Dr. JOSIP ZAVADA
Fakultet prometnih znanosti
Zagreb, Vukelićeva 4

Znanost u prometu
Izvorni znanstveni rad
UDK: 629.42 : 330.567 : 519.6
Primljeno: 12.01.1994.
Prihvaćeno: 06.04.1994.

MOGUĆNOSTI SMANJENJA POTROŠNJE ENERGIJE U VUČI VLAKOVA

SAŽETAK

U radu se analiziraju mogućnosti smanjenja potrošnje energije u vuči vlakova. Postavlja se matematički model proračuna vuče vlakova i prilagođuje za određivanje optimalnih vožnji po kriteriju najmanje potrošnje energije pri zadanim rubnim uvjetima, odnosno pri određenom vremenu vožnje i dopuštenim najvećim brzinama vožnje.

S postavljenim modelom provedeni su proračuni na primjeru jedne dionice i različite vrste, sastava i mase vlakova. Dobiveni su iznosi apsolutnih i relativnih odstupanja u potrošnji energije za različite načine vožnje, te određeni energetski najpogodniji načini vožnje.

Da bi se određeni optimalni oblici vožnje mogli u praksi provesti, predlaže se izradba i oblik uputa za strojovođu. Upute bi, zbog jednostavnosti i preglednosti, bile s grafičkim simbolima i neophodnim podacima o vožnji. Uputama se predlaže naziv "informator vožnje", a služile bi kao preporuka strojovođi o načinu vožnje. Navode se i sve varijante i oblici izradbe predloženog informatora vožnje.

1. UVOD

Potrošnja energije u vuči vlakova znatna je stavka u ukupnim troškovima željeznice, pa je stoga u interesu da se ti troškovi svedu na najmanju moguću mjeru. Znatne mogućnosti u tom smislu pruža postavljanje voznog reda. Pritom se misli na pravilan odabir vrste i sastava vlakova i vučnih vozila, organizaciju prometa sa što manje čekanja u međupostajama i optimalizaciju vremena vožnje. Osim tih elemenata, koje bi svakako trebalo obraditi, bilo bi potrebno dati upute strojovođi o ekonomičnom načinu vožnje. Za sada je način vožnje prepušten znanju i iskustvu strojovođe u granicama dopuštenih brzina vožnje na pojedinim dijelovima određene dionice i traženog vremena vožnje.

Pri određivanju voznih vremena između pojedinih stajališta daje se rezerva vremena u odnosu na minimalno potrebno vrijeme. Korištenjem te rezerve vremena i optimalizacijom režima vožnje na cijeloj dionici po kriteriju minimalne potrošnje goriva, a u granicama predviđenog vremena, smanjila bi se potrošnja energije. Veličina uštede energije ovisi o većem broju čimbenika koje treba istražiti.

2. ODREĐIVANJE ENERGETSKI ŠTEDNOG NAČINA VOŽNJE

Općenito se vožnja unutar zadanih rubnih uvjeta može obavljati na sljedeće načine:

1. vožnja prepuštena iskustvu strojovođe i njegovu poznavanju stanovite dionice;
2. vožnja koju provodi strojovođa obučen za ekonomičan način vožnje. To podrazumijeva da je strojovođa stekao potrebno dopunsko obrazovanje u tom smislu;
3. vožnja prema uputama koje se strojovođi mogu dati u grafičkom ili tabličnom obliku kao prilog voznom redu;
4. vožnja potpomognuta mikroračunalom ugrađenim na vozilu. Režim vožnje se određuje za određenu dionicu pruge, vrstu i sastav vlaka, vrstu vučnog vozila, raspoloživo vrijeme i najveću dopuštenu brzinu vožnje. Pritom se optimalizacija vožnje po energetskim kriterijima najpogodnije može riješiti na stacionarnom računalu. Dobiveni rezultati pohranjuju se u mikroračunalo da bi se tijekom vožnje za navedene parametre pozvali i prikazali. Ti rezultati su preporuke strojovođi za energetski štedan način vožnje. Viši stupanj realizacije energetski štednog načina vožnje jest upravljanje vučnim vozilom s pomoću mikroračunala.

Određena istraživanja pokazuju da se školovanjem strojovođa za energetski štedne načine vožnje ne postižu znatnije uštede energije u vožnji [1]. To se može tumačiti time da strojovođe najčešće voze prema stvorenim navikama koje teško mijenjaju, ako nemaju konkretnih i izravnih uputa. Iz istraživanja provedenih u ovom radu vidi se i to da je količina utrošene energije vrlo ovisna o svim detaljima načina vožnje. Odstupanjem od energetski najpogodnijeg načina vožnje potrošnja energije raste, a to se najčešće događa ako se takav način vožnje ne sugerira strojovođi preciznim uputama.

