

MOGUĆNOSTI VOZOVA SA NAGINJANJEM SANDUKA KOLA

dr Aleksandar Radovanović,
Saobraćajni institut CIP

Tendencija povećanja brzina izgradnjom novih pruga za velike brzine i adaptacijom postojećih, koja se jedinstveno ispoljava kod gotovo svih železničkih uprava, postavlja permanentni problem izbora odgovarajućih vozila. To pitanje je utoliko značajnije što savremeni razvoj tehnike i tehnologije omogućuje niz novih rešenja, doskora teško zamislivih. Međutim, pri izboru novih rešenja potrebno je, pažljivom analizom svega što se pritom dobija i gubi, ukazati na ona optimalna rešenja koja će zadovoljiti teške uslove određene eksploatacije. Železnička mreža u svetu je mahom izrađena u 19. veku pa su trasiranje i konstrukcija pruge bili tesno povezani sa strukturom terena i protezale se sa konfiguracijom zemljišta. Zbog toga je projektovano mnogo krivina od kojih je dobar broj sa malim poluprečnikom koji ograničava brzinu kretanja vozova. I pored toga, takve pruge su duže vreme zadovoljavale zahteve saobraćaja. Prošlo je tačno 30 godina od puštanja u saobraćaj prvog voza serije ETR401 sa naginjanjem sanduka kola koji omogućava povećanje brzine i skraćenje vremena vožnje i na postojećim prugama. U radu su prikazani neki od savremenih dizel i električnih motornih vozova sa tehnikom naginjanja sanduka kola (Nemačka, Italija, Švedska, Finska, Španija,...), kao i odgovarajuća ispitivanja u Hrvatskoj i Sloveniji i šire u Evropi sa ovim voznim sredstvima. Prikazana je pruga Beograd - Bar i procenjene mogućnosti smanjenja vremena putovanja vozova sa naginjanjem sanduka kola na ovoj relaciji korišćenjem savremenih vozova sa naginjanjem sanduka kola u krivinama.

Ključne reči: železnica, vozovi sa naginjanjem, vreme vožnje, otpor kretanja

UVOD

Tendencija povećanja brzina izgradnjom novih pruga za velike brzine i adaptacijom postojećih, koja se jedinstveno ispoljava kod gotovo svih železničkih uprava, postavlja permanentni problem izbora odgovarajućih vozila. To pitanje je utoliko značajnije što savremeni razvoj tehnike i tehnologije omogućuje niz novih rešenja, doskora teško zamislivih. Međutim, pri izboru novih rešenja potrebno je, pažljivom analizom svega što se pritom dobija i gubi, ukazati na ona optimalna rešenja koja će zadovoljiti teške uslove određene eksploatacije.

Železnička mreža u svetu je mahom izrađena u 19. veku pa su trasiranje i konstrukcija pruge bili tesno povezani sa strukturom terena i protezale se sa konfiguracijom zemljišta. Zbog toga je projektovano mnogo krivina od kojih je dobar broj sa malim poluprečnikom koji ograničava brzinu kretanja vozova. I pored toga, takve pruge su duže vreme zadovoljavale zahteve saobraćaja. Međutim, razvojem konkurentnih saobraćajnih grana (vazdušnog i drumskog) povećanje brzine na železnici i smanjenje vremena



Slika 1. Naginjanje sanduka kola

putovanja mogla su se ostvariti uglavnom na rekonstruisanim i novoizgrađenim prugama. Ali, počela su istraživanja i na primeni jeftinijih tehničkih rešenja koja omogućuju povećanje brzina i skraćenje vremena vožnje i na postojećim prugama. To je tehnika naginjanja sanduka kola u krivini.

Ovu ideju, da se kroz krivinu može brže voziti ako se sanduk kola nagne (sl. 1) i time ne ugrozi komfor putnika, počele su da proučavaju više železnica u Evropi još početkom 60-tih godina prošlog veka. Prva ideja o povećanju brzine železničkog vozila u krivini prezentovana je 1965. god. na konferenciji u Đenovi od stručnjaka Italijanskih železnica (FS).



Slika 2. Voz DB 611

Osnovni cilj je bio da se povećanje brzine omogući bez skupih intervencija u postojeću infrastrukturu. Tehnička rešenja su se razvijala postepeno - korak po korak. Neke su železnice, posle izvesnog vremena, odustale od daljeg razvoja. Samo su Italijanske železnice, Švedske železnice (SJ) i Španske železnice (RENFE) posle dugogodišnjih ispitivanja zajedno sa proizvođačima vozila, uspele da serijski izrade ova vozila i puste ih u redovan saobraćaj.



Slika 3. Voz serije DB 415

Prošlo je tačno 30 godina od puštanja u saobraćaj prvog voza serije 401 sa naginjanjem sanduka kola. Danas su mnoge evropske železnice ili već kupile ili poručile savremene vozove sa naginjanjem sanduka kola u krivinama. U Japanu su takođe, već duže vremena ova vozila u upotrebi.



