

UŠTEDA POGONSKE ENERGIJE ŽELEZNIČKIH VUČNIH VOZILA

Dr Aleksandar Radosavljević,
Saobraćajni institut CIP, Beograd

Docent dr Dušan Milutinović,
JŽTP "Beograd"

Potrošnja pogonske energije je jedna od osnovnih i najvećih stavki u troškovima vuče vozova. Bez mogućnosti tačnog određivanja potrošene pogonske energije ne može se zamisliti unapređenje organizacije vuče vozova u smislu povećanja ekonomičnosti rada, boljeg korišćenja i veće produktivnosti vučnih vozila. U cilju određivanja potrošnje energije železničkih vučnih vozila date su eksploatacione i tehničke mere za uštedu energije, kao i mogućnosti optimizacije potrošnje energije. Većinu od tih mera moguće je sprovesti i na našoj železnici.

Ključne reči: železnica, osnovni otpor, potrošnja energije, ušteda energije, vozna sredstva

UVOD

Železničke uprave razvijenih zemalja sveta pridaju poseban značaj smanjenju potrošnje energije pri vuči vozova. Ovome problemu pridavan je veliki značaj još od 60-tih godina, a pogotovo od početka energetske krize. U 1975. godini, odmah posle početka svetske energetske krize, troškovi energije u Sjedinjenim Američkim Državama su prosečno iznosili 5-10% troškova eksploatacije (što se i danas smatra prosekom u svetu), dok su 1986. godine iznosili 15-20%. Učešće troškova energije u ukupnim troškovima eksploatacije uglavnom ima tendenciju opadanja, tj. rast troškova energije je znatno sporiji u odnosu na rast ukupnih troškova u kojima su sadržani amortizacija sredstava, troškovi radne snage i troškovi energije. Međutim, rastuće cene energije, kao i nemogućnost obezbeđivanja dovoljne količine energenata, obavezuju sva saobraćajna preduzeća da istražuju i realizuju mogućnosti uštede energije. Pri sadašnjim cenama energije troškovi energije kod prigradske železnice u Minhenu učestvuju u ukupnim eksploatacionim troškovima sa 25%.

Za procenu specifične potrošnje energije mogu se koristiti sledeći pokazatelji:

- kod železnica u ravničarskim predelima: 20 ÷ 30 Wh/tkm,
- kod železnica u planinskim predelima: 30 ÷ 65 Wh/tkm,
- kod brzih gradskih železnica: 50 ÷ 75 Wh/tkm,
- kod tramvaja: 40 ÷ 90 Wh/tkm,
- kod trolejbusa: 90 ÷ 130 Wh/tkm.

Specifična potrošnja energije električne vuče na Nemačkim železnicama (DB) u 1990. godini iznosila je 26 Wh/tkm (u 1987. godini 27 Wh/tkm) pri udelu putničkih vozova u ukupnom prevozu od oko 39% (40%). Specifična potrošnja energije teretnih vozova je iznosila 18 ÷ 41 Wh/tkm.

Bivše Istočnonemačke železnice (DR) su objavile podatak, za period od 1981. do 1985. godine, da je specifična potrošnja energije električne vuče teretnih vozova 24,4 Wh/tkm, a specifična potrošnja energije električne vuče putničkih vozova 31,7 Wh/tkm.

Kod Švajcarskih saveznih železnica (SBB) prosečna specifična potrošnja energije je oko 43 Wh/tkm. Zahvaljujući rekuperativnoj kočnici specifična potrošnja energije kod brzih putničkih vozova u planinskim predelima je samo za oko 7% veća od potrošnje energije u ravnicima. Ova razlika kod daljinskih teretnih vozova iznosi 40%. Regionalni vozovi sa zaustavljanjem u svim stanicama troše oko 50% više energije od brzih vozova. Vožnjom brzog voza u tunelu kroz ravnice potrošnja energije se povećava za oko 20%.

Ukupna potrošnja električne energije svih železnica u Švajcarskoj (savezna železnica, privatna železnica, lokalni saobraćaj) je iznosila 1990. (odnosno 1987.) godine 2574 GWh (2328 GWh), tj. 5,1% (5%) celokupne potrošnje električne energije u zemlji od 50 271 GWh (47 142 GWh) /1/.

Specifični energetske troškovi železničke vuče su, zbog manjih otpora vuče vozila po šinama, znatno

manji od troškova u drumskom saobraćaju, ali im je ukupan godišnji iznos ipak znatan. U Tabeli

1 dat je utrošak energije i izvršen rad na JŽ u 1985. godini /2/.

Vrsta vuče	Utrošak energije [GWh]	Izvršeni rad [Gtkm]	Specifična potrošnja [Wh/tkm]
Elektricna	1064,5	48,88	21,78
Dizel	2056	24,29	84,64
Parna	457	0,61	749,18
Ukupno	3577,5	73,78	48,48

Da bi stekli uvid u mogući rad koji se izvrši na teritoriji ŽTP-a "Beograd" data je Tabela 2 sa

pokazateljima utroška pogonske energije i izvršenog rada u periodu I-XII 1990. godine.