2.1. Model za proračun vožnje

Optimalizacija vožnje vlaka po zadanim kriterijima najpovoljnije se može provesti proračunom uz primjenu računala. Za vjerodostojan proračun kretanja vlaka potrebno je postaviti matematički model koji obuhvaća sve utjecajne veličine [2]. To se odnosi u prvom redu na otpore vožnje, koji su u ovom modelu u potpunosti uzeti u obzir. Vjerodostojnost proračunanih otpora stoga ovisi samo o točnosti matematičkih izraza za pojedine otpore. Vučna sila se u klasičnim proračunima, u fazi ubrzanja vlaka, računa iz vučnog pasoša, kao najveća raspoloživa sila pri određenoj brzini. Za vrijeme ustaljene vožnje vučna sila pak ima vrijednosti djelomičnog opterećenja, što ovisi o otporima vožnje.

S obzirom na to da je cilj modeliranja u ovom radu odrediti energetski optimalnu vožnju za određenu dionicu pruge i određeni vlak, navedeni model modificiran je tako da se iz njega mogu dobiti upute za strojovođu. To znači definiranje režima rada vučnog vozila za svaki segment promatrane dionice pruge. U tu svrhu matematički model

vuče vlakova postavlja se tako da se može definirati režim rada vučnog vozila odabirom položaja kontrolera.

Za svaki položaj kontrolera definirana je vučna sila i specifična potrošnja goriva. Ovdje se kao primjer promatra dizelska lokomotiva serije 2044, za koju su na slici 1. dane vučne sile u ovisnosti o brzini vožnje za pojedine položaje kontrolera, a na slici 2. snaga, specifična potrošnja goriva i brzina vrtnje dizelskog motora, te snaga generatora u ovisnosti o položaju kontrolera.

Predočene veličine u grafičkom obliku definiraju se u analitičkom obliku za potrebe matematičkog modela. Tako je npr. vučna sila za položaj kontrolera 8:

$$F = \frac{6026{,}27}{v + 53{,}077} + 80{,}5\,[\mathrm{kN}]$$ - za brzine od 0 do 37 km/h

(sila adhezije) i

$$F = \frac{6855}{v + 9{,}2} - 5{,}1\,[\mathrm{kN}]$$ - za brzine od 38 do 124 km/h

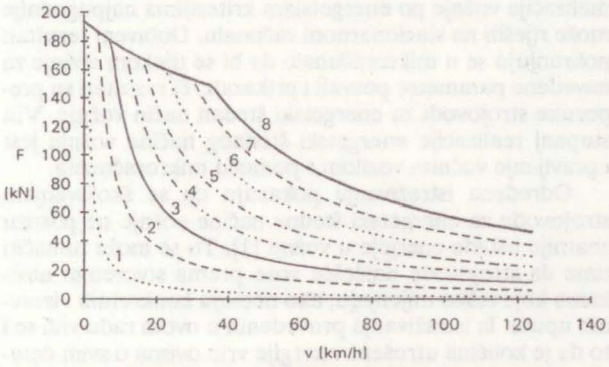
(najveća snaga).

Pritom je v [km/h] brzina vožnje. Slično se definiraju vučne sile za svaki položaj kontrolera.

Specifična potrošnja goriva izražena u analitičkom obliku je

$$g = \frac{107{,}036}{k + 0{,}842} + 213{,}9\,[\mathrm{g/kWh}]$$

pričem je k položaj kontrolera.

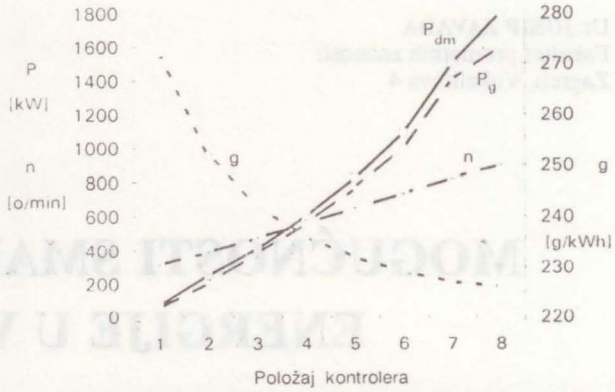


Slika 1. Ovisnost vučne sile o brzini vožnje za pojedine položaje kontrolera (1 do 8) za dizelsku lokomotivu serije 2044