Slika 4. Voz DB 610

VOZOVI SA NAGINJANJEM

Vozovi sa naginjanjem u Nemačkoj

Voz sa naginjanjem VT612, firme Bombardier, pripada trećoj generaciji dizel-motornih vozova sa naginjanjem koji su rađeni za Nemačke železnice (DB). Prva serija od 20 vozova serije VT610 (sl.4) počela se proizvoditi 1992. godine. Druga serija VT611 (sl. 2) rađena je od 1997. do 1998. godine. Napravljeno je 50 vozova druge serije. Do sada su za potrebe DB isporučena 192 voza treće generacije VT612 (tabela 1). Poboljšanja serije VT612 u odnosu na seriju VT611 odnose se na uređenje enterijera, promene na motoru, upravljačnici, nivou buke. Hrvatske železnice (HŽ) su naručile osam vozova serije VT612 (RegioSwinger), a planiraju da nabave još 5 četvoro ili petodelnih garnitura s električnom vučom. Ovi dizel-motorni vozovi saobraćaju na prugama sa dosta krivina južne i istočne Nemačke i na krivinama, primenom tehnike naginjanja, postižu do 30% veće brzine, što u mnogim slučajevima znači skraćenje vremena putovanja za 20 do 30% [1].

Konfiguracija voza je takva da se mogu sastavljati do četiri garniture pomoću automatskog kvačila. U jednoj kompoziciji su 134 sedišta (još 12 preklopnih sedišta). Vozila imaju aktivnu električnu nagibnu tehniku koja dopušta vožnju većim brzinama u krivinama.

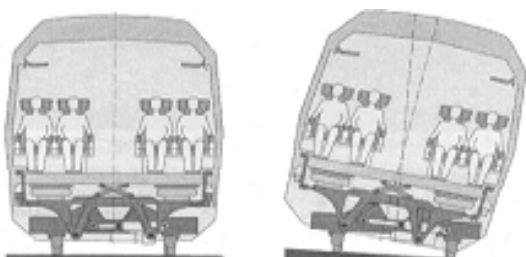


Slika 5. Voz DB 605

Maksimalna brzina voza je 160 km/h. Najveći mogući ugao elektronski kontrolisanog naginjanja je 8° , a brzina naginjanja je 4° u sekundi. Naginjanje kolskog sanduka obavlja se na osnovu poprečnog ubrzanja u ravni koloseka, dobijenog preko senzora, na koje utiču poluprečnik krivine i brzina. Prilagođavanja signalizacije, odnosno infrastrukture, neophodna su samo zbog veće brzine.

Seriya	610	611	612	411	415	605
Kinematski profil	UIC 505	UIC 505	UIC 505	UIC 505	UIC 505	UIC 505
Maksimalna brzina /km/h]	160	160	160	230	230	200
Najmanji poluprečnik krivine [m]	125	125	125	150	150	150
Raspored osovina	2'(A1)'+ (1A)'(A1)'	2'B'+B'2'	2'B'+B'2'	2'2'+(1A)'(A1)'+ (1A)'(A1)'+2' '2'+(1A)'(A1)'+ (1A)'(A1)'+2' 2'	(1A)'(A1)'+2'2' '+(1A)'(A1)'+	2'Bo'+Bo'2'+2' 'Bo'+Bo'2'
Maksimalni ugao naginjanja	8°	8°	8°	8°	8°	8°
Ukupna dužina preko kvačila [mm]	51 750	51 750	51 750	185 000	136 000	106 700
Maksimalna širina [mm]	2852	2852	2852	2842	2842	2842
Visina poda iznad GIŠ-a [mm]	1290	1290	1290	1250	1250	1250
Prečnik točka nov/istrošen [mm]	890/840	890/840	890/840	890/840	890/840	860/790
Broj sedišta						
1. klasa	16	23	24	53	41	41
2. klasa	114	112	122	304	209	148
preklapajuća	6	13	12	3	3	6
u restoranu	-	-	-	24	-	-
Masa praznog voza [kg]	91 100	98 000	98 000	367 000	273 500	217 000
Maksimalno osovinsko opterećenje [t/os.]						
- pogonske osovine	14,2	14,7	14,2	16,3	16,3	14,5
- slobodne osovine	14,5	14,9	14,6	16,8	16,8	14,5
Snaga [kW]	2x485	2x540	2x560	4000	3000	4x560
Dizel motor						
- proizvođač	MTU	MTU	Cummins	-	-	Cummins
- tip	12V183TD12	12V183TD12	QSK 19	-	-	QSK 19
Prenos snage	električni	Hidraulički	hidraulički	-	-	električni
Upravljanje vozilom	SIBAS 16	Geatrac II	MITRAC	SIBAS 32	SIBAS 32	SIBAS 32

Tabela 1. Vozovi sa naginjanjem na DB



Slika 6. Princip tehnike naginjanja vozila "Regio Swinger"

U razvoju dvodelnog voza serije VT610 posebna pažnja je bila posvećena lakoj konstrukciji zbog želje da se postigne niže osovinsko opterećenje. Zbog toga je sanduk kola izrađen od dugačkih aluminijumskih profila. Cijela oprema za naginjanje (obrotna postolja i aktivni hidraulički uređaji za naginjanje) su kupljeni od firme Fiat Ferroviaria (sl. 6) i odgovaraju opremi koja je instalirana na Pendolino vozovima ETR450 [2]. Od 1993. godine voz saobraća oko gradova Nürnberg, Bajrot, Hof, Vejden i Švandorf. U poređenju sa klasičnim vozovima bez naginjanja vreme putovanja je skraćeno do 21%.