POKAZATELJI	VRSTA VUČE		
	elektro	dizel	parna
Izvršeni rad [kbrtkm]	13.805.957	6.080.047	-
Utrošena količina pogonske energije	291.536 [MWh]	25.732 [t]	464 [t]
Specifična potrošnja	21,12 [Wh/tkm]	4,23 [g/tkm]	-

Tabela 2. Utrošak pogonske energije i izvršeni rad tokom 1990.godine

Specifična potrošnja električne energije za vuču na Bugarskim železnicama (БДЖ) /3/, prema podacima do 1983. godine, iznosila je oko 24 Wh/tkm.

Ušteda pogonske energije je jedan od najvažnijih faktora kada se proračunavaju troškovi životnog veka vozila /4/. Zbog toga sve više kupaca traži vozila koja imaju malu potrošnju pogonske energije. U cilju iznalaženja savremenog rešenja za znatno smanjenje potrošnje energije železničkih vozila firma Adtranz je pokrenula poseban projekat nazvan "Upravljanje energijom". Primenjujući program za upravljanje energijom na Nemačkim železnicama moguće je ostvariti uštedu pogonske energije oko 12% (primer električne lokomotive serije BR 101).

Poseban simulacioni model za procenu uštede pogonske energije vozova za velike brzine je razvijen u Tajvanu /5/. Simulacioni model obuhvata simulatore kretanja voza, upravljanja kretanjem i potrošnje energije. Razmatrane su četiri strategije uštede pogonske energije, kao i njihove kombinacije: smanjenje maksimalne brzine (vožnja voza brzinom od 280 km/h umesto 300 km/h), smanjenje ubrzanja (vožnja voza sa 90% od maksimalnog ubrzanja kada je voz u režimu ubrzanja), prevremena vožnja po inerciji (početak vožnje po inerciji na mestu koje je za 50% bliže od mesta na kome bi se stvarno

voz kretao po inerciji) i tzv. testerasta vožnja po inerciji (vožnja po inerciji i ubrzanje voza između brzina 300 i 275 km/h). Osnovni rezultati

simulacije uštede energije su:

- zavisnost između potrošnje energije i vremena vožnje je nelinearna,
- jedna strategija vožnje nije efikasna za sve vrste vozova,
- prevremena vožnja po inerciji je efikasna samo za vozove sa malim brojem međustanica ili za direktne vozove.

MERE ZA UŠTEDU ENERGIJE

Mere za štednju energije koje se primenjuju kod razvijenih železničkih uprava su eksploatacione i tehničke.

Eksploatacione mere

Način vožnje (maksimalno moguće korišćenje vožnje po inerciji)

Poznata je činjenica da mašinovođa, na jednom određenom međustaničnom rastojanju, može uštedeti pogonsku energiju samo ako je planirano (raspoloživo) vreme vožnje veće od minimalno mogućeg vremena vožnje. Ukoliko postoji višak vremena vožnje on se bolje može iskoristiti za uštedu energije na deonicama gde postoje krivine i promene maksimalno dozvoljene brzine vožnje. Smanjenje brzine voza se može postići ranijim isključivanjem vuče, a ne kasnijim kočenjem, čime se koristi raspoloživi višak vremena. Nije dozvoljeno postizanje uštede pogonske energije prekoračenjem planiranog vremena vožnje. Na ravnim deonicama, ako voz staje u obe stanice, ušteda pogonske energije se

može postići maksimalno mogućim ubrzanjem i ranijim isključivanjem vuče. Poznato je npr. da Britanske železnice (BR) za prigradske vozove imaju ispred stanica signale za isključivanje vuče.

Ukoliko bi se iskoristile vremenske rezerve reda vožnje mogle bi se ostvariti znatne uštede u potrošnji energije. Radi toga mašinovođa mora stalno biti informisan, putem odgovarajućih tehničkih sredstava, o optimalnom momentu isključivanja vuče. Tehnička sredstva ove vrste idu od oznaka duž pruge, računara na samom vozilu do stacionarnih računara. Za upravljanje saobraćajem može se reći da stepen moguće uštede energije zavisi od stepena tehničke podrške. U toku vožnje voza postoji uvek neka tačka duž pruge na kojoj se mora smanjiti brzina zbog konstrukcionih razloga ili zbog same trase pruge. Pred ovim mestom, pogonska energija lokomotive se može isključiti i u okviru faze kretanja po inerciji jedan deo kinetičke energije se može iskoristiti za savladavanje otpora vožnje. Pošto vožnja po inerciji, prirodno, dovodi do produženja vremena vožnje, to je dužina ove faze vožnje, a tako i stepen uštede pogonske energije isključivanjem vuče, direktno zavisao od viška raspoloživog vremena prema najkraćem vremenu vožnje. Sve ovo doprinosi zaključku da je osnovni princip optimalne vožnje voza polazak sa velikim ubrzanjem, što duža vožnja po inerciji i kočenje iz niže brzine sa najvećim mogućim usporanjem.