Postavljeni matematički model omogućuje korisniku proračun vuče vlakova odabirući pritom dionicu pruge, vrstu i sastav vlaka s odgovarajućim vučnim vozilom, režim vožnje, odnosno ubrzanje, stacionarnu brzinu, vožnju sa zaletom i kočenje. U režimu ubrzanja odabire se položaj kontrolera. Kao rezultat proračuna dobiva se vrijeme i brzina vožnje, vučna sila, specifični otpor vožnje, snaga dizelskog motora, te satna i ukupna potrošnja goriva. S tim modelom, uz primjenu računala, može se provesti optimalizacija vožnje po kriteriju minimalne potrošnje energije za svaku dionicu pruge, te svaku vrstu i sastav vlaka.

2.2. Analiza načina vožnje

Način vožnje vlaka ovisi o dionici pruge, sastavu i vrsti vlaka, najvećoj dopuštenoj brzini i planiranom vremenu vožnje. Unutar tih rubnih uvjeta moguće su varijacije režima rada vučnog vozila čime se, dakako, stvaraju razlike u potrošnji energije. Polazište u traženju energetski najpogodnijeg načina vožnje treba biti značajka ekonomičnosti vučnog vozila. U električnih vučnih vozila to je korisnost vučnog vozila u ovisnosti o vučnoj sili i brzini vožnje, a u

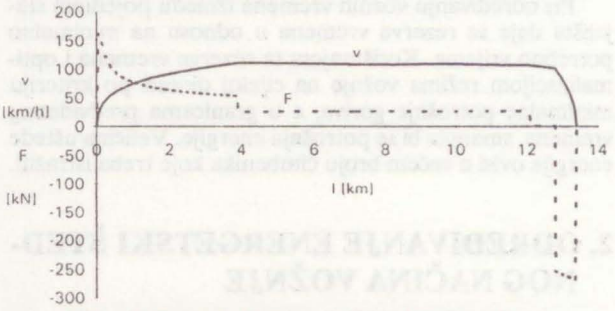


Slika 2. Ovisnost snage, specifične potrošnje goriva i brzine vrtnje dizelskog motora, te snage generatora o položaju kontrolera (1 do 8) za dizelsku lokomotivu serije 2044

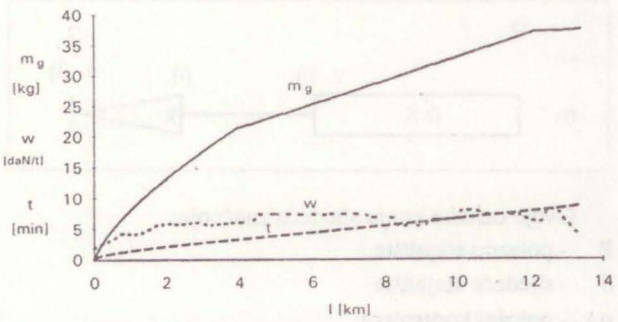
dizelskih vučnih vozila specifična potrošnja goriva u funkciji snage i brzine vrtnje dizelskog motora. Također, prije zaustavljanja vlaka treba više koristiti vožnju sa zaletom, a smanjiti kočenje, jer se kočenjem kinetička energija pretvara u toplinsku koja se izbacuje u okolinu. To znači gubitak energije. Iznimka je kočenje električnom kočnicom u električnih vučnih vozila, ako se kočenjem dobivena električna energija vraća u kontaktnu mrežu. Odnos vremena vožnje sa zaletom i vremena kočenja ograničen je planiranim vremenom vožnje. Planira li se voznim redom visoka prosječna brzina vožnje, tada su neophodna veća ubrzanja i usporenja, što znači da se neće moći voziti sa zaletom, kočenje će se provoditi s velikom kočnom silom. Takve vožnje energetski su vrlo nepovoljne.