Na pruzi nemačkih železnica, između stanica Nürnberg i Hof, izvršeno je 1992. godine upoređenje vremena vožnje najbržeg voza i dizel-motornog voza serije VT610. Sa vozom VT610 postignuto je vreme vožnje 1h 40min. (prosečna brzina 96 km/h) što je za 30 min. kraće od tada najbržeg voza (prosečna brzina 74 km/h). Dakle, brzina je povećana za 29%, a vreme vožnje je smanjeno za 23%.

Pendolino vozovi

Prototip Pendolino vozova sa naginjanjem sanduka kola se pojavio 1975. godine iz fabrike Fiat (tabela 2). Voz serije ETR401 je pušten u komercijalni saobraćaj 1976. godine na relaciji Rim-Ankona. Voz je posle početnog perioda eksploatacije povučen iz saobraćaja i korišćen samo za ispitivanja. Pendolino voz serije ETR450 je u komercijalnom saobraćaju od juna 1988. godine na relaciji Milano-Rim, a voz serije ETR460 (sl. 7) od 1995. godine. U naredne tri godine pušteni su u komercijalni saobraćaj i vozovi serija 470 (sl. 8) i 480. Prvi od sedam trosistemskih Pendolino vozova S860, za Češke

železnice (ČD), isporučen je sredinom 2003. godine, a sredinom 2004. godine je pušten u redovan saobraćaj prvi voz na relaciji Prag-Bрно-Breclav. U međunarodnom saobraćaju ovaj voz će se pojaviti tek sa redom vožnje za 2005. godinu na relaciji Drezden-Beč i Prag-Beč. Neki od ovih vozova će tokom 2005 god. biti i u

zajedničkom saobraćaju sa 4 garniture Pendolino vozova koje su poručile i Slovačke železnice (ZSR). Prvi od tri voza serije SZ 310 (sl. 9) za Slovenačke železnice (SZ) pušten je u komercijalni saobraćaj 24.09.2000.godine na relaciji Ljubljana – Maribor.

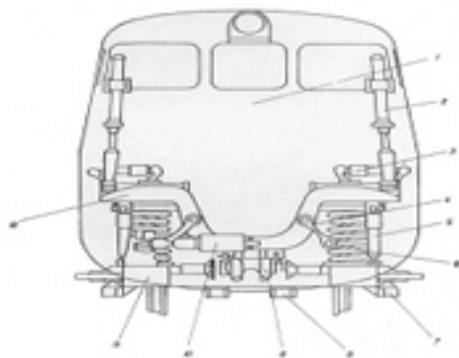
Serija	FS ETR 450	FS ETR 460	VR S 220	CFF/SBB ETR 470	FS ETR 480	CD S 860	SZ SZ 310
Sistem napajanja	3 kV DC	1,5/3 kV DC	25 kV AC	3 Kv DC 15 kV 16 ² / ₃ Hz	1,5 kV DC 25 kV AC	3 kV DC 15kV 16 ² / ₃ Hz 25 kV AC	3 kV DC
Maksimalna brzina [km/h]	250	250	220	200	250	230	200
Maks. snaga na obođu točka [kW]	5000	5880	3880	5880	5880	4000	1960
Masa voza u radnom stanju [t]	435	483,8	325,8	498	460	364,4	152
Dužina voza [m]	183,6	236,6	158,9	236,6	236,6	185,3	81,2
Sastav voza	8M+1P	6M+3P	4M+2P	6M+3P	6M+3P	4M+3P	M+P+M
Broj sedišta	386	478	262	473	478	312	166
Prosečno osovinsko opterećenje [t/os.]	12,5	13,5	13,6	13,9	13,5	13,5	12,6

Tabela 2. Pendolino vozovi sa naginjanjem sanduka kola



Slika 9. Voz SZ 310

Osnovna koncepcija voza ETR 450 zasnovana je na:



Slika 10. Naginjanje sanduka i aktivno bočno ogibljenje kod ETR

Osnovni elementi sistema za naginjanje (sl. 10) su: 1 - sanduk, 2 - hidraulički cilindar, 3 - bočni prigušivač, 4 - elementi za vođenje, 5 - vertikalni prigušivač, 6 - ogibljenje između sanduka i obrtnog postolja, 7 - davač ubrzanja, 8 - žiroskop, 9 - bočni graničnik, 10 - bočno aktivno ogibljenje, 11 - ram obrtnog postolja, 12 - kolevka (poprečni nosač)

- opterećenje po osovini je smanjeno na najmanju moguću meru (12,5 - 13,5 t) čime se garantuje malo naprezanje koloseka i vozila,
- zahvaljujući unifikaciji svih komponenti i ravnomernom rasporedu masa, kao i vučnih i kočnih napreznja između svih obrtnih postolja, mogli su se jednoobrazno izvesti svi parametri za dinamiku vožnje obrtnih postolja, pogonsko obrtno postolje je zbog vešanja vučnog motora za sanduk izvedeno u lako gradnji tako da je uticaj na kolosek skoro isti kao i uticaj slobodnog obrtnog postolja,
- aktivno poprečno ogibljenje koje sanduk kola, u krivini, održava u sredini obrtnog postolja garantuje skoro jednake dinamičke osobine u krivini i na pravim deonicama, aktivni sistem na-ginjanja ima hidraulično upravljanje i zatvoreni sistem regulacije.