Iskustva jugoistočnog regiona Britanskih železnica su pokazala da se instalacijom oznaka pored pruge koje pokazuju odakle treba voziti korišćenjem inercije voza, kao i neprekidnom inicijativom za motivaciju mašinovođa može uštedeti oko 17% pogonske energije /6/. Znatno složenije rešenje predstavlja instalacija "crnih kutija" pored pruge koje prate mesto i brzinu voza i aktuelno vreme koje upoređuju sa planiranim vremenom i daju savete mašinovođi da li da koristi vuču ili kočenje. Najsloženiji sistem za uštedu pogonske energije je baziran na uvođenju upravljanja kretanjem vozova pomoću evropskog komunikacionog sistema (ETCS - European Train Communication System) pomoću koga je uspostavljena stalna kontrola kretanja voza i njegovo upravljanje prema energetskim kriterijumima.

Uvođenje energetskih kriterijuma u konstrukciju reda vožnje

Uvođenje energetskih kriterijuma u konstrukciju reda vožnje (što duža vremena vožnje, što kraće zadržavanje u stanicama, uspostavljanje veze između vremena vožnje i potrošnje energije) su često u suprotnosti sa tendencijom povećanja tehničke i komercijalne brzine vozova pa se stoga oni moraju jasno, unapred, odrediti i biti na raspoloženju konstruktoru reda vožnje prilikom samog procesa konstrukcije reda vožnje.

Uvođenje energetskih kriterijuma u regulisanju saobraćaja vozova kod odstupanja od reda vožnje

Uvođenjem energetskih kriterijuma u operativnom regulisanju saobraćaja vozova kod odstupanja od reda vožnje mogu se postići znatni efekti u štednji energije. Ova tvrdnja je zasnovana na činjenici da je neregularnost saobraćaja velika i svakodnevna pojava. Uzroci odstupanja od reda vožnje su raznovrsni i mnogobrojni pa je mala verovatnoća da se u bliskoj budućnosti mogu otkloniti. Kašnjenje jednog voza prouzrokuje kašnjenje i drugih vozova tako da se teži da se ove konfliktne situacije razreše sa što manje negativnih posledica. Razvijene železničke uprave koriste računare za upravljanje saobraćajem vozova sa ugrađenim energetskim kriterijumima pri rešavanju konfliktnih situacija. I kod nas se intenzivno radi na projektu softvera za praćenje izvršenja reda vožnje i regulaciju saobraćaja vozova iz sistema Beovoz, koji ako bude bolje finansijski podržan može ravnopravno da konkuriše stranim rešenjima.

Povećanje stvarnih masa vozova

Povećanje stvarnih masa vozova deluje dvostruko povoljno na uštedu energije: smanjuje broj vozova za isti izvršeni rad i smanjuje specifične otpore vuče. Naravno, povećanje masa vozova je ograničeno mogućnostima (snagom) vučnih vozila na određenoj deonici pruge.

Smanjenje broja praznih lokomotivskih vožnji

Dobrom organizacijom saobraćaja broj praznih ("reži") lokomotivskih vožnji svodi se na najmanju moguću meru. Zbog toga se mora posebna pažnja posvetiti kako kvalitetnoj izradi turnusa lokomotiva prilikom konstrukcije reda vožnje, tako i operativnom praćenju i izvršenju turnusa lokomotiva.

Tehničke mere

U principu, potrošnja pogonske energije za vuču jednih kola putničkog voza sastoji se iz sledećih kategorija: gubitaka u mreži (pretvaranje i prenos električne energije od podstanice do vučnog vozila), gubitaka pri vuči voza (gubici u vučnom vozilu i gubici zbog otpora kola), energije koja se troši na komfor vožnje (grejanje, hlađenje, provetravanje, osvetljenje, toalet) i na gubitke energije za funkcionisanje kola (kočenje, otvaranje i zatvaranje vrata).

Povećanje koeficijenta iskorišćenja vučnih vozila

Iako su sva železnička vozila projektovana za eksploataciju u celom opsegu opterećenja u stvarnosti ona rade, u visokom procentu vremena eksploatacije, u režimu niskog opterećenja (vožnja po inerciji, smanjena vučna sila zbog niskih vrednosti adhezije,...). Zato je potrebno obezbediti poboljšanje koeficijenta iskorišćenja vučnih vozila u režimima smanjene snage /4/.

Smanjenje otpora vuče

Formule osnovnog otpora voza predstavljaju značajnu podlogu za konstrukciju reda vožnje, za projektovanje pogonskih uređaja vučnih sredstava, kao i za određivanje potrošnje energije kod postojećih i budućih projektovanih železničkih linija. Zato je neophodno tačno određivanje otpora kretanja različitih vozova u

eksploataciji.