Prema postavljenom matematičkom modelu za proračun vuče, analiza načina vožnje provest će se za vlakove koje vuče dizelska lokomotiva serije 2044, na jednoj konkretnoj dionici pruge (Bizovac-Koška, na pruzi Osijek-Varaždin). Ovisnost brzine vožnje i vučne sile o prijeđenom putu za primjer proračuna jedne vožnje predočena je na slici 3. U ovom primjeru ubrzanje putničkog vlaka mase 300 t do brzine od 110 km/h postignuto je s kontrolerom lokomotive u položaju 8. Nakon toga vožnja se nastavlja s kontrolerom lokomotive u položaju 5, što je omogućilo vožnju gotovo konstantnom brzinom vožnje. Pred kraj dionice vožnja je nastavljena sa zaletom (oko 700 m), da bi se na kraju kočilo do zaustavljanja (posljednjih oko 600 m). Za istu vožnju prikazana je na slici 4. ovisnost ukupne utrošene mase goriva, specifičnog otpora vožnje i vremena vožnje o prijeđenom putu.

Za istu dionicu i isti vlak rezultati provedenih proračuna za četiri različita načina vožnje predočeni su na slici 5. Za svaki način vožnje navedeno je vrijeme vožnje (t) i



Slika 3. Ovisnost brzine vožnje i vučne sile o prijeđenom putu za vuču putničkog vlaka mase 300 t između dvaju stajališta



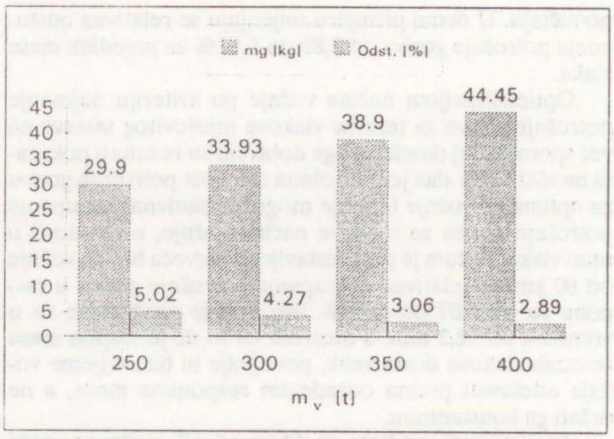
Slika 4. Ovisnost mase potrošenoga goriva, specifičnog otpora vožnje i vremena vožnje o prijeđenom putu za vuču putničkog vlaka mase 300 t između dvaju stajališta

potrošnja goriva (m). Da bi se rezultati potrošnje mogli uspoređivati na istoj osnovi, potrošnja goriva korigirana je prevođenjem vremena vožnje za sve načine vožnje na iznos od 9,30 min. Ta korigirana potrošnja goriva označena je na slici 5. oznakom mk. Razlika potrošnje goriva između načina vožnje s najmanjom i najvećom potrošnjom nije velika, i u ovom primjeru iznosi 1,4 kg goriva. Međutim, relativna razlika potrošnje goriva, odnosno njeno variranje iznosi 4,13%. Taj postotak treba respektirati imajući na umu ukupnu potrošnju goriva ukupne dizelske vuče. Dakako, relativna razlika potrošnje goriva za različite načine vožnje općenito će ovisiti o dionici pruge, sastavu i vrsti vlaka, te o vučnom vozilu.

U ovom primjeru najpogodniji je drugi način vožnje, a definiran je na sljedeći način:

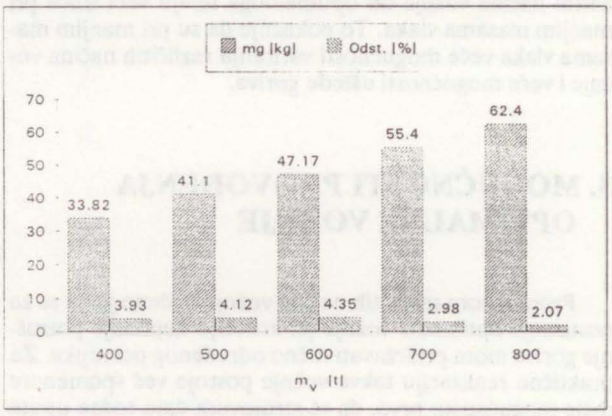
- pokretanje vlaka i ubrzanje do 105 km/h, pričem je kontroler u položaju 8,
- nastavak vožnje naizmjenično sa zaletom na duljini puta od 1000 m, te ubrzanjem do 105 km/h s kontrolerom u položaju 8,
- na kraju dionice vozi se 2500 m sa zaletom i oko 600 m se koči do zaustavljanja.