Da bi redovno saobraćali Pendolino vozovi potrebne su male modifikacije postojeće pruge: izdizanje spoljne šine da bi instrumenti na vozu mogli bolje da osete kada voz ulazi u krivinu i instalacija signalnog sistema, koja ima za cilj da upozori mašinovođu ukoliko pređe maksimalno dozvoljenu brzinu od 250 km/h. Neke su procene da je, čak i sa ovim radovima, cena korišćenja vozova sa naginjanjem na postojećim prugama znatno manja (i do 10 puta) od kupovine novih vozova za velike brzine i izgradnje novih pruga. Pored toga, postojeće pruge se mogu koristiti i za saobraćaj klasičnih vozova bez sistema naginjanja.

Sistemom za naginjanje Pendolino upravlja kompjuter koji prima signal od davača ubrzanja koji je smešten na prvim kolima i čiji zadatak je da meri bočno ubrzanje pri ulasku voza u krivinu. Žiroskop, koji se takođe nalazi na prvim kolima, potvrđuje da je registrovano ubrzanje prouzrokovano ulaskom u krivinu, a ne od bočnih pomeranja koja su posledica neregularnosti u samom koloseku. Sistem za naginjanje automatski naginje sanduk kola prema unutrašnjosti krivine do 8° , tako da se može kompenzovati uticaj centrifugalnog ubrzanja na putnike do $1,35 \text{ m/s}^2$. Na ovaj način Pendolino vozovi mogu saobraćati sa centrifugalnim ubrzanjima od $1,8$ do 2 m/s^2 , a da još uvek ne pređu graničnu vrednost od $0,8 - 1 \text{ m/s}^2$ koju su inženjeri na železnici postavili kao granicu komfora putovanja. Rezultat svega je da se vozovi mogu "upisivati" u krivine većim brzinama, koje su 35-45% više nego kod klasičnih vozova bez sistema naginjanja, bez ikakvog negativnog uticaja na kvalitet vožnje.

Vožnjom voza Pendolino ETR450, na relaciji Rim-Milano 1988. godine, postignuto je čisto vreme vožnje bez zaustavljanja 3h 50min. (prosečna brzina 156 km/h) umesto 4h 55min. (prosečna brzina 122 km/h) koliko je do tada postizao najbrži Intersiti voz. Dakle, brzina je povećana za 28%, a vreme vožnje je smanjeno za 22%.

Na relaciji Milano-Ženeva izvršena je simulacija vožnje Pendolino vozom i upoređenje sa tada najbržim Eurositim vozom. Simulirano vreme vožnje Pendolino voza iznosilo je 3h (prosečna brzina 123 km/h), a vreme Eurositim voza 4h (prosečna brzina 92 km/h). Dakle, brzina je povećana za 33%, a vreme vožnje je smanjeno za 25%.

Poslednja generacija Pendolino vozova, serija ETR 460, je uvedena 1993. god. Svaki ETR 460 voz je sastavljen od tri vučne jedinice - dvoje motornih kola i jedne prikolice. Ove nezavisne vučne jedinice obezbeđuju jednaku raspodelu snage na pogonskim kolima i istovremeno garantuju efikasno električno kočenje i pouzdanost.

Vozovi sa naginjanjem u Švedskoj

Švedske železnice (SJ) su se odlučile za uvođenje velikih brzina na glavnim relacijama uvođenjem vozova sa naginjanjem na postojećim rekonstruisanim prugama. Odluka je donešena 1986. godine, a već 1990. godine izrađen je

prototip elektromotornog voza sa aktivnim sistemom naginjanja sanduka kola serije X2000 (sl. 11). Maksimalni ugao naginjanja je $6,5^\circ$, a maksimalna brzina naginjanja 4° u sekundi.

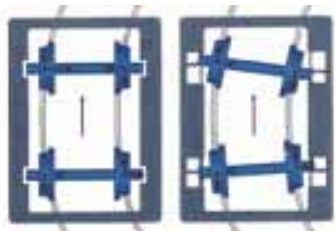
Originalnih 21 X2000 vozova, kao i novih 7 jedinica, sastoje se od jedne vučne jedinice i šest prikolica od kojih je jedna upravljačka (1993. god. je zbog povećanog obima posla broj prikolica povećan sa 5 na 6), a 14 vozova se sastoje od lokomotive i tri prikolice. Tokom 1995. god. vozovi su bili u eksploataciji sa raspoloživošću od 96%, što je znatno bolje od klasičnih električnih lokomotiva koje su imale raspoloživost 82-83%. Od septembra 1990. god. do septembra 1995. god. voz X2000 je imao 3,32 kvara na 1.200.000 km (posle 25.000 vožnji bilo je samo 20 kvarova na sistemu za naginjanje).