Za ocenu uticaja različitih otpora kretanja na ukupno vreme vožnje i potrošnju pogonske energije realizovano je više istraživanja na našoj železnici u okviru kojih je izvršena simulacija više vožnji teretnog voza vučenog lokomotivama serija JŽ 441 i 461. Simulacija je izvršena na različitim prugama ŽTP-a "Beograd" sa različitim vučenim masama vozova, a na osnovu dobijenih vrednosti, ako se računa po klasičnom obrascu za proračun otpora kretanja voza (Štral), može se zaključiti da se vreme vožnje (za obe lokomotive) neznatno smanjuje (do 0,5%) ako se otpori kretanja računaju sa kotrljajućim ležajima umesto sa kliznim. To se moglo i očekivati s obzirom da je vučna sila obe lokomotive, u dijapazonu brzina u kome se kreću vozovi, znatno veća od otpora kretanja. Specifična potrošnja energije, računajući sa kotrljajućim ležajima umesto kliznim (po Štralu) kod vuče voza sa lokomotivom serije JŽ 441, smanjuje se u proseku za oko 5%. Međutim, ako se otpori računaju po novom eksperimentalno snimljenom obrascu kod nas, ta razlika je za kotrljajuće ležaje oko 15% /7/, a ukupno smanjenje specifične potrošnje energije je oko 20% (Tabela 3). Kod lokomotive serije JŽ 461 primena kotrljajućih ležaja umesto kliznih (po Štralu) daje smanjenje za oko 3%, a ako se računa sa novim obrascem to smanjenje je do 20%. Ukupno smanjenje specifične potrošnje energije za lokomotivu serije JŽ 461 je oko 22% /8/

Seriya lokomotive	441			461		
Vrsta ležaja i primenjeni obrazac	klizni -Štral-	kotrljajući -Štral-	kotrljajući -novi-	klizni -Štral-	kotrljajući -Štral-	kotrljajući -novi-
Prosečna specifična potrošnja energije [Wh/tkm]	31,75	30,08	25,55	44,9	43,7	35,14

Tabela 3.

Automatska regulacija temperature pri grejanju putničkih kola

Grejanje putničkih kola bez automatske regulacije temperature (regulisanje temperature otvaranjem prozora od strane putnika) predstavlja nedozvoljeno rasipanje energije. Zato se sva savremena kola prave sa uređajima za automatsku regulaciju temperature. Regulacijom temperature se, prema ispitivanjima Instituta međunarodne unije železnica (ERRI - European Rail Research Institute) postižu uštede od 22,5% što nije malo, jer, prema istom izvoru, godišnja potrošnja za grejanje jednih kola može dostići i

50 000 kWh /2/.

Uvođenje rekuperativnog kočenja

Električno kočenje sa vraćanjem energije u mrežu - rekuperativno kočenje, može se primeniti kako za zaustavljanje voza (smanjenje brzine prilikom kočenja) tako i za održavanje željene brzine na padu. Razvijene železničke uprave sve više primenjuju rekuperativno kočenje kod novoizgrađenih vučnih vozila. Osnovni problem je u investiranju u pouzdan regulator napona koji bi obezbedio da napon na pantografu lokomotive prilikom kočenja bude viši od napona u kontaktnoj mreži što je uslov za povratak energije u mrežu i

pouzdanu kočnju.

Pri rekuperativnom kočenju kod električnih vučnih vozila može se pri kočenju vratiti u mrežu i do 80% raspoložive energije [2]. Umesto rekuperativnog može se uvesti reostatsko kočenje kod kojeg postoji problem iskorišćenja oslobođene električne energije jer se sva električna energija kočenja pretvara u toplotnu i odvodi nepovratno u spoljnu sredinu.

Smanjenje gubitaka u stabilnim postrojenjima električne vuče

U elektranama se proizvodi naizmjenična trofazna struja napona 15 kV, odnosno 20 kV, i odmah se na izlazu iz elektrane transformiše u visoki napon 110 kV, 220 kV, ili 380 kV, koji omogućava ekonomičan prenos električne energije do potrošača uz ostvarenje minimalnih gubitaka na putu. Električna energija za napajanje vučnih vozila na elektrifikovanim prugama monofaznim sistemom 25 kV, 50 Hz, preuzima se od elektroprivrede sa mreže napona 110 kV u elektrovučnim podstanicama gde se napon transformiše na vrednost od 25 kV i kontaktnom mrežom dovodi do vučnih vozila. Pri ovom prenosu energije od elektrane do vučnog vozila gubi se energija na sledećim mestima: u distribucionom sistemu elektroprivrede visokog napona (u transformatoru napona 15 (20) kV/110, 220, 380 kV, u dalekovodu visokog napona 110, 220, 380 kV, u transformatoru 220 (380) kV/110 kV i dalekovodu visokog napona 110 kV) i u prenosnom sistemu železničke mreže (u transformatoru elektrovučne podstanice napona 110 kV/25 kV i u kontaktnoj mreži napona 25 kV) [9].

