

PRIMENA AERODINAMIČKIH KOČNICA NA VOZOVE

Dr Mirjana Puharić*

Institut Goša, Beograd

Dr Vojkan Lučanin

Mašinski fakultet, Beograd

Dr Slavica Ristić

Institut Goša, Beograd

Suzana Linić

Institut Goša, Beograd

Poslednjih godina jedan od najvećih problema u funkcionisanju železničkog saobraćaja u Srbiji je nedostatak garnitura kako elektromotornih, tako i dizel-motornih vozova, velika tehnička zastarelost postojećih, njihovi visoki troškovi eksploatacije i održavanja i nizak procenat raspoloživosti. Jaka konkurencija na tržištu transportnih usluga u putničkom saobraćaju uslovljava da Železnice Srbije, ukoliko žele da povećaju udeo železnice u podeli po vidovima prevoza, moraju poboljšati kvalitet prevozne usluge kroz bolju organizaciju prevoza putnika uz nabavku kvalitativno boljih i modernijih vozničkih sredstava. U cilju poboljšanja kvaliteta i ekonomičnosti prevozne usluge, generalno opredeljenje Železnica Srbije je da se za organizaciju regionalnog i lokalnog putničkog saobraćaja koriste motorne garniture (elektromotorne i dizel-motorne). Takođe, grad Beograd planira nabavku elektromotornih garnitura za gradsko-prigradski saobraćaj. U radu su prikazani određeni problemi u eksploataciji električnih i dizel-motornih vozova serija: ŽS 412/416, BR 481, MAV 5342, DB 403 (ICE3), DB 411 (ICE-T), MAV 6341. Za održavanje električnih i dizel-vozova neophodno bi bilo izvršiti detaljnu analizu koja bi dala prava rešenja, shodno planiranim kapacitetima kako novih garnitura, tako i postojećih koje obavljaju gradsko-prigradski i regionalni saobraćaj na mreži pruga Srbije.

Ključne reči: železnica, eksploatacija, električni vozovi, dizel-vozovi, održavanje

UVOD

Na brzim vozovima današnjice, pored konvencionalnih kočnica koriste se i aerodinamičke kočnice kao dodatni kočioni sistem, koji treba da omogući smanjivanje brzine kretanja voza u slučajevima vanrednog stanja ili u slučaju da električni kočioni sistem otkáže. Prva primena aerodinamičkog kočionog sistema bila je na Japanskom magnetno-lebdećem vozu Maglev. Ministarstvo saobraćaja Japana je proglasilo ovaj projekat nacionalnim interesom i odobrilo izgradnju nove test pruge nedaleko od Tokija na kojoj bi se konačno potvrdila praktična upotreba Maglev tehnologije u brzom transportu robe i putnika. Yamanashi Maglev test-pruga se prostire se na dužini od 18,7 km između gradova Sakaigawa i Akiyama u oblasti Yamanashi. Na ovoj pruzi, između ostalog, vršeni su testovi

kočionog sistema na vozu Maglev, kod koga je aerodinamički kočioni sistem korišćen kao jedan element mehaničkog rezervnog sistema za kočenje [1].

Aerodinamičke kočnice, koje su u suštini hidraulički pokretani aerodinamički kočioni paneli, postavljaju su na krov voza. Za razliku od disk kočnica na točkovima i kliznih frikcionih kočnica sa papučama, koje deluju u resoru mehaničkog trenja kao sile kočenja, aerodinamička kočnica je sistem koji je dizajniran da generiše silu kočenja povećanjem aerodinamičkog otpora pomoću otvorenih panela postavljenih na krovu kola. Ovaj sistem ima visoku pouzdanost i smanjene troškove održavanja, jer nema habanja komponenti niti grejanja zbog trenja. Pošto se aerodinamički otpor povećava proporcionalno kvadratu brzine, ovaj sistem pokazuje odlične performanse posebno u rasponima velikih brzina.

* Institut Goša, Beograd, Milana Rakića 35; miramo@neobel.net

na. Zbog toga su aerodinamičke kočnice klasifikovane kao kočnice za velike brzine, koje se koriste kao deo pomoćnog sistema za kočenje u hitnim slučajevima kada električne kočnice otkazu [2].

Zbog navedenog, aerodinamičke kočnice moraju biti tako dizajnirane da ih je moguće pokrenuti čak i kada je rezervni izvor napajanja isključen ili kada rezervni upravljački uređaj otkáže.

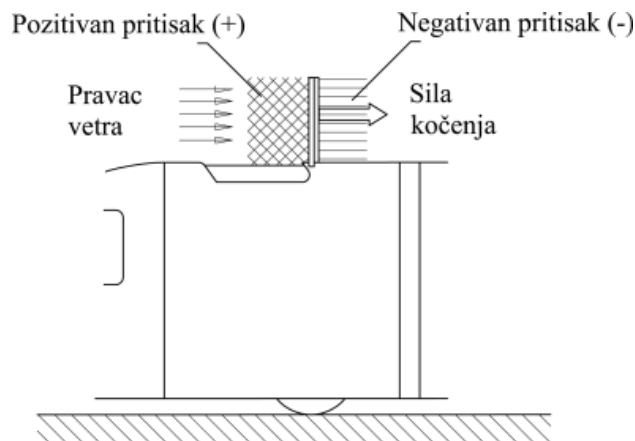
PRINCIP RADA AERODINAMIČKIH KOČNICA

Sistem aerodinamičkih kočnica je dizajniran u obliku panela, koji je postavljen na krov vagona, na po jednoj poziciji na svakom vagonu. Kočioni sistem je dizajniran tako da se u slučaju nužde aerodinamički panel za kočenje podigne, čime se povećava projektovana frontalna površina i aerodinamički otpor, što proizvodi željenu silu kočenja. Otvaranjem panela upravljaju hidraulični cilindri, koji se napajaju akumulatorima postavljenim na svakom aerodinamičkom sistemu za kočenje. Budući da je ova hidraulička sila predviđena za upotrebu samo u hitnim slučajevima, potreban hidraulički pritisak se obezbeđuje iz hidraulične pumpe postavljene na svakim kolima. Zatvaranje aerodinamičkih kočnica se izvodi nakon zaustavljanja voza.

