

Milivoj Mandić
Viktor Milardić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
milivoj.mandic@fer.hr
viktor.milardic@fer.hr

Eduard Plavec
eduard.plavec@gmail.com

ANALIZA MJERNIH I SIMULACIJSKIH REZULTATA NAPAJANJA VUČE TERETNOG VLAKA

SAŽETAK

Na dionici pruge Moravice – Rijeka – Šapjane krajem 2012. godine je provedena modernizacija željezničkog sustava, odnosno prelazak sa zastarjelog istosmjernog 3 kV sustava na jednofazni izmjenični sustav 25 kV frekvencije 50 Hz. Nakon izmjene željezničkog sustava na dionici pruge Moravice – Rijeka – Šapjane ista je puštena u pokusni rad. Duž dionice je prometovao testni teretni vlak, te su provedena mjerenja struje i napona u svakoj elektrovočnoj podstanici (EVP).

U članku je prikazan dijagram toka za simulaciju kretanja vlaka, a nakon toga su provedene usporedbe dobivenih mjernih rezultata djelatne i jalove električne snage sa simulacijskim rezultatima. S obzirom na dobivena odstupanja simulacijskih i mjernih rezultata može se zaključiti da je razvijena programska podrška sasvim adekvatna za potrebe projektiranja infrastrukture električne vuče.

U članku je ukratko analizirana i kvaliteta električne energije na osnovi dobivenih mjernih rezultata napona u EVP i struje napojnog kraka pri prometovanju testnog vlaka.

Glavne riječi: Simulator kretanja vlaka, djelatna i jalova električna snaga, usporedba, kvaliteta električne energije

ANALYSIS OF MEASUREMENT AND SIMULATIONS RESULTS OF POWER ELECTRIC TRACTION

ABSTRACT

At the end of 2012 modernization of the railway system was carried out on the railway section Moravice – Rijeka – Šapjane, i.e. transition from the outdated 3 kV DC system to the mono-phase AC 25 kV, 50 Hz. After changing the traction powering system on the railway section Moravice – Rijeka – Šapjane, the section was put into trial operation. Along the section was traveling the test freight train, and measurements of current and voltage in each electric traction substation were conducted.

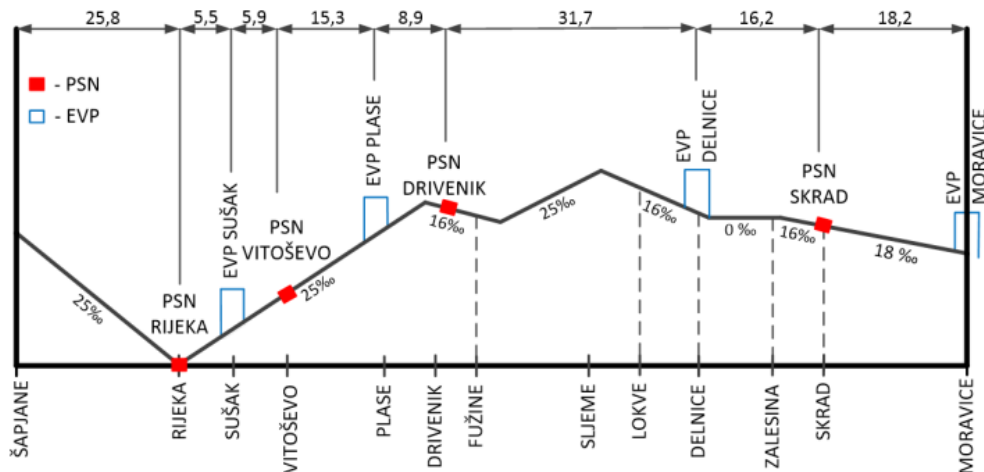
The article presents a flow chart for the simulation of the train travel. Comparison of the measurement results of active and reactive electric power with simulation results was conducted. Based on the resulting deviation of simulation and measurement results it can be concluded that the developed software is quite adequate for the design of electric traction infrastructure.

A brief analysis of the voltage characteristics (electricity quality) was conducted on the basis of the measurement results of voltage in traction substation and feeder current during traveling of the test train.