Ovi gubici iznose, za monofazni sistem, od 5-10% od ukupne potrošnje energije za vuču (prosečno oko 7%). Mogu se smanjiti za oko 1% uvođenjem automatske regulacije napona koja bi kompenzovala promene napona u 110 kV mreži i pad napona u transformatoru elektrovučne podstanice.

MOGUĆNOSTI OPTIMIZACIJE POTROŠNJE ENERGIJE

S obzirom da su mnoge od mogućnosti racionalizacije potrošnje energije već prilično iskorišćene, predmet najnovijih istraživanja je način vožnje voza, kako bi se za zadatu relaciju pruge izabrali režimi vožnje sa smanjenom ili optimalnom potrošnjom energije u odnosu na

uslove unapred postavljene i definisane redom vožnje.

Optimizacija potrošnje energije putem simulacije načina vožnje, postala je moguća uvođenjem elektronske obrade podataka, odnosno računara, na železnici. Istraživanja su vršena najčešće od strane same železnice, odnosno u službama za centralnu elektronsku obradu podataka i u ređim slučajevima, u saradnji sa institutima.

Cilj optimalnog načina vožnje je da se na unapred zadatoj deonici pruge vožnja obavi u planiranom vremenu uz minimalnu potrošnju energije. Optimizacija potrošnje energije vrši povratno dejstvo i na red vožnje te se ovim poboljšavaju i metode njegovog projektovanja. Vožnja voza pomoću određenog (unapred zadatog) načina, je našla vrlo široku primenu u prigradskom železničkom saobraćaju, dok su istraživanja u domenu međugradskog saobraćaja tek u razvoju. Zajedničke su im istovetne polazne pretpostavke na kojima se zasnivaju. Prigradska železnica, sa brojnim kratkim rastojanjima između stanica, je naročito energetski intenzivna i predmet je mnogih pokušaja za smanjivanje ukupne potrošnje energije. Ušteda energije kod prigradskog saobraćaja iznosi između 8 i 14% (na osnovu nekih ranije izvedenih istraživanja) sa primenom teorije optimalnog načina vožnje. Kod prigradskog saobraćaja je već realizovan (u svetu) način vožnje voza sa optimizacijom potrošnje energije (ubrzanje-kretanje po inerciji-kočenje, odnosno ubrzanje-ravnomerno kretanje-kretanje po inerciji-kočenje, što je zavisno od maksimalne brzine i rastojanja između stanica). Kako su u daljinskom saobraćaju velika rastojanja između stanica, a time i mali udeo kočenja u toku vožnje, energetski optimalni načini vožnje još uvek nisu u dovoljnoj meri ispitani.

Prigradski železnički saobraćaj u Nemačkoj

Posebno detaljna istraživanja su vršena na prigradskoj železnici Hamburga i na liniji S6 prigradske železnice u Minhenu. Prilikom izrade reda vožnje prigradske železnice pošlo se od nekoliko unapred zadatih i nepromenjenih parametara, i to:

- vozila sa odgovarajućim tehničkim karakteristikama,
- rastojanje između stanica,
- uzdužni profil pruge sa usponima, padovima i krivinama i
- broj putnika.

Na osnovu gornjih ulaznih veličina kao i na osnovu poznavanja tražnje za prevozom, moguće je izraditi povoljan red vožnje čija se valjanost ocenjuje pomoću mnogih kriterijuma, od kojih su sledeća tri najvažnija:

- komercijalna brzina putovanja,
- fleksibilnost tj. elastičnost opsluživanja saobraćaja i
- potrošnja energije.

Kako su uticaji kriterijuma međusobno kontradiktorni, otvara se prostor za primenu metoda optimizacije u cilju minimizacije ukupnih, a posebno troškova pogonske energije, a da se pri tom podmiri ukupna tražnja. Optimizacija se može vršiti samo ako se znaju sledeće zavisnosti:

- potrošnja energije u zavisnosti od karakteristika vozila, načina vožnje i karakteristika pruge,
- zavisnost između brzine i potrošnje energije
- zavisnost između elastičnosti opsluživanja saobraćaja i uštede energije.

Polazna osnova istraživanja na prigradskoj liniji S6 železničkog saobraćaja u Minhenu je tačan prigradski saobraćaj čiji je red vožnje izrađen na osnovu planskih vremena vožnje /10/. Kod Nemačkih železnica (DB) utvrđuju se planska vremena vožnje u prigradskom saobraćaju na osnovu čistih vremena vožnje i na osnovu dodatka za regulaciju u iznosu od 3% za uravnotežavanje zakašnjenja koja mogu nastati iz saobraćajnih, eksploatacionih i/ili tehničkih razloga. S obzirom da se i ovde polazi od pretpostavke da se energetske uštede ne mogu vršiti na račun pogoršanja reda vožnje (u smislu produženja vremena vožnje na međustaničnim rastojanjima), to je jedina mogućnost poboljšanje načina vožnje. Indirektni efekti, u zavisnosti od primenjenog načina vožnje, dobijeni su još u vreme parne vuče. Pri manjoj potrošnji uglja dobijale su mašino vođe parnih lokomotiva premije. Moguća su dva energetska ekonomska načina vožnje:

- vožnja sa kretanjem po inerciji i
- vožnja sa smanjenom maksimalnom brzinom.