Princip generisanja sile kočenja

Kada je aerodinamička kočnica u izvučenom položaju, kočioni panel blokira struju vazduha i ispred njega se javlja nadpritisak. Iza kočionog panela se javlja područje negativnog pritiska, generisanog usled odvajanja strujanja iza ploče. Usled razlike pritisaka sa prednje i zadnje strane panela kočnice, javlja se sila normalna na površinu panela. Osim normalne, javlja se i tangencijalna sila kao posledica površinskog trenja, koja je zanemarljivo mala prema normalnoj sili. Kao rezultat toga, sila otpora deluje na panel i služi kao sila kočenja. Slika 1. pokazuje princip generisanja aerodinamičke sile kočenja.

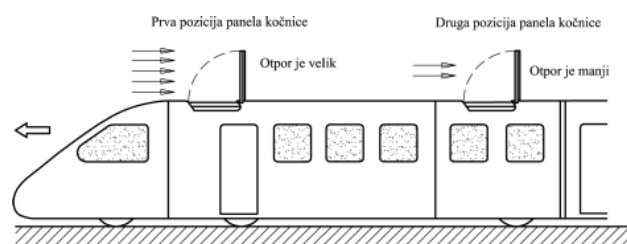
U slučaju strujanja preko ravne ploče, postavljene pod uglom u odnosu na pravac strujanja, strujna slika se menja u zavisnosti od postavnog ugla ploče. Za sve postavne uglove koji su veći od 100, tangencijalna sila se zanemaruje. Za uglove do 360, strujanje je još uvek priljubljeno za zadnju stranu panela (gornjaka). Na krajevima ploče će se javiti slobodni vrtlozi koji iza



Slika 1. Princip generisanja sile kočenja aerodinamičke kočnice

ploče formiraju vrtložnu brazdu. Pored otpora nastalog usled različitih pritisaka između prednje i zadnje strane panela, javlja se i pojava indukovano otpora. Pri uglovima većim od 360, dolazi do potpunog odvajanja strujanja od zadnje strane panela i stvaranja "mehura" intenzivnog vrtložnog strujanja iza ploče. Pri tome dolazi do naglog pada koeficijenta otpora, jer je pri potpunom odcepljenju, smanjenje indukovano otpora veće od povećanja profilnog otpora. Pri promeni ugla od 400 do 500, menja se priroda brazde iza ploče. Sa povećanjem ugla dolazi do rasta mehura iza panela, tako da pri uglu od 900, mehur ima veći poprečni presek od kočnice, i dodiruje trup voza na udaljenosti 3L iza šarnirne ose kočnice (L visina kočnice) [3,4].

U slučaju aerodinamičkih kočnica postavljenih na nekoliko pozicija, kočioni paneli koji su postavljeni na prvoj poziciji stvaraju najveći otpor, dok se na panelima na drugoj i narednim pozicijama, veličina otpora smanjuje, a samim tim i njihov doprinos ukupnoj sili kočenja. Ovo je izazvano činjenicom da se vazdušne strujnice odcepljuju na prvoj kočnici tj. prvim panelom su dignute na gore. Ova pojava se zove efekat serijske interferencije. Na slici 2. ilustrovan je princip delovanja serijske interferencije [1,5,8].



Slika 2. Efekti serijske interferencije

Dizajn aerodinamičkih kočnica

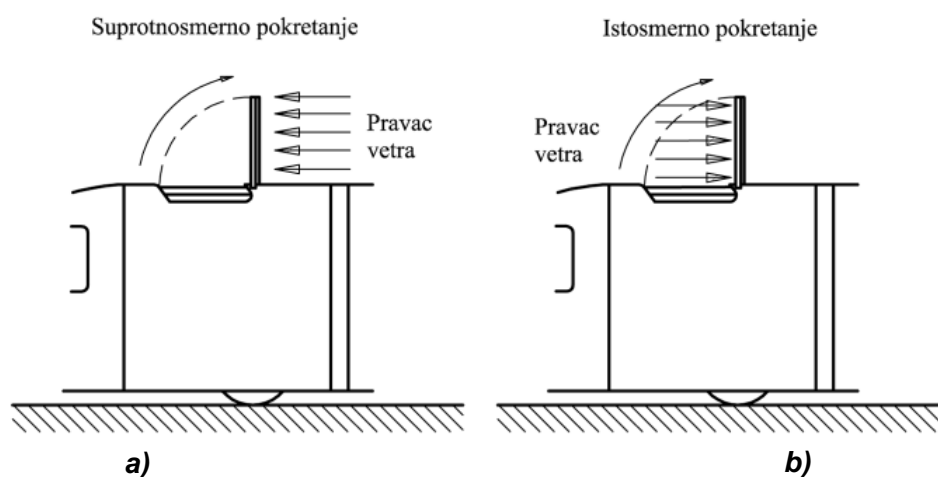
Kada govorimo o primeni ovih kočnica, treba imati u vidu sledeće karakteristike aerodinamičkog sistema kočenja kod vozova:

1. Bidirekcionalni dizajn - aerodinamički kočioni sistem treba da je dizajniran tako da bude operativan u oba smera, napred i nazad, jer voz treba da menja smer kretanja.
2. Uticaj težine - budući da je aerodinamički kočioni sistem dizajniran kao deo pomoćnog sistema za kočenje u hitnim slučajevima, a ne kao kočnica koja se stalno koristi, normalno je

da predstavlja balast. Kako bi se smanjila težina, ceo kočioni sistem se izrađuje od materijala koji imaju manju težinu. Na primer kod Japanskog voza Maglev, hidraulični akumulatori su izrađeni od titana, a pokretač od aluminijuma.