Key words: Train movement simulator, active and reactive electric power, comparison, electricity quality

1. UVOD

Na dionici pruge Moravice – Rijeka – Šapjane nedavno je provedena modernizacija željezničkog sustava, odnosno prelazak sa zastarjelog istosmjernog 3 kV sustava na jednofazni izmjenični sustav 25 kV frekvencije 50 Hz. Izmjena je od iznimnog značaja za Hrvatsku jer je cjelokupna elektrificirana željeznička mreža, nakon gotovo 30 godina, postala jedinstvena. S obzirom da je Rijeka najveće Hrvatsko lučko središte, osnovna funkcija ove pruge je prijevoz tereta, a izmjenom željezničkog sustava njezina je prijevozna kapacitet povećana sa 6 na 10 milijuna neto tona godišnje.[1] Trenutno stanje promatrane dionice, odnosno broj i raspored elektrovočnih podstanica (EVP), postrojenja za sekcioniranje (PSN) i neutralnih sekcija (NES), kao i sama konfiguracija terena prikazani su na slici 1. U izgradnji su još dvije EVP Vrata i Matulji.



Slika 1. Dionica Moravice – Rijeka - Šapjane

Dionica pruge od Moravica do Rijeke puštena je 18. prosinca 2012. u testni rad, te su nakon toga na njoj provedena mjerenja struje i napona u svakoj EVP. U ovom radu detaljnije su analizirani rezultati mjerenja provedenog 19. prosinca 2012. u EVP Plase, te su isti uspoređeni sa simulacijskim rezultatima softvera razvijenog na fakultetu.

Puštanje u pogon ovako velikog postrojenja pružilo je jedinstvenu priliku za dobivanje najpreciznijih mjernih rezultata, a razlog tome je smanjenje utjecaja ostalih vlakova koji inače voze na promatranoj dionici, [2]. To je postignuto puštanjem jednog testnog teretnog vlaka duž cjelokupnog područja napajanja svakog EVP-a.

2. SIMULATOR KRETANJA VLAKA

Simulator kretanja vlaka za elektrificirane pruge razvijen je u alatu Microsoft Visual Studio, programskim jezikom C#. Namjena ovog programa je izračunavanje položaja vlaka, te iznosa djelatne (P) i jalove (Q) snage koju vlak u određenom trenutku uzima iz mreže. Ulazni podaci neophodni za takav proračun su parametri profila pruge, planirane brzine kretanja na pojedinoj dionici, te karakteristike vlaka i lokomotive.

2.1. Fizikalna slika kretanja

Prilikom kretanja vlaka pojavljuju se različiti otpori vožnje, da bi se vučno vozilo kretalo vučna sila na obodu pogonskih kotača mora biti jednaka zbroju svih otpora. Otpori vožnje su promjenjivi, a ugrubo ih možemo podijeliti na stalne otpore (F_p), povremene otpore (F_v) i otpore ubrzanja (F_a). Kako ovi otpori ovise o mnogo različitih faktora, a utjecaj nekih je vrlo teško odrediti, za izračunavanje nekih otpora vožnje koriste se iskustvene formule.

Stalni otpori pojavljuju se kod kretanja vlaka, a čine ih otpori kotrljanja (F_k), otpori parazitskih kretanja (F_{par}), te otpori zraka (F_z). Otpori kotrljanja posljedica su deformacija kotača i tračnica, te trenja koje se između njih pojavljuje. Otpori parazitskih kretanja posljedica su vijugavog kretanja vlaka po pruži, pri čemu vlak naizmjenično naliježe na obje tračnice. Otpori zraka mogu se podijeliti na otpore uzrokovane

tlakom zraka (prednja i stražnja površina vlaka) i otpore trenja, površine po kojima zrak struji (bočne strane, krov i pod). Zbrajanjem svih navedenih otpora dobiva se ukupni stalni otpor vožnje vlaka:

$$F_p = F_k + F_{par} + F_z \quad (1)$$

Računanje pojedinih komponenti je vrlo složeno pa se u proračunu najčešće koriste empirijski izrazi koji su obično polinomi brzine oblika:

$$F_p = A \cdot v^2 + B \cdot v + C \quad (2)$$

Koeficijenti A , B i C ovise o vrsti i sastavu vlaka, a mogu poprimiti različite vrijednosti u različitim državama. U Hrvatskim željeznicama koriste se Strahlove formule, u kojima se specifični otpori posebno računaju za vučno vozilo, a posebno za vlak, [3]. Izrazi su dani u nastavku, f_{vv} za vučno vozilo i f_{vl} za vlak.

$$f_{vv} = \left(20 + \frac{v^2}{240} \right) \cdot 10^{-3} \left[\frac{N}{kg} \right] \quad (3)$$