Slika 11. Voz X2000

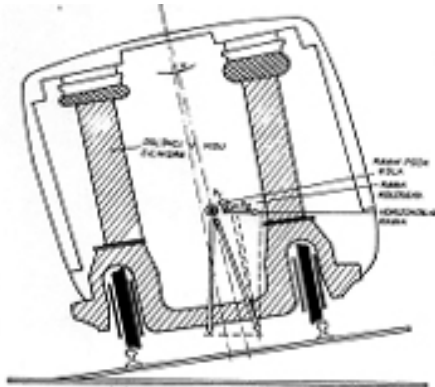
Mehanizam za naginjanje se aktivira preko kompjuterom kontrolisanog akcelerometra na prvoj prikolici. Opšte govoreći, naginjanje inicira centrifugalna sila preko senzora na vodećem obrtnom postolju. Od senzora signal ide u kompjuter koji u zavisnosti od aktuelne brzine voza izračunava kada i koliko treba svaka prikolica u vozu da se nagne. Aktivnim sistemom naginjanja smanjuje se centrifugalna sila za 80%, a sistem se isključuje pri brzini ispod 70 km/h . Prema rezultatima ispitivanja, brzina u krivinama se može povećati za 25-30% u odnosu na klasične vozove. Na relaciji Stokholm-Geteborg skraćeno je vreme vožnje sa 4h 13min. na 2h 54min. (za 31%) vožnjom voza X2000 umesto klasičnog IC voza, a na relaciji Stokholm-Malme sa 6h 28min. na 4h 36min. (za 29%) /3].

Voz X2000 se razlikuje od ostalih klasičnih vozova po dvema glavnim tehničkim karakteristikama: radijalno vođenim obrtnim postoljima i aktivnom sistemu naginjanja sanduka kola.



Slika 12. „Čvrsto“ i „mekano“ vođeno obrtno postolje

Radijalno vođena obrtna postolja (sl.12) dozvoljavaju da se brzina u eksploataciji poveća čak za 40%, u odnosu na klasična obrtna postolja, bez povećanja sila u kontaktu točak/šina. Ovo smanjuje trošenje kako šine, tako i točkova. Životni vek točkova se produžava i do šest puta. Međutim, ovako povećanje brzine bi bilo za putnike nekomfortno bez naginjanja sanduka kola voza.



Slika 13. Dejstvo bočnih ubrzanja i deformacija ogibljenja u krivini kod Talgo voza

Naginjanje sanduka kola koristi se prvenstveno za poboljšanje komfora putnika. Brzina naginjanja srednjih kola je 1m/s, a upravljačkih kola 1,5m/s. Lokomotiva voza X2000 se ne naginje. Svaka lokomotiva je opremljena sa četiri asinhrona vučna motora, obešena na osovinu, koji su podijeljeni u dve grupe. Svaki X2000 voz ima tri sistema kočnja: reostatsku, elektro-pneumatsku disk-kočnicu i magnetsku šinsku kočnicu za slučaj opasnosti.

Vozovi sa naginjanjem u Španiji

Kao i Pendolino vozovi, vozovi sa naginjanjem španskog proizvođača Patentes Talgo rade tako što se naginju u krivinama i sposobni su za brzine do 200 km/h. Za razliku od Pendolino vozova Talgo vozovi ne koriste nikakvu dodatnu energiju da bi naginjali sanduk kola niti poseduju mehanizam za detekciju krivina i uključenje sistema za naginjanje.

Trčeci stroj Talgo voza se oslanja na točkove preko gumenih opruga. Oslanjanje sanduka je na obe strane različito. Dok je na jednoj strani sanduk oslonjen direktno na vazdušne gibnjeve, dotle na drugoj strani visi na osloncima vešalica (na polugama za naginjanje). Pol okretanja (naginjanja) sanduka kola leži na 2,7 m iznad poda kola (sl. 13). Ugao naginjanja iznosi najviše 3,5°.

Talgo vozovi su uvedeni u saobraćaj 1980.god. u Španiji, a u međunarodni saobraćaj godinu dana kasnije.

Vozovi sa naginjanjem u Švajcarskoj

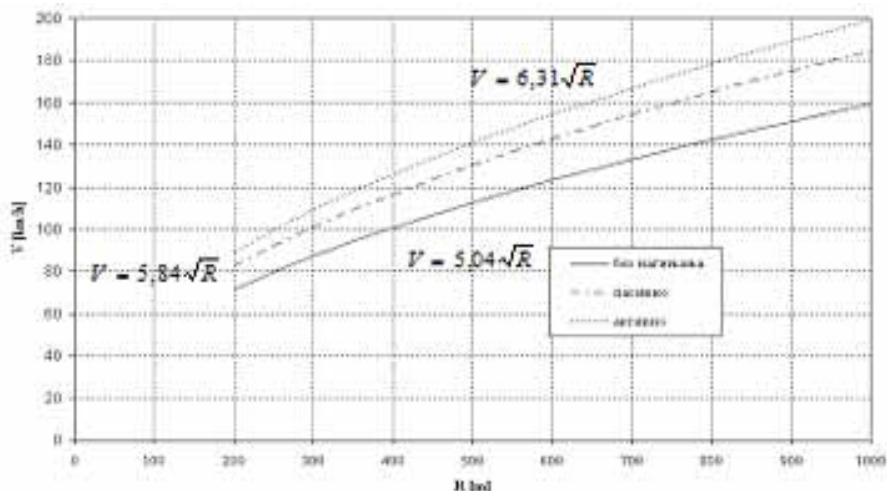
U Švajcarskoj su uvedena 24 voza (još 10 je poručeno) sa naginjanjem koje je izradio konzorcijum firmi Adtranz (sada Bombardier), Fiat-SIG i Schindler Waggon. Ovi vozovi su poznati pod nazivom InterCity Neigezug (ICN) ili InterCity vozovi sa naginjanjem. Voz je sastavljen od sedam kola, kapaciteta 463 mesta za sedenje i maksimalne brzine 200 km/h. Masa voza je 355 t, a dužina 188,8 m. Napon napajanja je 15 kV AC preko transformatora koji je smešten u trećim kolima. Samo središnja kola voza nemaju nikakvu vučnu opremu i ona su opremljena sedištima prve klase.