Uzimajući u obzir date operativne zahteve, pokretanje aerodinamičke kočnice se može klasifikovati u dve grupe:

- suprotnosmerno pokretanje - otvaranje kočnice suprotno pravcu delovanja struje vazduha, slika 3a
- -istosmerno pokretanje - otvaranje kočnice u pravcu delovanja struje vazduha, slika 3b.



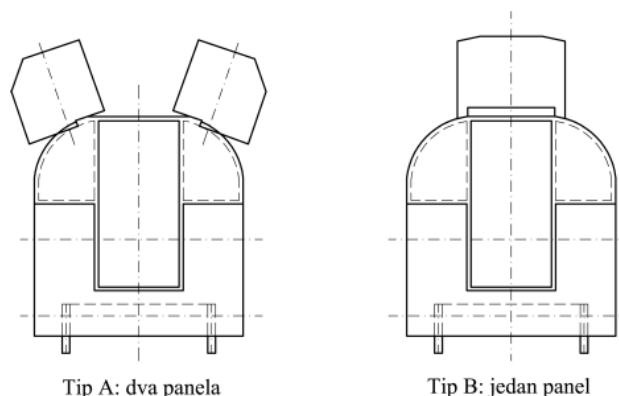
Slika 3. Suprotnosmerno i istosmerno pokretanje panela kočnice

Imajući u vidu da kočnica koja je postavljena na prvom mestu ima najveći otpor, neophodno je smanjiti verovatnoću nastanka kvara na tom položaju koliko god je to moguće. Zbog toga, uzimajući u obzir da je kod istosmernog pokretanja manja verovatnoća javljanja otkaza, i da je doprinos sile kočenja najveći upravo na prvom i drugom panelu, aerodinamičke kočnice na prvoj i drugoj poziciji su osmišljene da budu sa istosmernim pokretanjem.

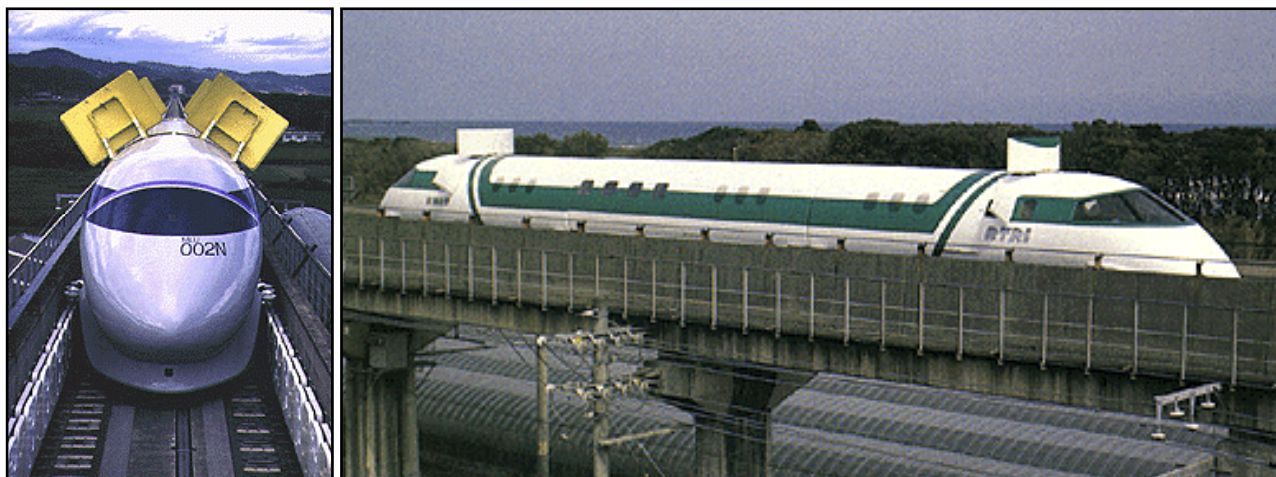
Struktura aerodinamičke kočnice je veoma bitna zbog velikih i složenih opterećenja kojima je izložena u toku rada, kao i zbog činjenice da mora delovati u veoma kratkom vremenskom periodu.

Aerodinamički kočioni sistem može biti konfigurisan kao:

- Tip A: dva panela na jednoj poziciji, koji su instalirani simetrično u odnosu na ravan simetrije duž voza, odvojeni su jedan od drugog i imaju odvojeno napajanje,
- Tip B: jedan panel na jednoj poziciji, koji se pokreće sa dva aktuatora.