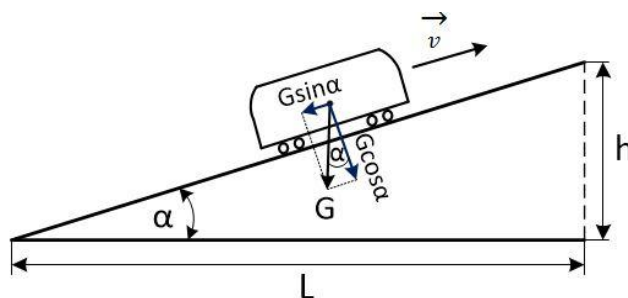
$$f_{vl} = \left(20 + k \cdot \frac{v^2}{10} \right) \cdot 10^{-3} \left[\frac{N}{kg} \right] \quad (4)$$

U prethodnim izrazima (3 i 4) brzina je izražena u km/h, a vrijednost koeficijenta k u (4) ovisi o vrsti vlaka. Ovisnost je prikazana u tablici I.

Tablica I. Ovisnost iznosa koeficijenta k o vrsti vlaka

VRSTA VLAKA	k
Brzi putnički vlak	0,032
Putnički vlak	0,04
Brzi teretni vlak	0,047
Srednje tovareni teretni vlak	0,057
Prazan teretni vagon	0,108

Povremeni otpori ovise o profilu pruge, a pojavljuju se na usponima i u zavojima. Ukoliko se vozilo nalazi na usponu pod kutom α (slika 2) na njega će djelovati sila $F_i = \pm G \cdot \sin \alpha$, paralelna tračnicama. Kako bi se vozilo moglo kretati uz uspon taj otpor mora biti savladan, u slučaju kretanja niz uspon ovaj otpor ima negativan predznak i zbraja se s vučnom silom vozila.



Slika 2. Otpor na usponu

Kod vrlo malih nagiba, kakvi se susreću na prugama vrijedi da je $\sin \alpha \approx \tan \alpha$. Uzimajući u obzir da je $\tan \alpha = h/L$, te da je uspon izražen u promilima jednak $i = \frac{h}{L} \cdot 1000$, izraz za otpor može se svesti na jedinicu mase vlaka, te na taj način dodatno pojednostavniti. Izraz za specifičan otpor na usponu tada glasi:

$$f_i = \frac{F_i}{m_{vl}} = \pm \frac{G \cdot i}{\frac{1000}{9,81} G} \approx \pm \frac{i}{100} \left[\frac{N}{kg} \right] \quad (5)$$

Otpori u zavoju posljedica su konstrukcije željezničkih vozila, odnosno čvrsto navučenih kotača na osovinu, a stvara ih trenje između kotača i tračnica, te centrifugalna sila koja djeluje u zavoju. Pri proračunu otpora u zavoju koristi se eksperimentalno dobivena formula:

$$f_z = \frac{8000}{R} \cdot 10^{-3} \left[\frac{N}{kg} \right], \quad (6)$$

gdje je R polumjer zakrivljenosti zavoja.

Otpor ubrzanja pojavljuje se pri svakoj promjeni brzine. Za povećanje brzine neophodno je djelovanje vučne sile. Ako vlak promatramo kao kruto tijelo, možemo ga nadomjestiti materijalnom točkom koja se giba translatorno. Kinetičku energiju pri kretanju vlaka čini energija translatornog gibanja:

$$E_{kt} = \frac{m \cdot v^2}{2}, \quad (7)$$

i energija dijelova koji rotiraju:

$$E_{kr} = \sum \frac{J_0 \cdot \omega^2}{2} + \sum \frac{J_i \cdot \omega_i^2}{2}, \quad (8)$$

gdje je: J_0 – polarni moment tromosti kolnog sloga, J_i – polarni moment tromosti i-tog rotirajućeg dijela na vozilu, ω_i – kutna brzina i-tog rotirajućeg dijela na vozilu.

Ukupna kinetička energija zbroj je energije translatornog gibanja i energije rotirajućih dijelova, uz $\omega_i = \frac{v \cdot p_i}{r}$ izraz možemo zapisati kao:

$$E_k = \left(m + \sum \frac{J_0}{r^2} + \sum \frac{J_i}{r^2} \cdot p_i^2 \right) \cdot \frac{v^2}{2}, \quad (9)$$

$$E_k = m \cdot (1 + \varepsilon) \cdot \frac{v^2}{2},$$

gdje je: ε – koeficijent rotirajućih masa, s karakterističnim vrijednostima od 0,06 do 0,08.