Provođenjem optimalizacije vožnje na istoj dionici za putničke vlakove različitih masa, primjenom proračunskog modela, pronalaze se optimalni načini vožnje. Za isto vrijeme vožnje od 9,30 min, na slici 6. pokazana je ovisnost

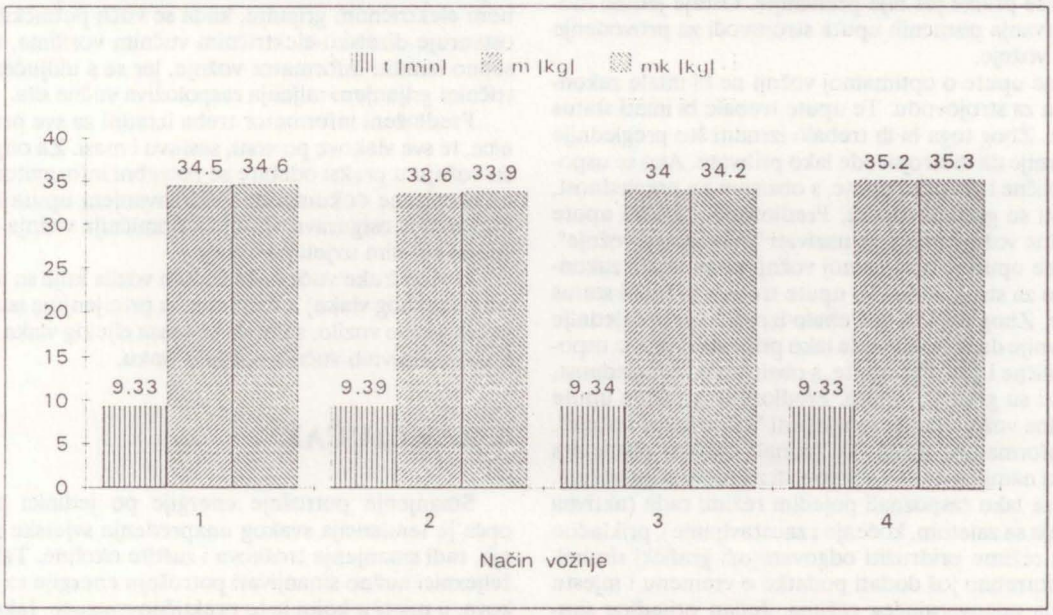


Slika 6. Ovisnost potrošnje goriva o masi putničkog vlaka pri ekonomski najpogodnijim vožnjama i moguća odstupanja

potrošnje goriva o masi vlaka pri najekonomičnijim vožnjama. Također su dana moguća relativna odstupanja potrošnje goriva za različite načine vožnje, a u odnosu na najeko-



Slika 7. Ovisnost potrošnje goriva o masi teretnog vlaka pri ekonomski najpogodnijim vožnjama i moguća odstupanja



Slika 5. Ovisnost potrošnje goriva i vremena vožnje o načinu vožnje

nomičniju. U ovom primjeru mijenjaju se relativna odstupanja potrošnje goriva od 2,89 do 5,02% za pojedine mase vlaka.

Optimalizacijom načina vožnje po kriteriju najmanje potrošnje goriva za teretne vlakove mješovitog sastava na već spomenutoj dionici pruge dobiveni su rezultati pokazani na slici 7. Na slici je predočena ovisnost potrošnje goriva za optimalne vožnje i od nje moguća relativna odstupanja potrošnje goriva za različite načine vožnje, u ovisnosti o masi vlaka. Pritom je pretpostavljena najveća brzina vožnje od 80 km/h. Relativna odstupanja potrošnje goriva u rasponu su od 2,07 do 4,35%. Sve vožnje predviđene su u vremenu od 12,2 min. S obzirom na to da je raspon masa teretnih vlakova dosta velik, povoljnije bi bilo vrijeme vožnje udešavati prema određenim rasponima masa, a ne držati ga konstantnim.

Analizirajući rezultate na slikama 6. i 7., uočava se veća potrošnja goriva za istu masu u putničkih nego u teretnih vlakova. Razlog tomu je veća prosječna brzina vožnje putničkih u odnosu na teretne vlakove. Najveća brzina za putničke vlakove u ovom primjeru iznosila je 110 km/h, a za teretne 80 km/h.

Navedena relativna odstupanja potrošnje goriva za različite načine vožnje od optimalnoga imaju veći iznos pri manjim masama vlaka. To pokazuje da su pri manjim masama vlaka veće mogućnosti variranja različitih načina vožnje i veće mogućnosti uštede goriva.