Zadržavanje voza u stanicama nije konstantno, već je promenljivo (smanjivano je), za slučajeve kad je to i realno moguće, odnosno kada se smanjuje broj putnika koji ulaze i izlaze iz voza na usputnim stanicama. Prema teoretskim razmatranjima i modelu simulacije moguće

je ostvariti uštedu energije u iznosu od 15,5% vožnjom po inerciji, a 13,7% smanjivanjem maksimalne brzine na pruzi.

Primena teorijskih saznanja se u praksi može realizovati na dva načina i to:

- postavljanjem računara u vučno vozilo i
- dopunskim uputstvima za mašinovođu u dokumentima reda vožnje.

Maksimalna ušteda energije, u toku vožnje, može se ostvariti samo stalnim uporednim proračunom veličine raspoloživog vremena do tačnog prispeća u sledeću stanicu i najkraćeg mogućeg vremena vožnje, na osnovu čega bi računar davao stalna uputstva mašinovođi o daljem načinu vožnje. Moguće je da računar na vučnom vozilu stalno obaveštava mašinovođu o načinu vožnje (računar ima savetodavnu ulogu), ili da se pomoću računara direktno upravlja vučnim vozilom. Druga mogućnost je da se instalira stacionarni računar za celu liniju, a prenos naredbi do vučnog vozila vršio bi se preko određenog sistema za komunikaciju sa vozom. Oba postupka zahtevaju velike investicije, dug proces razvoja i ispitivanja, kao i uvođenje postupka održavanja odgovarajuće opreme.

Pod uslovom da se odstupi od optimalnog i prihvati neko od približnih rešenja, moguće je brzo sprovesti u praksi strategiju optimalnog upravljanja unošenjem, mašinovođi namenjenih, specifičnih obaveštenja u red vožnje za određenu liniju.

U cilju provere teorijskog modela izvršeno je merenje potrošnje energije za slučaj najveće potrošnje energije (ubrzanje, kretanje maksimalnom brzinom, kočenje), za slučaj uobičajenog načina vožnje i za slučaj načina vožnje sa optimiziranom potrošnjom energije. S obzirom na broj vozova na relaciji Tutzing-Erding, nedeljna ušteda energije mogla je iznositi oko 80 000 kWh. S obzirom na individualne razlike između mašinovođa kao i na druge stohastičke uticaje (razne neravnomernosti saobraćaja), računa se sa sigurnih 60% uštede energije u odnosu na prethodno utvrđenu vrednost. Primenom rezultata istraživanja na celu prigradsku železnicu Minhena i sa cenom od 35 Eura/MWh, moguće je po ovom osnovu ostvariti godišnje uštede od 1 000 000 Eura. Ovakav način računanja ima svojih mana jer su vrednosti dobijene za liniju S6 primenjene na celu mrežu. Svaka druga linija ima svoje specifičnosti koje mogu da utiču na dobijene krajnje vrednosti. Sprovoditi merenja

na svim linijama je veliki i neophodan trošak pa su se stručnjaci na DB-u odlučili za liniju S6 kao kompromis, s namerom da ukažu na mogućnost uštede energije u zavisnosti od načina vožnje. Ipak, ne treba očekivati značajnija odstupanja rezultata primenom ovakvog načina vožnje na drugim linijama.

Prigradski saobraćaj u Australiji

Tehnološki institut Južne Australije (SAIT) i Državna uprava Južne Australije (STA) su izvršili od oktobra 1982 do marta 1985 godine istraživanja sa ciljem da se utvrdi ušteta energije kod prigradskih putničkih vozova i da se razvije i demonstrira najjeftiniji sistem za tu namenu. U ispitivanjima je primenjena teorija optimalne kontrole upravljanja. Utvrđeno je da se može očekivati ušteta energije kod gradskih i prigradskih vučnih vozila (električnih ili dizel), u opsegu od 8-14% /11/.

Model upravljanja vučnom energijom na železnici, istraživanja u SAD

Model upravljanja energijom na železnici (EMM) je grupa kompjuterskih programa koji se mogu koristiti za proučavanje troškova vučne energije i razvijen je na Univerzitetu Carnegie Mellon u Pittsburgu. Tačnost modela upravljanja energijom je testirana primenom na sistem metroa WMATA (Washington Metropolitan Transportation Authority) i na železnički sistem MARTA (Metropolitan Atlanta Rapid Transit Authority). Primena modela upravljanja energijom na sisteme MARTA i WMATA dala je uštedu potrošene energije od 9% /12/.