Slika 4. Geometrija panela aerodinamičke kočnice



a)

b)

Slika 5. Aerodinamičke kočnice tipa A sa dva panela a) i tipa B sa jednim panelom b)

Maglev koji je ispitivan na pruzi Yamanashi napravljen je sa obe konfiguracije i to:

- Tip A: koji se sastoji od dva panela na jednoj poziciji, ukupne površine 2,4 m²/pozicija. Sama struktura panela je zbog smanjenja težine, izrađena od saćastog panela, sa saćem i oplatom od aluminijuma sa projekt-nom površinom 1,2 m².
- Tip B: jedan panel na jednoj poziciji, površine 1,95 m²/pozicija. Panel kočnice je konstrui-san kao kutija velike krutosti, koja je dimen-zionisana i dizajnirana tako da ne dozvoljava odstupanje u uravnanju desnog i levog ak-tuatora.

Aerodinamični kočioni sistem se koristi u opsegu velikih brzina, zbog čega se postavlja zahtev da se pokrene što je brže moguće. Treba imati na umu, da od trenutka startovanja aerodinamičkih kočnica postoji jedan period praznog hoda sve do momenta kada su one potpuno otvorene. Ispitivanjima je utvrđeno da je to vreme oko dve sekunde.

OTPOR AERODINAMIČKE KOČNICE

Faktori koji se uzimaju u obzir pri određivanju otpora su sledeći [9]:

- osnovni otpor, nastao pri kretanju voza na otvorenoj pruzi,
- odnos otpora u slučaju prolaska voza kroz tunel prema vožnji na otvorenoj pruzi,
- efekat brzine, sila otpora je : $F_x = k V^2$,
- uticaj savijanja panela,

- smer pokretanja istosmerni (konkavne površine)/Smer pokretanja suprotnosmerni (konveksna površina)
- serijska interferencija i
- površina panela.

Formula za određivanje otpora, koja se koristi u železničkim proračunima i primenjena je na proračunu voza Maglev, ima oblik :

- Maksimalno opterećenje u slučaju istosmer-nog pokretanja je:

$$[\text{Otpor}] = [\text{površina panela}] \times [\text{osnovni otpor}] \times [\text{efekat brzine}] \times [\text{efekat savijanja konkavne površine}] \times [\text{odnos otpora između tunela i otvorene sekcije}]$$

- Maksimalno opterećenje u slučaju suprotno-smernog pokretanja je:

$$[\text{Otpor}] = [\text{površina panela}] \times [\text{osnovni otpor}] \times [\text{efekat brzine}] \times [\text{efekat savijanja konvek-sne površine}] \times [\text{odnos otpora između tunela i otvorene sekcije}]$$

Za preliminarne proračune, aerodinamičku kočnicu možemo posmatrati kao ravnu ploču postavljenu na krov voza. Na slici 6. dat je koeficijent aerodinamičkog otpora C_x za ravnu ploču postavljenu normalno na površinu krova i normalno na pravac strujanja. Gornji dijagram slike 6. predstavlja zavisnost koeficijenta otpora C_x od odnosa širine i visine ploče b/c , za slučaj kada je širina b do 10 puta veća od visine c . Kao što se vidi na dijagramu, vrednost koeficijenta otpora C_x postaje konstantna za ploče kod kojih je $b \geq 3c$. Na dijagramu u donjem delu slike 6, dat je koeficijent otpora C_x za male vrednosti don-

osa širine i visine ravne ploče, tj. kada je $b/c \leq 1$ [6,7,8].

Ovi dijagrami se odnose na slučaj uniformnog strujanja, što nije slučaj za strujanje u blizini same površine. Za ploče koje se nalaze u neposrednoj blizini druge površi, postoji interferencija između ploče i te površi. U našem slučaju, to je interferencija između panela kočnice i krova voza. Ovo utiče na silu pritiska na ploču, a još više na centar potiska. U ovom slučaju se mora uzeti u obzir uticaj graničnog sloja preko efektivne brzine V_{ef} .

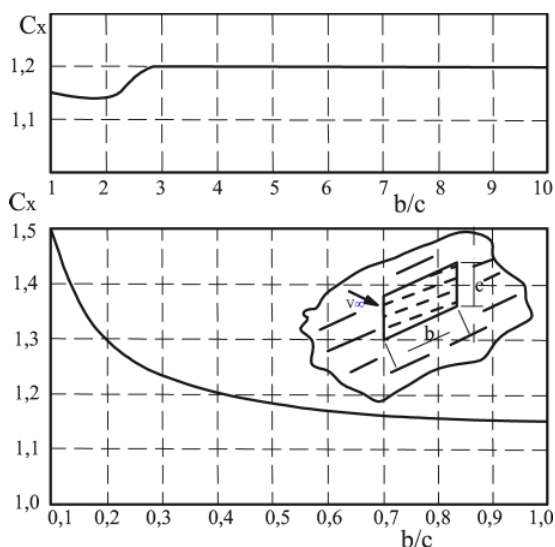
Na slici 7. dat je profil efektivne brzine V_{ef} , koji se menja u zavisnosti od udaljenosti ploče od površine krova voza h . Zato se uz ove koeficijente otpora C_x koristi efektivni dinamički pritisak q_{ef} [2,3,7]:

$$q_{ef} = \frac{1}{2} \rho V_{ef}^2 \quad (1)$$

Ako je ploča na samoj površini krova, tačka 1 ima visinu $h=0$. Brzina na udaljenosti $0,4c$ od površine krova voza odgovara efektivnoj brzini (za većinu tipičnih graničnih slojeva). Ukupna sila otpora ravne ploče je [2,3,8]:

$$R_x = \frac{1}{2} \rho V_{ef}^2 S_k C_x \quad (2)$$

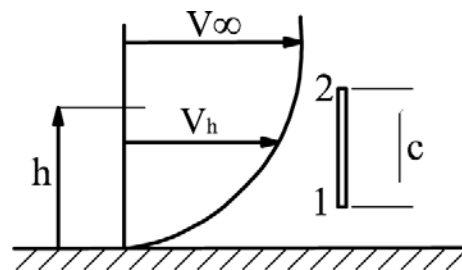
gde je : S_k – površina projekcije kočnice na ravan koja sadrži šarnirnu osu i zaklapa isti ugao sa centralnom linijom, kao i kočnica.