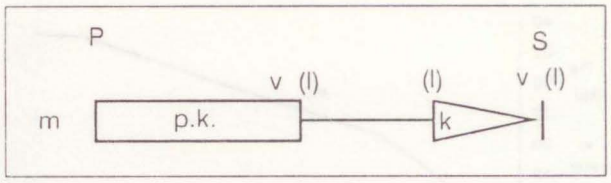
3. MOGUĆNOSTI PROVOĐENJA OPTIMALNE VOŽNJE

Proračunom različitih načina vožnje uočeno je da se za postizanje optimalne vožnje po kriteriju najmanje potrošnje goriva mora pridržavati točno određenog postupka. Za praktičnu realizaciju takve vožnje postoje već spomenute dvije mogućnosti: prvo, da se strojovođi daju točne upute u grafičkom ili tabličnom prikazu i drugo - da se na vučno vozilo ugradi upravljanje mikroračunalom. Taj drugi način upravljanja vučnim vozilom znatno poskupljuje vučno vozilo i za naše prilike još nije prihvatljiv. Ostaje jedino mogućnost davanja pismenih uputa strojovođi za provođenje optimalne vožnje.

Pismene upute o optimalnoj vožnji ne bi imale zakonsku obvezu za strojovođu. Te upute trebale bi imati status preporuke. Zbog toga bi ih trebalo izraditi što preglednije i jednostavnije da ih strojovođe lako prihvate. Ako se uspoređuju tablične i grafičke upute, s obzirom na preglednost, u prednosti su grafičke upute. Predložene grafičke upute za optimalne vožnje mogu se nazivati "informator vožnje".

Pismene upute o optimalnoj vožnji ne bi imale zakonsku obvezu za strojovođu. Te upute trebale bi imati status preporuke. Zbog toga bi ih trebalo izraditi što preglednije i jednostavnije da ih strojovođe lako prihvate. Ako se uspoređuju tablične i grafičke upute, s obzirom na preglednost, u prednosti su grafičke upute. Predložene grafičke upute za optimalne vožnje mogu se nazivati "informator vožnje". Format informatora treba biti jednak ostalim pismenim podlogama namijenjenima strojovođi za realizaciju vožnje.

Da bi se lako raspoznali pojedini režimi rada (aktivna vuča, vožnja sa zaletom, kočenje i zaustavljanje), prikladno je svakom režimu pridružiti odgovarajući grafički simbol. Tomu je potrebno još dodati podatke o vremenu i mjestu postavljanja odgovarajućeg režima. Jedan prijedlog simbola može imati sljedeći oblik:



Ovdje oznake imaju sljedeća značenja:

P - polazno stajalište,

S - sljedeće stajalište

p.k. - položaj kontrolera,

k - kočenje,

v(l) - brzina, ili prijeđeni put do kojeg treba održavati označeni režim,

m - masa vlaka.

Pravokutnik označuje vožnju s uključenom vučom odnosno s kontrolerom u položaju koji aktivira vuču. Vodoravna crta znači vožnju sa zaletom. Trokut s upisanim slovom k označuje kočenje, a okomita crta zaustavljanje.

S tako predloženim označivanjem načina vožnje prelazi se na stvaranje kompletnih uputa, odnosno informatora, u obliku stranica već definiranog formata. Na jednoj stranici informatora može se obuhvatiti jedna dionica pruge i jedna vrsta vlaka (putnički, odnosno teretni) različitih masa. Primjer mogućeg izgleda jedne stranice informatora pokazan je na slici 8.

U tom primjeru dan je raspon masa vlaka od 400 do 800 t, s korakom od 100 t. Te elemente treba prilagoditi stvarnim potrebama. Navedene mase vlaka u cijelom radu odnose se na bruto masu svih vagona u vlaku, bez lokomotive.