Energetski model voza, istraživanja u SAD

Udruženje američkih železnica (AAR) je razvilo energetski model voza, kao energetski program za simuliranje karakteristika voza, u svrhu predviđanja potrošnje energije za bilo koji voz na bilo kojoj relaciji pruge /13/. Izvršena su mnogobrojna ispitivanja potrošnje goriva sa dva tipa vozova: kompaktni voz za prevoz uglja i mešoviti teretni voz.

Upravljanje vozom i određivanje karakteristika energetskog modela voza vrši se pomoću posebno razvijenog algoritma za automatsko upravljanje koji predstavlja oblik "veštačke inteligencije". Za ocenu rezultata dobijenih pomoću energetskog modela voza odabrana su sledeća tri kriterijuma:

- Potrošnja goriva. Od najveće važnosti u razvijanju energetskog modela voza je tačnost sa kojom se predviđa potrošnja goriva. Ovaj kriterijum je "donja linija" za određivanje da li je energetski model voza upotrebljiv ili ne.
- Ciklus rada kontrolera voza. Ovaj ciklus je određen procentom od ukupnog vremena kada je kontroler lokomotive u položaju vuče ili dinamičkog kočenja.
- Raspodela brzine voza. Upoređivanjem raspodele brzina stvarno snimljenog voza sa raspodelom brzina dobijenih pomoću energetskog modela voza, može se oceniti valjanost simulacionog modela.

Na osnovu dobijenih rezultata urađeni su dijagrami ciklusa rada kontrolera za vuču voza i dijagrami raspodele brzine voza. Iako postoje neznatne razlike između teoretskih i stvarnih dijagrama, može se zaključiti da je trend dijagrama međusobno uporediv.

Na osnovu rezultata ispitivanja može se zaključiti da se pomoću energetskog modela voza može predvideti potrošnja goriva sa dovoljnom pouzdanošću. Algoritam za automatsko vođenje voza predstavlja realističan kontroler za vožnju voza i u stanju je da održi zadata raspodelu brzina voza kako za kompaktni voz za prevoz uglja, tako i za voz mešovitog sastava, te se smatra da korisnici energetskog modela voza iz železničke industrije mogu imati poverenje u dobijene rezultate.

Mere za uštedu pogonske energije na našoj železnici

Merama za uštedu pogonske energije se, do skoro, nije pridavala nikakva pažnja na našoj železnici. Takođe, samoj kvantifikaciji utrošene pogonske energije (bilo dizel ili elektro) se pridavala vrlo mala pažnja /14/.

U poslednjih desetak godina urađeno je nekoliko projekata u cilju utvrđivanja potrošnje pogonske energije na železnici. U strateško istraživačkom projektu /15/ definisane su metode za smanjenje potrošnje kako ukupne električne energije u vuči vozova, tako i vršnih opterećenja koja se javljaju u toku vožnje voza. Izvršeno je odgovarajuće merenje i eksperimentalno-istraživački rad u procesu vuče vozova po trenutno važećem redu vožnje. Slično, ali za dizel lokomotive, je urađeno u /16/. U studiji /17/ je napravljen programski paket za upravljanje električnim lokomotivama

sa primenom električnog kočenja. Izvršena je uporedna analiza rezultata simulacije i vrednosti dobijenih merenjem na pruzi Beograd - Bar, a ustanovljena je i odgovarajuća zavisnost između utrošene energije i potrošnje kočne opreme ukoliko se umesto električne kočnice koristi, kao radna, pneumatska kočnica.

Studijom "Utvrđivanje međusobne zavisnosti između potrošnje pogonske energije i vremena vožnje reprezentativnih dizel-električnih lokomotiva pri vuči vozova", koja treba da bude urađena tokom 2004. godine, utvrdiće se zavisnost između potrošnje pogonske energije (goriva i maziva) i vremena vožnje na karakterističnim relacijama za reprezentativne serije dizel lokomotiva. Na taj način stvoriće se preduslovi za preduzimanje potrebnih mera da se smanji i zaustavi nenamenska potrošnja energije, kao i njeno otuđivanje. Svi proračuni za specificirane relacije će se obaviti kako za slučaj vožnje voza po važećoj knjižici reda vožnje, tako i za slučajeve konkretnih vozova iz eksploatacije sa svojim realnim itinererima.

Softver za praćenje izvršenja reda vožnje i regulaciju saobraćaja vozova iz sistema Beovoz, koji je u fazi uvođenja, daje mogućnost kako pri projektovanju, tako i pri realizaciji reda vožnje da se eliminiše ili otkloni uticaj vozova koji imaju najveću potrošnju energije i na taj način smanji zbirna potrošnja energije u kritičnim intervalima saobraćaja.