Svaka kola su smeštena na ramu obrtnog postolja, u obliku slova H, u kome je smešten električno pogonjeni mehanizam za naginjanje, sekundarno ogibljenje i radijalno vođeni osovinski sklopovi. Čelna upravljačnica voza je opremljena procesorom koji izračunava potrebni stepen naginjanja kako voz ulazi u krivinu.

ICN vozovi su uvedeni u saobraćaj 2001. god., a početkom 2002. god. je poručeno još 10 vozova koji će od 2004. god. obavljati saobraćaj na pruzi Ženeva-Biel/Bienne-Basel.

ZAVISNOST BRZINE VOZA OD POLUPREČNIKA KRIVINE I SISTEMA NAGINJAN

Na slici 14 prikazana je zavisnost maksimalne dozvoljene brzine voza sa naginjanjem od poluprečnika krivine za razne sisteme naginjanja sanduka kola. Maksimalna dozvoljena brzina voza, sa pasivnom tehnikom naginjanja, kao kod sistema TALGO, je za oko 15% viša, a sa aktivnom tehnikom naginjanja, kao kod vozova firme Bombardier, je za oko 25% viša nego kod vozova bez tehnike naginjanja.



Slika 14. Maksimalna brzina voza kroz krivine

ISPITIVANJA U SLOVENIJI I HRVATSKOJ

Ispitivanja u Sloveniji

U Sloveniji su tokom 1989. godine izvršene probne vožnje na relaciji Ljubljana-Jesenice sa vozom Pendolino serije ETR401 /4/. Cilj je bio sagledavanje mogućnosti saobraćaja ovih vozova na postojećim prugama tadašnjeg JŽ-a. Posle izvršenih probnih vožnji došlo se do sledećih zaključaka:

- proba je pokazala ispravnost koncepta Pendolino za povećanje brzina na postojećim prugama,
- dostignuti rezultati su bolji od očekivanih,
- sa stanovišta putnika vožnja je bila udobna,
- pruga Ljubljana-Jesenice je sposobna za vožnju ovih vozova sa nekompenzovanim bočnim ubrzanjem od $2,0 \text{ m/s}^2$, s tim da se otklone izvesni nedostaci na nekim delovima pruge (skretnice i krivine),

- skraćenje vremena putovanja vozom serije 401 u odnosu na klasičnu vuču iznosilo je 22%, a prosečno povećanje brzine 33%.

Na osnovu izvršenih merenja i proračuna, primenom voza sa naginjanjem sanduka kola serije 450, došlo se do zaključka da je moguće postići komercijalnu brzinu na najtežim prugama prema moru od oko 100 km/h, a na ostalim prugama oko 105-110 km/h, uključujući po jedno zaustavljanje voza u proseku na oko 70-90 km. Prilikom probne vožnje na relaciji Ljubljana-Jesenice postignuta je komercijalna brzina od 110 km/h. U tabeli 3 prikazana su proračunata vremena putovanja za voz serije 450 i tada važeća vremena putovanja po redu vožnje 1990/1991. Kao što se vidi moguće skraćenje vremena putovanja je maksimalno do 40%. Danas, na relaciji Ljubljana-Maribor, Pendolino vozovi serije SZ 310 slovenačkih železnica ostvaruju prosečnu komercijalnu brzinu od oko 88 km/h, iako su projektovani za maksimalnu brzinu od 200 km/h.

Pruga	Dužina [km]	Vreme putovanja		Moguće skraćenje [%]
		- najbrži voz -	- 450 -	
Zagreb - Rijeka	228,7	3h 45min.	2h 22min.	36,9
Zagreb - Split	392,6	6h 41min.	4h 03min.	39,4
Sarajevo - Ploče	193,2	2h 36min.	1h 59min.	23,7
Beograd - Bar	469,8	6h 53min.	4h 50min.	29,8

Tabela 3. Proračunata vremena putovanja Pendolino vozova u bivšoj Jugoslaviji

Ispitivanja u Hrvatskoj

Na probnoj vožnji od Zagreba do Splita, koji su prugom udaljeni 420 km, RegioSwinger je tokom 2000-te godine vozio 5,25h, a standardno vreme

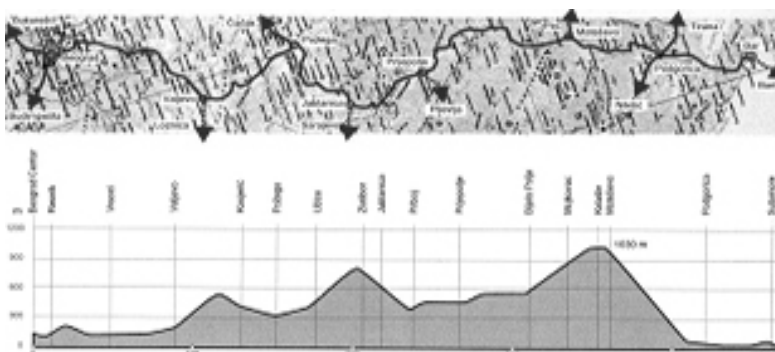
vožnje klasične vuče je 7,17h. Uz modernizaciju pruge VT612 bi mogao voziti, prema izvršenim simulacijama, 4,13 h. Dakle, prosečnu komercijalnu brzinu od 58,6 km/h je moguće podići na 80 tj. 101,7 km/h. Od Zagreba do

Rijeke (230 km) redovni voz vozi 3,29h. Na probnoj vožnji tokom 2000-te godine voz sa naginjanjem je postigao vreme vožnje od 2,35h, a uz modernizaciju pruge vreme vožnje bi moglo biti 2,12h /5/. Dakle, prosečnu komercijalnu brzinu od 69,9 km/h je moguće podići na 97,9 tj. 108,5 km/h.

