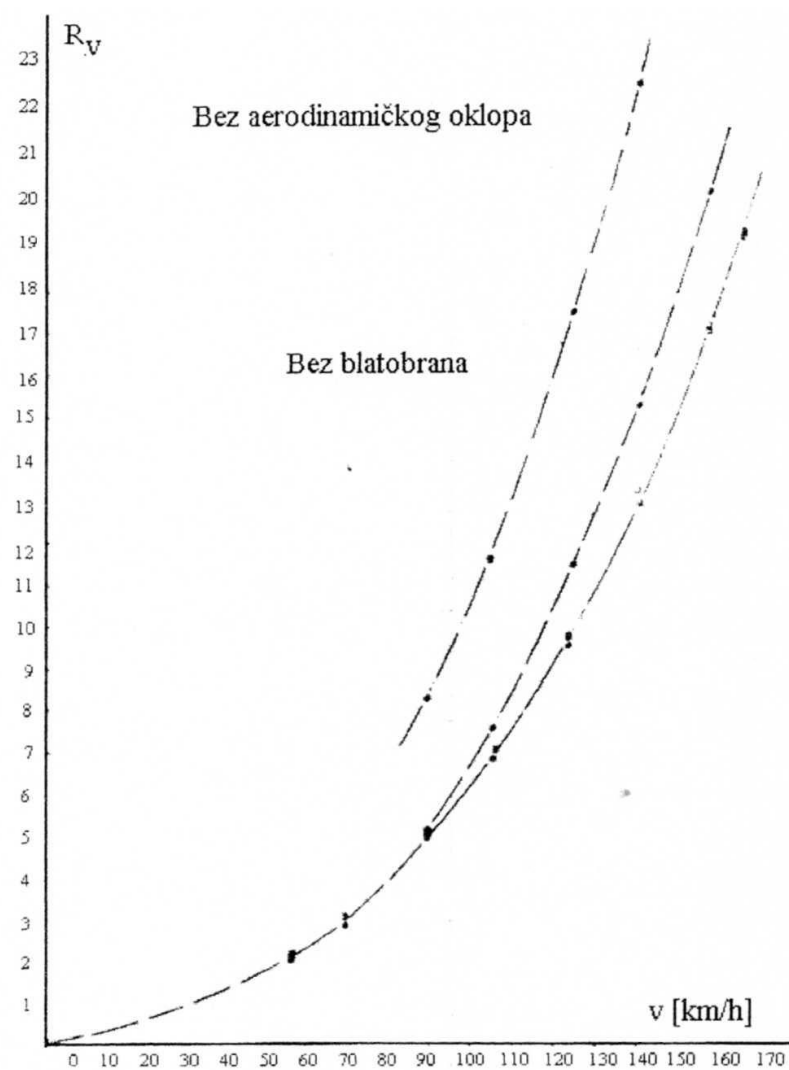
a - dužina vozila

b - širina vozila

Napadna tačka sile otpora vazduha se nalazi u tzv. metacentru čiji položaj zavisi od aerodinamičkog oblika. Zato tačan položaj metacentra može da se odredi samo eksperimentalnim putem. Pri uobičajenim vučnim proračunima, odnosno u cilju predviđanja performansi vozila, usvaja se da se metacentar nalazi na istoj visini kao i težište vozila. U najvećem broju slučajeva time se ne čini veća greška.

*Slika 9*

Koeficijent otpora vazduha C_x zavisi isključivo od oblika vozila, odnosno njegove karoserije, kabine, nadgradnje i sl. Zbog toga se koeficijent otpora vazduha određuje odgovarajućim ispitivanjima u aerodinamičkom tunelu, slično kako se to radi za letilica. Rezultati određivanja aerodinamičkog otpora kretanja motocikla TOMOS (Slika 9) prikazani su na dijagramu (Slika 10).



Slika 10

Posebni problemi se javljaju kada se posmatra vučni voz, dakle motorno vozilo spregnuto sa jednim ili više priključnih vozila. U ovim slučajevima se obično usvaja da je ukupni otpor vazduha vučnog voza jednak otporu vazduha vučnog vozila uvećanom za oko 15 do 30 %.

Rezultati brojnih eksperimentalnih istraživanja pokazuju da aerodinamički otpor predstavlja jednu od osnovnih komponenti ukupnog otpora kretanju autovozova, a pri brzinama većim od 80 km/h uticaj atmosferskog otpora je veći od svih drugih otpora kretanja. Zbog toga smanjenje aerodinamičkog otpora predstavlja veoma efikasno sredstvo za povećavanje gorivne ekonomičnosti.

Analizirajući aktuelna kretanja u ovom području u drugim zemljama dolazi se do zaključka da se i istraživanja obavljaju u dva pravca: razrađuju se kabine i karoserije sa poboljšanim aerodinamičkim karakteristikama, a i izrađuju se specijalni adaptacioni uređaji koji se postavljaju na postojeće konstrukcije nadgradnji. Ovaj drugi istraživački pravac je posebno naglašen. Danas već većina zemalja sa razvijenim automobilske industrije ima niz konstrukcija uređaja za smanjenje aerodinamičkog otpora teških vozila i autovozova.