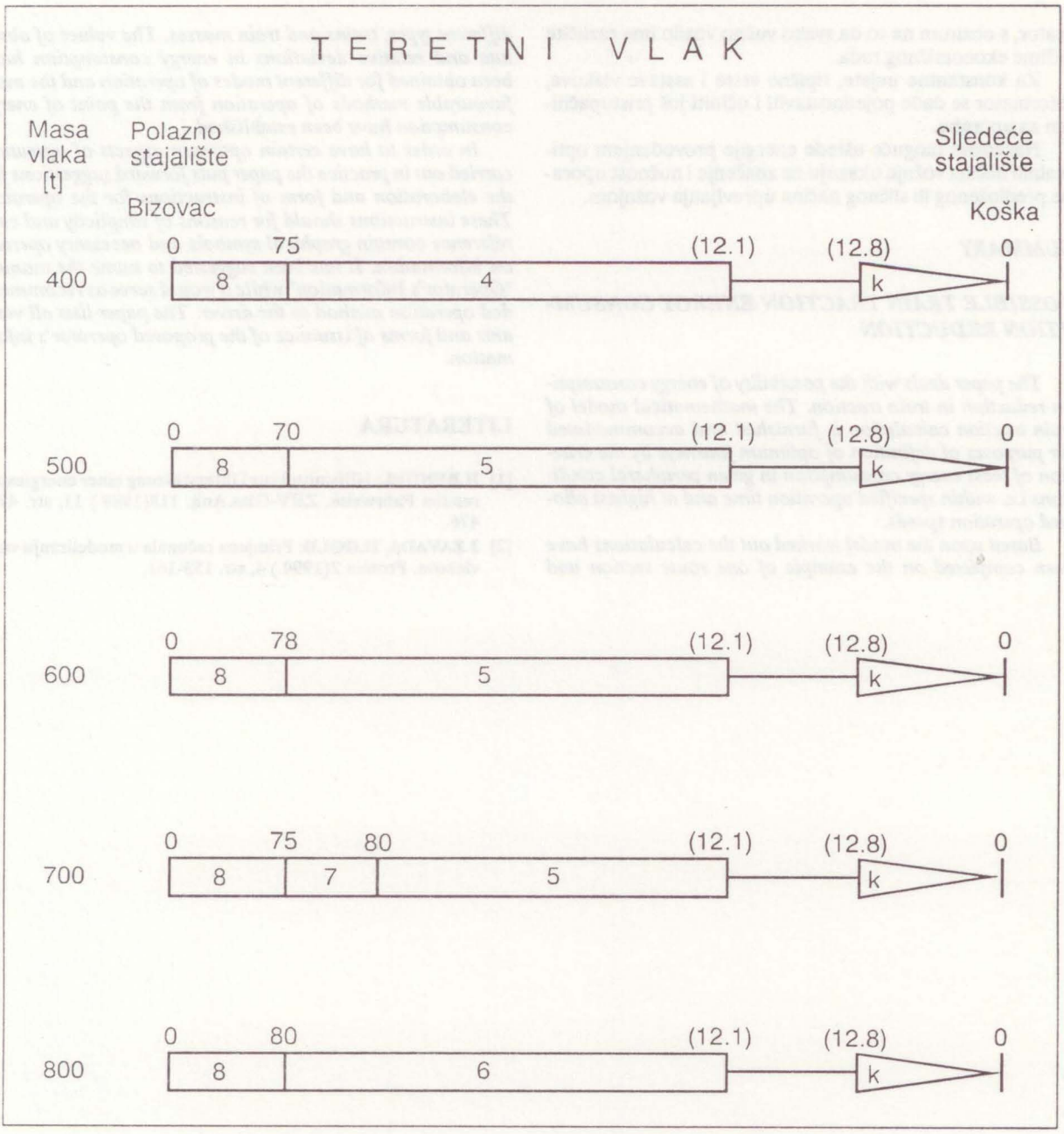
Za putničke vlakove ima više mogućnosti izvedbi informatora vožnje: vožnja lokalnih vlakova s učestalim zaustavljanjima, vožnja izravnih putničkih vlakova, vožnja putničkih vlakova s uključenim grijanjem putničkog prostora i bez grijanja. Za vožnju lokalnih putničkih vlakova pogodno je na jednoj stranici informatora dati informacije za jednu masu vlaka za cijelu dionicu sa svim stajalištima, odnosno toliki dio dionice koliko na jednu stranicu stane a da se ne gubi na preglednosti. Za svaku predvidivu masu vlaka izrađuje se posebna stranica informatora vožnje. Pri uključenom električnom grijanju, kada se vuča putničkih vlakova ostvaruje dizelsko-električnim vučnim vozilima, treba posebno izraditi informator vožnje, jer se s uključenim električnim grijanjem mijenja raspoloživa vučna sila.

Predloženi informator treba izraditi za sve pruge i dionice, te sve vlakove po vrsti, sastavu i masi. Za odgovarajuću vožnju u praksi odabire se potrebni informator i prilaže uz propisane dokumente. Pridržavanjem uputa koje daje informator osigurava se najekonomičnija vožnja u predviđenim rubnim uvjetima vožnje.