PRUGA BEOGRAD - BAR

Pruga Beograd-Podgorica-Bar (sl. 15) je projektovana kao jednokolosečna pruga, sa minimalnim poluprečnikom horizontalnih krivina $R_{min} = 300$ m, za brzine od 80-120 km/h i za

osovinsko opterećenje od 22,5 t. Merodavni uspon u smeru ka moru je 18‰, u suprotnom smeru na deonici Podgorica-Kolašin 25‰, a na ostalom delu 18‰. Na relaciji Resnik-Podgorica (405,1 km) preko 20% pruge leži na nagibu od 10 do 20‰ (od toga preko 12% na nagibu od 15 do 20‰), a oko 20% pruge je na padu od -10 do -25‰ (od toga 8% na padu od -20 do -25‰). Oko 56% pruge leži u krivinama, a 44% u pravcu, tj. preko 37% dužine pruge je u krivinama čiji je minimalni poluprečnik $R_{min} \leq 500$ m, a 12% pruge je sa $R_{min} = 300$ m. Pruga Resnik-Podgorica-Bar ima zakrivljenost od 57,6% /6/.



Slika 15. Uzdužni profil pruge Beograd-Bar

Na relaciji Beograd-Bar, prema redu vožnje 2003/2004, najkraće vreme putovanja iznosi nešto manje od 8h što znači da se ostvaruje prosečna komercijalna brzina od oko 59 km/h. Prema redu vožnje iz 1990/1991. godine prosečna komercijalna brzina je iznosila oko 68 km/h, a primenom voza sa naginjanjem sanduka kola serije ETR450 proračunata je prosečna komercijalna brzina od oko 97 km/h.

U toku kretanja na voz deluju otpori kretanja voza koji potiču od nagiba, krivina pruge i tunela. Svi ovi otpori se mogu odrediti iz građevinskog uzdužnog profila pruge koji postoji za sve deonice pruge. Ukoliko se voz predstavi materijalnom tačkom, u kojoj je skoncentrisana njegova celokupna masa, tada se dodatni otpor pruge može odrediti na osnovu sledećeg empirijskog obrasca:

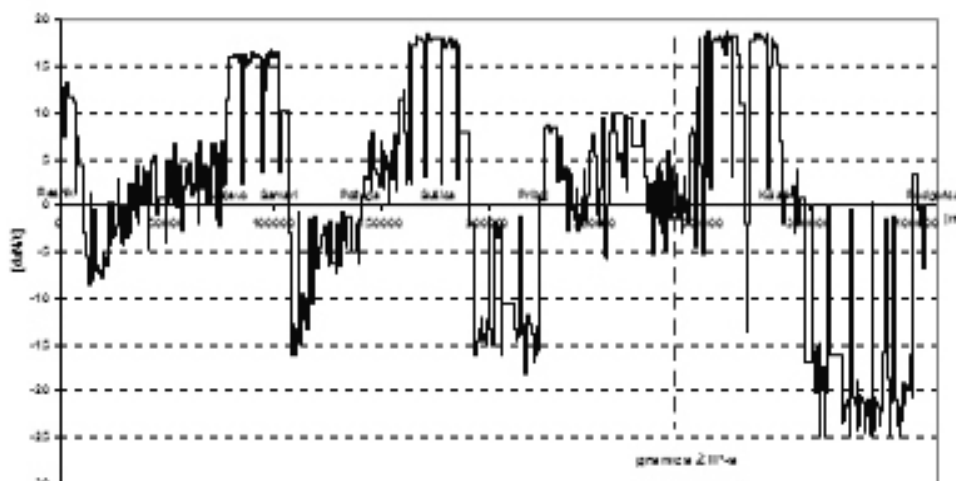
$$F_R^{dod}(s) = m_v \cdot \left[i(s) + \frac{C_0}{R(s) + R_0} \right]$$

gde su: $F_R^{dod}(s)$ [daN] - dodatni otpor voza u zavisnosti od mesta na pruzi sveden na materijalnu tačku, m_v [t] - ukupna vučena masa voza, $i(s)$ [‰] - nagib trase pruge na određenom mestu na pruzi, $R(s)$ [m] - poluprečnik krivine na određenom mestu na pruzi, C_0 i R_0 - empirijske konstante (na JŽ-u su usvojene vrednosti: $C_0 = 650$ i $R_0 = -55$). Osnovnom dodatnom otporu $F_R^{dod}(s)$ odgovara specifični dodatni otpor:

$$f_R^{dod} = \frac{F_R^{dod}}{m_v} \text{ [daN/t]}$$

Argumentsoznačava s tacionažu pruge, a funkcije $i(s)$ i $R(s)$ predstavljaju uzdužni profil pruge.