ZAKLJUČAK

Problemi uštede pogonske energije u vuči vozova postali su veoma aktuelni u vreme energetske krize, pa su zbog toga u razvijenim železničkim upravama preduzeta opsežna istraživanja za njihovo rešavanje. Ušteta pogonske energije se ostvaruje pomoću seta tehničkih i eksploatacionih mera, kako na voznim sredstvima i saobraćajnim postrojenjima, tako i primenom odgovarajućih softvera koji garantuju minimalnu potrošnju energije. Rezultati simulacije načina vožnje voza koriste se za: izradu reda vožnje (proračun vremena vožnje, proračun produženja vremena vožnji zbog laganih vožnji, koncipiranje novih ponuda, usklađivanje vremena vožnji sa uštedom energije), gradnju novih pruga (vremena vožnje i vremenske uštete, optimalni nagibi pruga, potrošnja energije, opterećenje vučnih vozila, troškovi vuče voza), modernizaciju postojeće infrastrukture u celini (skraćivanje vremena

vožnje povećanjem brzina, ušteta vremena vožnje elektrifikacijom pruga, odnos utrošene električne energije i dizel goriva) i razvoj novih i modernizaciju postojećih voznih sredstava (uticaj promene pojedinih komponenata vučnog vozila kao što su npr. pogonski motor, vučni motor, prenosnik snage na ukupnu potrošnju energije).

Ušteti pogonske energije na našoj železnici se u poslednje vreme posvećuje mnogo više pažnje nego ranije, ali nedovoljno u odnosu na razvijenije železničke uprave Evrope. Sigurno je da će, ukoliko se započeti projekti do kraja realizuju, dobijeni rezultati i mere za uštedu energije znatno doprineti efikasnijem tržišnom poslovanju železnice.

LITERATURA

- /1/ Filipović Ž., Elektrische Bahnen, Springer-Verlag, Berlin-Haidelberg-New York, 1995.
- /2/ Radojković B., Jelić S., Racionalno korišćenje energije u železničkom i gradskom saobraćaju, Železnice, br. 7, 1987.
- /3/ Стайков Г., Някои насоки за намаляване разхода на електрическа енергия за тягови нужди, Железопътен транспорт, 1/1985.
- /4/ Unger-Weber F., Ketteler K-H., Advanced Energy Management on Railway Vehicles, WCRR, Tokyo, 1999.
- /5/ Lee C-K., A Simulation Study on the Energy Saving Strategy of Train Operation, WCRR, Tokyo, 1999.
- /6/ Ellwanger G., Railway energy consumption - Challenges and state of the art, Energy Utilisation Research Policy Conference - ERRI (UIC), Amsterdam 21,22 October 1997.
- /7/ Radosavljević A., Matematičko modeliranje, simulacija, određivanje osnovnih otpora pri kretanju voza i optimizacija potrošnje pogonske energije železničkih vučnih vozila (Doktorska disertacija), Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2002.
- /8/ Radosavljević A., Milutinović D., Jovanović R., Lučanin, V., Experimental determination of mixed freight train running resistance and influence on energy consumption, 6th World Congress on Railway Research WCRR 2003 - Topic:

Interactive Systems and Environment - Session: Energy Emissions, Edinburgh, Scotland, September 28 - October 1 2003, (40 - 47).

- /9/ Mihajlović D., Bilans materijala i energije za pogon železničkih dizel-vozila, Železnice.
- /10/ Kraus G. D., Rockenfelt B. R., Energiesparende Fahrweise bei der Deutschen Bundesbahn, Die Bundesbahn 1 (29-32), 1984.
- /11/ Innovation Developments, Energy Conservation on Suburban Rail Vehicles, Adelaide, South Australia, 1985.
- /12/ Uher R. A., Rail Traction Energy Management Model, Rail Systems Center, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA.
- /13/ Association of American Railroads, Train Energy Model (TEM), Railway Age 12, 1992.
- /14/ Vušković M., Živoinović B., Matematički model železničke vuče, Institut "Mihajlo Pupin", Beograd, 1971.
- /15/ Saobraćajni institut CIP, Strateški projekat racionalizacije potrošnje i smanjenje troškova električne energije u vuči vozova železničkog saobraćaja, Beograd 1993.
- /16/ Radosavljević A., Optimalno upravljanje dizel-električnim lokomotivama u cilju uštede pogonske energije (magistarski rad), Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1993.
- /17/ Saobraćajni institut CIP, Efekti primene električne kočnice pri vuči vozova na pruzi Beograd - Bar, Beograd 1995.

DRIVING ENERGY SAVING OF RAILWAY TRACTION VEHICLES

Driving energy consumption is one of the basic and biggest issues related to train traction costs. Without the accurate determination possibility of consumed driving energy we can not expect the progress of the traction unit organization in the sense of operation profitability increasing, better use and bigger productivity of tractive units. For the purpose of determination of the railway tractive units energy consumption, operation and technical measures for saving energy are given, as well as possibilities for energy consumption optimization. Majority of these measures is possible to take also at the Serbian Railways.

Key words: railway, basic resistance, energy consumption, energy saving, rolling stock