U višestruke vuče (više vučnih vozila koja su uključena u vuči jednog vlaka) informator se primjenjuje isto kao i za jedno vučno vozilo, s tim da se masa cijelog vlaka podijeli s brojem aktivnih vučnih vozila u vlaku.

4. ZAKLJUČAK

Smanjenje potrošnje energije po jedinici proizvoda opća je tendencija svakog unapređenja svjetske proizvodnje, radi smanjenja troškova i zaštite okoline. Tako je i na željeznici nužno smanjivati potrošnju energije za vuču vlakova, u mjeri u kojoj je to praktično moguće. Iako u racionalizaciji troškova vuče vlakova ima više aspekata, u ovom



Slika 8. Mogući izgled jedne stranice informatora vožnje

radu je obrađena mogućnost smanjenja potrošnje energije vuče pronalaženjem optimalnog načina vožnje.

U radu je razvijen matematički model vuče vlakova, koji omogućuje izračunavanje svih potrebnih veličina vuče. Primjenom modela provedeni proračuni pokazali su mogućnost uštede energije pravilnim vođenjem vožnje vlaka. Na primjeru provedene optimalizacije vuče dizelskom lokomotivom na određenoj dionici pruge pokazalo se da uštede u potrošnji goriva iznose i više od 5%.

Da bi se s pomoću modela određene optimalne vožnje mogle u praktičnoj vožnji realizirati, predloženo je stvaranje uputa za strojovođu, tzv. informatora. Predloženi informator ima grafičke simbole i osnovne navode za optimalnu vožnju. Predloženi oblik informatora mora u prvom redu biti pregledan i jednostavan za uporabu, kako bi ga strojovođe lako prihvatili. On ne bi bio zakonski obvezan već bi se preporučivao za uporabu.

Optimalna vožnja po kriteriju najmanje potrošnje energije ovisi o vrsti i sastavu vlaka, njegovoj masi, vrsti i seriji vučnog vozila, te dionici pruge na kojoj se vozi. Stoga se i informatori trebaju izrađivati za sve moguće varijante. Za teretne vlakove trebalo bi na jednoj stranici informatora dati upute za načine vožnje na određenoj dionici pruge, a za cijeli raspon mogućih masa vlakova s korakom od 100 t. Informatori za izravne putničke vlakove (brze i poslovne) razlikovali bi se od informatora za lokalne putničke vlakove. Za izravne vlakove bi se na jednoj stranici informatora nalazile upute za jednu dionicu i različite mase vlaka, a za lokalne s više stajališta - za jednu masu na svakoj stranici.

Za svaku vrstu i seriju vučnih vozila što se predviđa u pojedinim slučajevima vuče mora se izraditi poseban infor-

mator, s obzirom na to da svako vučno vozilo ima različite režime ekonomičnog rada.

Za konstantne uvjete, tipične vrste i sastave vlakova, informator se dade pojednostaviti i učiniti još pristupačnijim za uporabu.

Navedene moguće uštede energije provođenjem optimalnih načina vožnje ukazuju na značenje i nužnost uporabe predloženog ili sličnog načina upravljanja vožnjom.

SUMMARY

POSSIBLE TRAIN TRACTION ENERGY CONSUMPTION REDUCTION

The paper deals with the possibility of energy consumption reduction in train traction. The mathematical model of train traction calculation is furnished and accommodated for purposes of definition of optimum journeys by the criterion of least energy consumption in given peripheral conditions i.e. within specified operation time and at highest allowed operation speeds.

Based upon the model worked out the calculations have been completed on the example of one route section and different types, trains and train masses. The values of absolute and relative deviations in energy consumption have been obtained for different modes of operation and the most favourable methods of operation from the point of energy consumption have been established.

In order to have certain optimum aspects of operation carried out in practice the paper puts forward suggestions for the elaboration and form of instructions for the operator. These instructions should for reasons of simplicity and easy reference contain graphical symbols and necessary operation information. It has been suggested to name the manual "Operator's Information" while it would serve as recommended operation method to the driver. The paper lists all variants and forms of issuance of the proposed operator's information.

LITERATURA

[1] **H.BENDEL**: Hilfsmittel zur Unterstützung einer energiesparenden Fahrweise. ZEV-Glas.Ann. 113(1989.) 11, str. 473-476.

[2] **J.ZAVADA, H.GOLD**: Primjena računala u modeliranju vuče vlakova. Promet 2(1990.) 4, str. 153-161.