Na slici 16 dat je specifični dodatni otpor pruge Beograd - Bar da bi se stekao uvid u težinu ove pruge i njene mogućnosti za saobraćaj vozova sa naginjanjem sanduka kola.



Slika 16. Specifični otpor pruge Beograd (Resnik)-Bar

ZAKLJUČAK

Poznato je da se brzina železničkih vozila u krivinama može povećati oko 25%, bez ugrožavanja komfora putnika, ako se vrši naginjanje sanduka kola. Ovo podrazumeva nadvišenje spoljne šine od 150 mm, kao i aktivan sistem naginjanja sanduka kola koji je sposoban da nagne sanduk kola do 8°. Opšte rečeno u svetu je trend od hidrauličkog ka elektromehaničkom pogonu sistema za naginjanje.

Primenom tehnike naginjanja kod dizel-motornih vozova serija VT610, 611 i 612, koji saobraćaju na prugama južne i istočne Nemačke sa dosta krivina, postižu se do 30% veće brzine i skraćenje vremena putovanja za 20 do 30%.

Vožnjom voza X2000 sa naginjanjem sanduka kola na Švedskim železnicama skraćeno je vreme vožnje na relaciji Stokholm-Geteborg za 31%, a na relaciji Stokholm-Malme za 29%.

Ispitivanjem Pendolino vozova serije 401 u Sloveniji postignuto je skraćenje vremena putovanja na relaciji Ljubljana-Jesenice za 22%, a prosečno povećanje brzine od 33%.

Prosečna komercijalna brzina Pendolino vozova SZ310 na relaciji Ljubljana-Maribor iznosi 88 km/h.

Na probnim vožnjama u Hrvatskoj sa vozom serije VT612 postignuto je skraćenje vremena vožnje na relaciji Zagreb-Split od 27%, a na relaciji Zagreb-Rijeka 29%.

Primenom voza sa naginjanjem Pendolino serije 450 moguće je, po proračunima, skratiti vreme putovanja za skoro 30% ukoliko se pruga Beograd-Bar vrati u stanje iz 1990/91. godine (vreme putovanja je 2003/2004. produženo 15% u odnosu na red vožnje 1990/1991.). Svi proračuni pokazuju da se na teškoj brdsko-planinskoj pruzi, kao što je pruga Beograd-Bar, može postići maksimalna komercijalna brzina od oko 100 km/h što potvrđuju probne vožnje na sličnim prugama (Zagreb-Split, Zagreb-Rijeka, Ljubljana-Jesenice, Ljubljana-Maribor) u bivšim jugoslovenskim republikama. To znači da se, primenom najsavremenijih vozova sa naginjanjem sanduka kola i određenim - razumnim - intervencijama u samu prugu, može očekivati da se na pruzi Beograd-Bar postigne vreme putovanja maksimalno između 4,30 i 5h. Navedene rezultate moguće je ostvariti bez rekonstrukcije tj. izmene geometrijskih parametara trase, pod uslovom da pruge budu održavane u tehnički ispravnom stanju i da SS i TK uređaji i kontaktna mreža ne umanjuju brzine koje pruga dozvoljava.

LITERATURA

- /1/ Uwe Wulf: "Porodica motornih vozova Talent i dizel-voz s tehnikom naginjanja "Regio Swinger" firme Bombardier Transportation u regionalnom železničkom saobraćaju", *Železnice*, broj 3-4, 73-80, (2002).
- /2/ Volker Kottenhahn: "The Tilting Trains Operated by Deutsche Bahn", *Railway Technical Review*, No 3-4, 24-35, (2000).

- /3/ SI CIP: "Metodologija izbora voznih sredstava za pruge velikih brzina - Knjiga II - Elektromotorni vozovi i putnička kola za velike brzine", Beograd, (1996).
- /4/ Institut za saobraćaj Sarajevo: "Studija podobnosti uvođenja vozova Pendolino u saobraćaj na JŽ", Sarajevo, (1991). [5] B. Butković: "Prva vožnja nagibnog vlaka za Hrvatsku", Željezničar, (2004).
- /5/ B. Butković: " Prva vožnja nagibnog vlaka za Hrvatsku", Željezničar, (2004)
- /6/ Dušan Milutinović, Aleksandar Radosavljević: "Termičko opterećenje monoblok točka železničkog vozila kočenog papučama u eksploataciji na jugoslovenskim prugama", Železnice, br. 1-2, 30-39, (2000).

THE TILTING TRAINS POSSIBILITIES

Increasing the speed tendency by construction new high-speed and upgrading existing lines, which unique demonstrate at almost all railway companies, set permanent problem choice between appropriate vehicles. However, during choice new solutions it is necessary by considerate analysis everything that is obtained and lose to point out optimal solutions which will satisfy certain difficult operation conditions. Thirty years have gone by putting first tilting train series ETR401 in operation which enable increasing the speed and shortening running times also at existing but technically modernised lines. The paper shows some of modern diesel and electric tilting train sets as well as appropriate tests with this rolling stock in Croatia, Slovenia and wide in Europe. Specific basic resistance of Belgrade-Bar line is presented and estimated possibilities of shortening running times using modern tilting trains at this line.

Key words: railway, tilting trains, running time, running resistance