Slika 6. Koeficijent aerodinamičkog otpora ravne ploče postavljene normalno na pravac strujanja

Osnovni zahtev aerodinamičke kočnice je da poveća otpor voza, sa što manjim efektom na moment propinjanja i silu uzgona. Ovde treba imati na umu da povećanje gapa između kočnice i krova voza, ne utiče bitno na otpor, ali povećava moment. Kočnica mora da bude sposobna da radi vrlo brzo, kako na manjim, tako i na većim brzinama. Takođe je bitno da bude tako dizajnirana da se spreči pojava vibracija. Veličina fluktuacija pritiska takođe zavisi od postavnog ugla kočnice. Pri većim uglovima, od 400 do 500, javlja se povećanje niskofrekventnih vibracija za 3 puta.

Položaj kočnice na vozu se može odrediti iz raspodele pritiska u zoni poremećaja oko voza. Mesta povećanog otpora su posledica odcepljenja strujnica, gde je povećan turbulentni otpor.

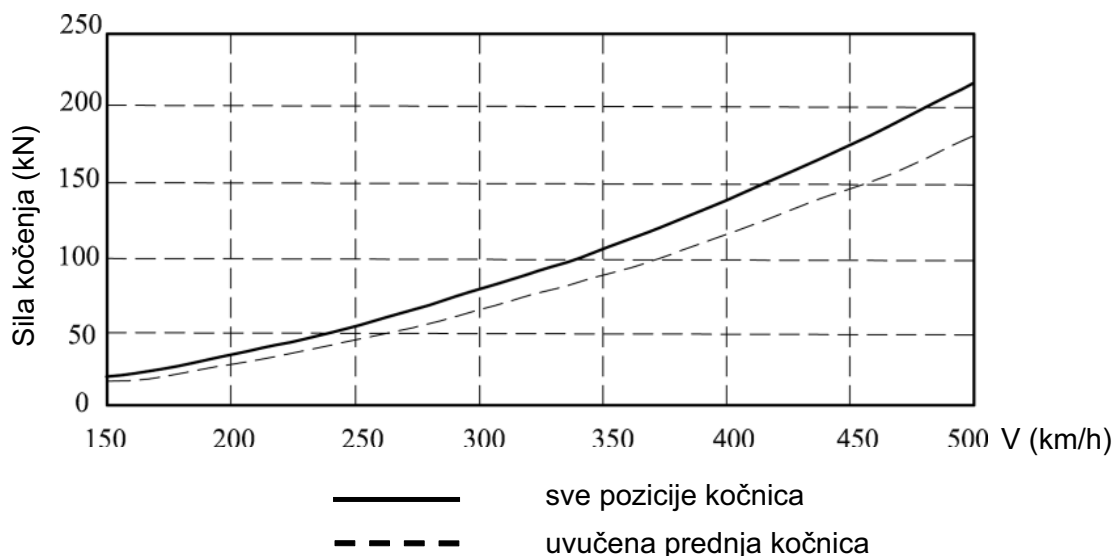


Slika 7. Profil brzine V_{ef}

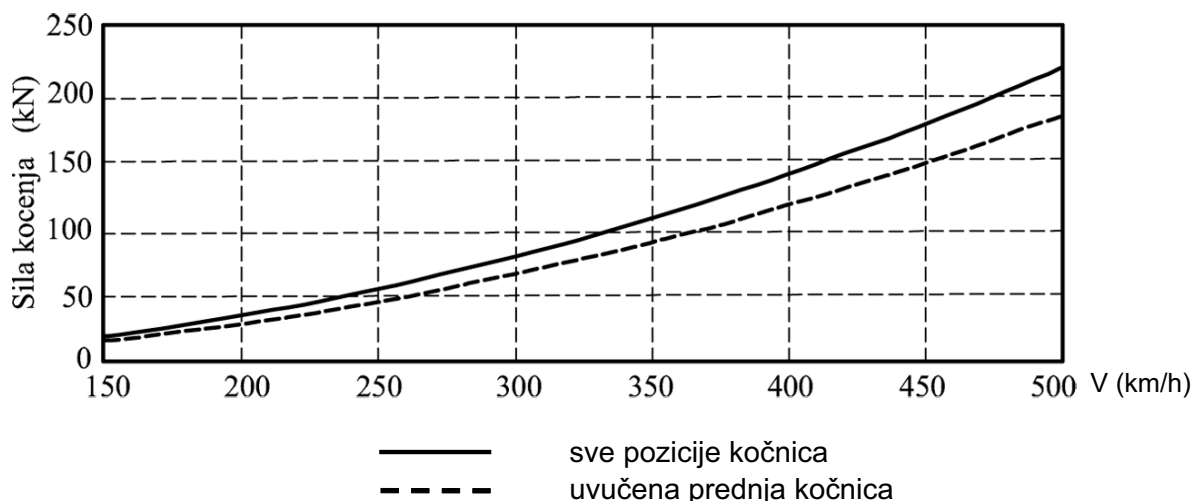
REZULTATI TESTIRANJA VOZA MAGLEV NA PRUZI YAMANASHI

Merenje aerodinamičke sile kočenja je izvršeno pri kretanju voza Maglev kroz tunnel na test pruzi Yamanashi. Aerodinamička sila kočenja je računata kao razlika između kretanja bez i sa aerodinamičkim kočnicama. Ispitivanjima je potvrđeno da na aerodinamičku silu kočenja najviše utiče brzina, kao što je i pretpostavljeno, jer je aerodinamički otpor proporcionalan kvadratu brzine.