Uređaji za smanjenje aerodinamičkog otpora postavljaju se ili na kabinu tegljača ili na prednji zid poluprikolice (nadgradnje). Njihov neposredni zadatak je da smanje čeonu površinu izloženu dejstvu vazduha, a posebno da poboljšaju aerodinamička svojstva ovih površina, u smislu povoljnijeg delovanja vazdušnih struja. Isto tako, korišćenjem ovih uređaja smanjuje se negativno dejstvo međuprostora između tegljača i poluprikolice, sa stanovišta vrtložnih strujanja i dejstva bočnog vetra. U izradi ovih uređaja široko se koriste polimerni i kompozitni materijali.

Pod čeonom površinom podrazumeva se površina projekcije vozila na ravan normalnu na uzdužnu osu vozila. Veličina čeone površine može da se odredi na više načina. Jedna od mogućnosti je direktno planimetrisanje odgovarajućeg konstrukcionog crteža u razmeri. Drugi način je primena tzv. "metode senke". U tom slučaju vozilo se osvetljava iz jednog svetlostog izvora tako da se dobiju približno paralelni zraci. Ovo je teško ostvariti veštačkim putem, a i korišćenje sunčeve svetlosti stvara praktično teškoće. Zato se koristi jedan jak izvor veštačke svetlosti na što je moguće većem rastojanju " a ". Pri tome se vozilo postavlja pred merni zastor na što manjem rastojanju " b ". Čeona površina vozila može da se tada izračuna na bazi planimetrisanja površine senke A_s preko izraza:

$$A = A_s \cdot \left(\frac{a}{a+b} \right)^2$$

Čeona površina može da se odredi i metodom direktnog merenja površine preseka vozila, pomoću specijalnih uređaja. U slučaju nemogućnosti eksperimenatalnog određivanja, za sprovođenje praktičnih proračuna, veličina čeone površine može da se proceni na osnovu empirijskih izraza.

Tako se za putničko vozilo preporučuje izraz:

$$A = (0.9 \div 0.95) \cdot b_p \cdot h$$

gde je:

b_p - razmak (trag) prednjih točkova,

h - visina vozila.

Manja vrednost u prethodnom izrazu uzima se za vozila kod kojih su čeone površine oblije, tj. čeona površina više odstupa od pravougaonog oblika.

Slično se za teretna vozila i autobuse preporučuje izraz:

$$A = (1.05 \div 1.1) \cdot b_p \cdot h$$

Drugi autori kao merodavnu veličinu posmatraju ukupnu širinu vozila (ne računajući isturene delove, retrovizore i sl.). U ovom slučaju se za putničko vozilo preporučuje:

$$A = 0.775 \cdot b \cdot h$$

gde je:

b - ukupna širina vozila,

h - visina vozila.

Za teretna vozila odgovarajući izraz glasi:

$$A = 0.9 \cdot b \cdot h$$

Pošto i koeficijent otpora vazduha i čeona površina vozila predstavljaju konstrukcijske karakteristike vozila, uobičajeno je da se one sumarno posmatraju, u obliku tzv. faktora aerodinamičnosti kA . Koeficijent k je pri tome tzv. redukovani koeficijent otpora vazduha, odnosno

$$k = C_x \cdot \frac{\rho}{2}$$

Na taj način otpor vazduha može da se izrazi u obliku:

$$R_v = kA \cdot V^2$$

koji se u praktičnim proračunima najčešće i koristi.

Prosečne vrednosti redukovanog koeficijenta otpora vazduha, prema različitim izvorima, date su u Tabeli T.5. I ovom prilikom se napominje da ovi podaci mogu da se koriste samo uz određene rezerve, pošto moguća odstupanja za pojedina vozila mogu da budu i relativno velika.

Tabela T.5

Vrsta vozila	$k \text{ [kg/m}^3\text{]}$
Putnička vozila, zatvorena uobičajene gradnje	0.20 - 0.35
Putnička vozila, posebno aerodinamički oblikovana	0.15-0.2
Putnička vozila, otvorena	0.4-0.5
Teretna vozila	0.6-0.7
Autobusi	0.3 - 0.4

Otpor ubrzanja

Pri svakoj promeni brzine pravolinijskog translatornog kretanja (ubrzanju ili usporenju) vozila, pojaviće se otpor ovoj promeni u vidu reakcije mase vozila, odnosno u vidu inercionih sila i inercionih momenata. Inercione sile pri tome potiču od translatornih masa - dakle od ukupne mase vozila, dok inercioni momenti predstavljaju rezultat ubrzanja obrtnih i translatorno oscilatornih masa motora i vozila. S obzirom da se inercioni momenti koji potiču od obrtnih masa vozila, odnosno odgovarajućih translatorno oscilujućih masa, direktno razvijaju na pogonskim točkovima, izazivajući odgovarajuće smanjenje pogonskog momenta, to je uobičajeno da se u otpor ubrzavanju računa samo inerciona sila translatornog kretanja vozila i inercioni momenti izazvani obrtnim masama koje su vezane za vučene točkove.