Na slikama 8 i 9 prikazana je zavisnost sile kočenja od brzina za konfiguraciju od pet vagona pri kretanju kroz tunnel, u slučaju kada su paneli kočnice otvoreni na svakoj od pozicija, i za slučaj kada je prva kočnica u uvučenom položaju. Otpor kočenja iako malo fluktuiru, proporcionalan je sa kvadratom brzine. Na panelu kočnice voza koji se kreće brzinom od 500 km/h, otpor je bio oko 220 kN u tunelu u oba pravca kretanja (napred i nazad). U slučaju kada je prva kočnica bila u uvučenom položaju, otpor kočenja je bio oko 180 kN za oba smera kretanja.



Slika 8. Aerodinamička sila kočenja (kompozicija od 5 kola-ulazi u tunnel iz pravca zapada)



Slika 9. Aerodinamička sila kočenja (kompozicija od 5 kola-ulazi u tunnel iz pravca istoka)

Taj otpor kočenja, kada je pretvoren u usporenje, ekvivalentan je 0,2g za slučaj otvorenih kočnica na svim pozicijama, i 0,16g za slučaj kada prva kočnica nije u izvučenom položaju, za kompoziciju od pet kola koji se kreću u tunelu brzinom od 500 km/h. Maksimalno dozvoljeno usporenje za putničke vozove je 1,6 m/s². Za ekstremno hitne slučajeve tj. hard stop uslove, gde je imperativ brzo zaustavljanje, dozvoljeno usporenje je 2,0 m/s², a kod upotrebe aerodinamičkih i kočnica sa magnetnim otporom čak i 2,4 m/s².

Prva istraživanja koja su vršena na Miyazaki Maglev Test pruzi MLU001, rezultirala su procenom aerodinamičke sile kočenja na otvorenoj pruzi. Ove proračunate sile kočenja su uzete kao bazni otpor. Efekat savijanja panela aerodinamičkih kočnica je dobijen iz testa u aerodinamičkom

tunelu, i za voz Maglev je izračunat na sledeći način:

[položaj za smer pokretanja istosmerni(konkavne površine)] : [ravan panel] : [položaj za smer pokretanja suprotnosmerni] = 0,8 : 1: 1,2.

Procenjuje se da je aerodinamička sila kočenja u tunelu veća za 33% u odnosu na vrednost dobijenu na otvorenoj pruzi, usled pojave prelaznih pojava - promene dinamičkog pritiska koje se javljaju u trenutku ulaska voza u tunel. Što se tiče efekta serijske interferencije, aerotunelskim testovima i numeričkim proračunima je odnos kočione sile za drugu i sledeće pozicije u poređenju sa prvom pozicijom, bio procenjen na 0,56. Te vrednosti i rezultati ispitivanja na pruzi u realnim uslovima sa Yamanashi pruge dati su u Tabeli 1. Sila kočenja po jedinici površine za

Tabela 1. Otpor po jedinici površine

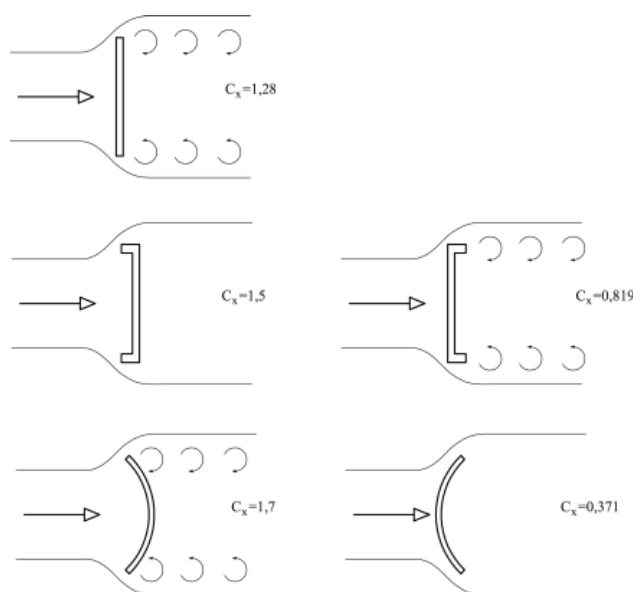
Tip kočnice	Pozicija	Otpor po jedinici površine (500 km/h)	
		Procena kN/m ²	Rezultati testa kN/m ²
Tip A	Prva pozicija	19,5	oko 20
	Druga i ostale pozicije	11,0	oko 15
Tip B	Prva pozicija	16,3	oko 18
	Druga i ostale pozicije	9,1	oko 18

poziciju 1, bila je oko 20 kN/m² na prvoj poziciji panela tipa A (na 500 km/h), a oko 15 kN/m² (za brzinu 500 km/h) za drugu i sledeće pozicije. U slučaju primene panela tipa B, sila kočenja je bila oko 18 kN/m² (pri brzini 500 km/h), bez značajnih razlika između prve i drugih pozicija.

Vrednost otpora dobijenog na prvoj poziciji, kada je pretvoren u koeficijent otpora (vrednost C_x), je oko 1,6 za tip A, a oko 1,5 za tip B. Na slici 10. dati su koeficijenti otpora za razna trodimenzionalna tela postavljena u neporemećenoj struji vazduha. U slučaju onih u tunelu na Yamanashi test pruži, ovi koeficijenti su nešto veći nego u neporemećenoj struji, jer interakcija između zidova tunela i voza izaziva prirast brzine koji može biti približno određen i istog je reda kao i vrednost u otvorenom prostoru.

EFEKAT SERIJSKE INTERFERENCIJE

Efekat serijske interferencije je ispitivan u aerodinamičkim tunelima, na modelu voza izrađenom u smanjenoj razmeri, u okviru istraživanja



Slika 10. Koeficijent otpora različitih trodimenzionalnih tela

Maglev tehnologije, koje je sprovelo Ministarstvo saobraćaja Japana. Ispitivanje uticaja interferencije i doprinosa svake pojedinačne kočnice je vršeno u aerodinamičkom tunelu, čime se smanjuju troškovi istraživanja [1]. Kočnice koje se nalaze na drugoj i ostalim pozicijama se delimično nalaze u vrtložnom tragu nastalom od kočnice na prvoj poziciji i samim tim je i njihov doprinos sili kočenja manji. U slučaju ispitivanja u realnim uslovima pri kretanju voza kroz tunel za tip A je dobijena vrednost oko 0,75, a efekat na tip B je zanemarljiv. Ovi rezultati dolaze samo iz činjenice da je Reynolds broj kod aerotunelskog ispitivanja za red veličine manji od onog na stvarnom vozu, ali takođe i zbog prisutnosti blokirajućih efekata zida tunela.

Diferencijalna jednačina kretanja voza ima sledeći oblik:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{(F_v - F_k - F_R^{osn} - F_R^{dod})}{m(1 + \varepsilon_v)} \quad (3)$$

gde su:

- F_v vučna sila na obimu točkova lokomotive (N),
- F_k kočna sila voza (N),
- F_R^{osn} osnovni otpor kretanju (N),
- F_R^{dod} dodatni otpor kretanju (N),
- ε_v koeficijent uticaja rotacionih masa voza,
- m masa voza ($m = m_{lokomotive} + m_{kola}$)

Za konkavne aerodinamičke kočnice tipa A, koeficijent otpora je za kočnice na prvoj poziciji, dok je na drugoj aerodinamički otpor smanjen za 25% usled efekta serijske interferencije. Istovetno je ponašanje kočnica na ostalim pozicijama. Na slici 11. data je zavisnost otpora aerodinamičkih kočnica tipa A konkavne geometrije u funkciji brzine voza i po jedinici površine panela aerodinamičkih kočnica kod vo-

Ako se usvoji da je brzina kretanja konstantna, tada je:

$$\frac{dV}{dt} = 0$$

Iz ovog uslova dobijamo da je vučna sila jednaka:

$$F_v = F_k + F_R^{osn} + F_R^{dod}$$

Kada dođe do otvaranja vazdušnih kočnica, ova jednačina menja oblik:

$$F_v - \frac{dV}{dt} m(1 - \varepsilon_v) = (F_k + F_R^{osn} + F_R^{dod}) + \Delta F_{x \text{ vazd } koč} \quad (4)$$

Iz ove jednačine se dobija usporenje:

$$-\frac{dV}{dt} m(1 - \varepsilon_v) = \Delta C_{x \text{ koč}} \cdot q \cdot S_{koč} \quad (5)$$

gde je:

$$\Delta F_{x \text{ vazd } koč} = \Delta C_{x \text{ koč}} \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot S_{koč} \quad (6)$$

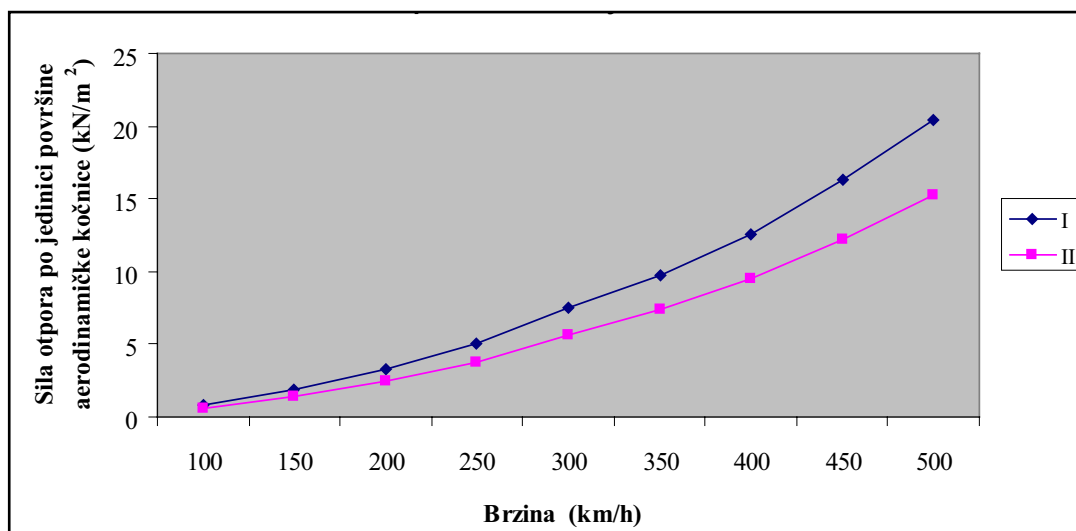
zova, može se uspešno koristiti ovaj dijagram. U zavisnosti od brzine kretanja voza, odredi se sila otpora po jedinici površine, a zatim u zavisnosti od vučne sile izvrši izbor broja i potrebna ukupna površina aerodinamičkih kočnica koja će obezbediti zahtevanu silu kočenja.