Sila inercije mase vozila $m = G/g$ pri pravolinijskom translatornom kretanju, odnosno otpor ubrzavanju ove mase R_a određen je izrazom:

$$R_a = m \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{G}{g} \cdot \frac{dV}{dt}$$

Napadna tačka sile otpora ubrzavanju mase vozila je težište vozila, a njen pravac je paralelan sa površinom puta, odnosno tla. Smer dejstva je suprotan smeru kretanja (pri usporavanju, tj. kočenju smer inercione sile se poklapa sa smerom kretanja).

Udeo obrtnih masa vozila u otporu ubrzavanja, uz napomenu da se inercija svih obrtnih delova u sistemu prenosa snage obuhvata odgovarajućim umanjnjem pogonskog momenta, svodi se na inercione momente vučenih točkova i obrtnih delova za njih neposredno vezanih (doboš ili disk kočnice, glavčine itd.). Ovaj moment je određen izrazom:

$$M_{aF} = J_{tF} \cdot \frac{d\omega_t}{dt}$$

gde je:

J_{tF} - moment inercije vučenog točka i pripadajućih obrtnih delova,

$\frac{d\omega_t}{dt}$ - ugaono ubrzanje.

Ovaj inercioni moment može da se prikaže u obliku:

$$M_{aF} = F_{aF} \cdot r_d$$

gde je:

F_{aF} – uslovna inerciona sila na obimu vučenih točkova, koja ima isti uticaj na kretanje vozila kao i moment M_{aF}

Tada je za oba točka:

$$F_{aF} = \frac{M_{aF}}{r_d} = J_{tF} \cdot \frac{d\omega_t}{dt} \cdot \frac{1}{r_d}$$

pošto je

$$\frac{d\omega_t}{dt} = \frac{1}{r_d} \cdot \frac{dV}{dt}$$

Prethodni izraz može da se napiše u obliku:

$$F_{aF} = \sum J_{tF} \cdot \frac{1}{r_d^2} \cdot \frac{dV}{dt}$$

Na osnovu toga, ukupni otpor ubrzanja vozila određen je izrazom:

$$R_a = \left(\frac{G}{g} + \frac{1}{r_d^2} \cdot \sum J_{tF} \right) \cdot \frac{dV}{dt}$$

U praktičnim proračunima je uobičajeno da se uticaj rotirajućih delova uzima u obzir preko koeficijenta δ , tako da se otpor ubrzanja određuje preko izraza:

$$R_a = m \cdot \delta \cdot \frac{dV}{dt}$$

Često se s obzirom na relativno malu vrednost ovog inercionog momenta on potpuno zanemaruje, tj. usvaja se da je koeficijent rotirajućih masa približno jednak jedinici, odnosno da je ukupni otpor ubrzanja jednak:

$$R_a = m \cdot \frac{dV}{dt}$$

Otpori priključnih vozila

Pri vuči prikolice pojavljuje se otpor na poteznici, koji u stvari predstavlja zbir otpora kretanju prikolice. U opštem slučaju kretanja bilo bi:

$$R_{pot} = R_f' + R_u' + R_a' + R_v'$$

gde je:

R_f' - otpor kotrljanju prikolice,

R_u' - otpor uspona prikolice,

R_a' - otpor ubrzanja prikolice,

R_v' - otpor vazduha prikolice,

R_{pot} - otpor na poteznici.

Prethodni izraz važi pod pretpostavkom da sila otpora na poteznici deluje u horizontalnoj ravni vučnog vozila. U protivnom bi trebalo uzeti u obzir i ugao nagiba poteznice u vertikalnoj ravni.

Otpori kretanju prikolice izračunavaju se na potpuno isti način kao i kod vozila. Izuzetak je jedino otpor vazduha R_v s obzirom na izmenjene uslove strujanja odnosno vrtloženja vazduha. Obično se R_v zanemaruje, a ovaj uticaj se kompenzuje, kako je već objašnjeno, povećanjem otpora vazduha vučnog vozila za 15-30%. U tom slučaju pri kretanju vučnog vozila konstantnom brzinom, biće na ravnom putu:

$$R_{pot} = R_f' = m' \cdot g \cdot f = G' \cdot f$$

gde je:

G - ukupna težina prikolice.

Pošto se, prema ranije rečenom, koeficijent otpora kotrljanja obično empirijski usvaja nezavisno od dimenzija pneumatika i pritiska u njemu, može se reći da je $f' = f$, pa je ukupan otpor kotrljanja vučnog vozila približno jednak:

$$R_{fuk} = R_f + R_{pot} = R_f + R_f' = f \cdot (m \cdot g + m' \cdot g) = f \cdot (G + G')$$

Struktura otpora kretanja vozila u karakterističnim uslovima korišćenja