Poređenjem ovih proračunskih vrednosti sile kočenja sa rezultatima dobijenim u ispitivanjima na Miyazaki Maglev Test pruži na vozu MLUOOI, vidi se izuzetno slaganje. Sila kočenja po jedinici površine za poziciju 1, iz ispitivanja na pruži je bila oko 20 kN/m² na prvoj poziciji panela tipa

A (na 500 km/h), a oko 15 kN/m² (za brzinu 500 km/h) za drugu i sledeće pozicije. Kod konkavne i konveksne geometrije panela kočnice, za tip A je utvrđeno da se razlikuju za oko 10%, ali za tip B gotovo da nema razlike.

ZAKLJUČAK

Aerodinamičke kočnice se mogu koristiti kod vozova za ekstremno hitne slučajeve tj. hard stop uslove, gde je imperativ brzo zaustavljanje. Koriste se kao deo pomoćnog sistema za kočenje u hitnim slučajevima i imaju funkciju



I – aerodinamička kočnica na poziciji 1
 II – aerodinamičke kočnice na drugoj i ostalim pozicijama

Slika 11. Sila otpora po jedinici površine aerodinamičkih kočnica

da smanje brzinu voza. Njihov doprinos je veći što je veća brzina kojom se voz kreće, jer je sila aerodinamičkog otpora kočnice proporcionalna kvadratu brzine.

Kada su aerodinamičke kočnice postavljene na nekoliko pozicija duž voza, kočioni paneli koji su postavljeni na prvoj poziciji stvaraju najveći otpor, dok se na panelima na drugoj i narednim pozicijama veličina otpora smanjuje, pa samim tim i njihov doprinos sili kočenja. Na prvoj kočnici dolazi do odcepljenja vazдушnih strujnica, tako da se druga kočnica nađe u vrtložnom tragu iza nje. Ova pojava, koja se naziva efekat serijske interferencije, umanjuje efikasnost ostalih kočnica.

Vrednosti sile kočenja po jedinici površine aerodinamičke kočnice konkavnog oblika su izračunate u funkciji od brzine kretanja voza. Pokazalo se izuzetno dobro slaganje rezultata proračuna sa rezultatima koji su dobijeni na test pruži u Yamanashiju na vozu Maglev. Za brzinu od 500 km/h, u ispitivanjima u realnim uslovima na pruži, na prvoj kočnici je dobijena sila od 20 kN/m², a na drugoj i ostalim pozicijama kočnice 15 kN/m². Vrednosti koje su dobijene proračunom predstavljenim u ovom radu su 20,4 kN/m² na prvoj i 15,3 kN/m² na drugoj i ostalim kočnicama. Predstavljeni model proračuna aerodinamičkih kočnica je očigledno dao realne rezultate. Na ovaj način može se u zavisnosti od brzine kretanja voza, odabrati broj i površina panela aerodinamičkih kočnica, koje će obezbediti zahtevanu kočionu silu.

Ovaj rad je rezultat istraživanja koji su realizovani u okviru projekta Ministarstva nauke RS TR 14018 - Istraživanje i razvoj noseće strukture i procena materijala elemenata pasivne sigurnosti šinskih vozila 2008-2010.

LITERATURA

- 1) Yoshimura M., Saito S., Hosaka S., Tsunoda H., Characteristics of the Aerodynamic Brake of the Vehicle on the Yamanashi Maglev Test Line, QR of RTRI, vol.41, No.2, jun 2000.
- 2) Puharić, M., Model aerodinamičkih istraživanja vozova kod velikih brzina, doktorska disertacija, Zrenjanin, 2009.
- 3) Anderson, J.D., Fundamentals of aerodynamics, McGraw-Hill, inc, 1996.
- 4) Measurement of the aerodynamic pres-
- 5) Puharić, M. Kutin, M. Burzić, M., Adamović, Ž., Aerotunelska ispitivanja modela vozova velikih brzina (Wind tunnel testing of high-speed train models), XXX Majski skup održavalaca Srbije, Vrnjačka banja, 2007.
- 6) Puharić, M., Aerodinamički efekti koji se javljaju pri prolasku vozova velikih brzina kroz tunele, Konferencija ŽELKON, Niš, 2006.
- 7) Puharić, M., Adamović, Ž., Research of high speed trains in the subsonic wind tunnel- Ispitivanje brzih vozova u podzvučnom aerotunelu, Strojарstvo, Vol.50 (No.3), pp. 151-160, 2008.
- 8) Rebuffet, P., Aerodynamique experimentale, tome 1, Dunod, Paris, 1969.
- 9) Radosavljević, A., Milutinović, D., Ušteda pogonske energije železničkih vučnih vozova, Istraživanja i projektovanja za privredu 4 i 5, str 23-32, 2004.

APPLICATION OF THE AERODYNAMICAL BRAKES ON TRAINS

This paper presents the aerodynamical brake system, as second brake system, in cases when it is necessary to speed down the train or at emergency situations when primary brake system is out of order.

In this brake system, braking force is a result of aerodynamical drag generated on pulled-up aerodynamical brake panels. These panels are especially effective at high speeds because aerodynamical drag of panels is proportional to second exponent of vehicle's speed.

Calculation of braking force by panel surface unit was derived for the aerodynamical brake of concave shape and it was compared with test results for Maglev train on railway Yamanashy in Japan.

Key words: aerodynamics brakes, aerodynamic drag, train

Rad poslat na recenziju: 04.02.2010.

Rad spreman za objavu: 26.03.2010.