S obzirom da je diferencijal energije materijalne točke jednak elementarnom radu sile koja djeluje na točku, možemo pisati:

$$dE_k = m(1 + \varepsilon) \cdot v \cdot dv = dA = (F_t - F_w) ds, \quad (10)$$

također, vrijedi da je $F_a = F_t - F_w$, pa konačan izraz za otpor ubrzanja glasi:

$$F_a = m \cdot (1 + \varepsilon) \cdot a \quad (11)$$

Već smo spomenuli da je za kretanje vlaka potrebna određena vučna sila za savladavanje otpora vožnje. Međutim, nije dovoljno imati snažno vučno vozilo koje će ostvariti potrebnu vučnu silu, potrebno je tu silu prenijeti na tračnice, a sila koja se može prenijeti preko pogonskih kotača je ograničena. Kako bi spriječili proklizavanje pogonskih kotača po tračnicama sila adhezije mora biti veća ili jednaka vučnoj sili:

$$F_t \leq F_{at}, \quad (12)$$

Silu adhezije računamo prema sljedećem izrazu:

$$F_{at} = \psi \cdot G_{at}, \quad (13)$$

gdje je: ψ – koeficijent adhezije, a G_{at} – adhezijska težina.

Adhezijska težina je dio težine vučnog vozila koji otpada na njegove pogonske kotače. Proizvoljno povećanje adhezijske težine nije moguće zbog maksimalnog dozvoljenog osovinskog opterećenja.

Koeficijent adhezije (ψ) je vrlo složena funkcija koja se dobiva mjerenjem na svakom vučnom vozilu, a računa se prema izrazu:

$$\psi = \frac{\psi_0}{1 + 0,1 \cdot v}, \quad (14)$$

gdje je: ψ_0 – statički koeficijent adhezije, a brzina je izražena u km/h. Vrijednosti statičkog koeficijenta adhezije dane su u tablici 2.

Tablica II. Vrijednosti statičkog koeficijenta adhezije

ψ	STANJE TRAČNICA
0,16 – 0,21	Masne tračnice
0,23	Mokre tračnice
0,33	Suhe tračnice

2.2. Proračun djelatne i jalove snage

Poznavajući potrebnu vučnu silu za ostvarenje kretanja moguće je izračunati mehaničku snagu na obodu kotača preko sljedećeg izraza:

$$P_m = F_t \cdot v \quad (15)$$

Za izračun djelatne snage koju vlak uzima iz mreže potrebno je znati vrijednost korisnosti vučnog vozila (η) koji ovisi o brzini kretanja vlaka i naponu mreže. Djelatnu snagu koju vlak uzima iz mreže računamo pomoću izraza:

$$P_{sl} = \frac{P_m}{\eta} + P_{pom}, \quad (16)$$

gdje je P_{pom} snaga pomoćnih pogona (grijanje vagona, hlađenje motora i sl.).

U slučaju izmjeničnog napajanja vlak osim djelatne snage uzima iz mreže i jalovu snagu, koja se računa prema izrazu:

$$Q_{sl} = P_{sl} \cdot \tan(\arccos(\cos\varphi)) \quad (17)$$

Faktor snage ($\cos\varphi$) ovisan je o brzini kretanja vozila (slika 4), a izgled te krivulje različit je od lokomotive do lokomotive.

2.3. Matematički model za proračun kretanja vlaka

Jednadžba kretanja vlaka je matematički izraz koji predstavlja ovisnost ubrzanja vlaka o silama koje djeluju na vlak, pri tome vlak gledamo kao kruto tijelo čija je masa koncentrirana u njegovom težištu. U tom slučaju vrijedi:

$$dE_k = dA, \quad (18)$$

$$dE_k = m_{vl} \cdot (1 + \varepsilon) \cdot v \cdot dv, \quad (19)$$

$$dA = (F_t - \sum F_w) \cdot ds, \quad (20)$$

gdje je: m_{vl} – masa vlaka, F_t – vučna sila vlaka, ε – koeficijent korekcije mase zbog rotacije, $\sum F_w$ – suma otpora vožnje. Ako uvrstimo izraze (19) i (20) u početnu jednadžbu (18), dobivamo:

$$m_{vl} \cdot (1 + \varepsilon) \cdot \frac{ds}{dt} \cdot \frac{dv}{dt} = (F_t - \sum F_w) \cdot ds. \quad (21)$$

Iz ovog izraza slijede jednadžbe kretanja vlaka:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{F_t - \sum F_w}{m_{vl} \cdot (1 + \varepsilon)} \left[\frac{m}{s^2} \right], \quad (22)$$

$$v = \int a \cdot dt = \int \frac{F_t - \sum F_w}{m_{vl} \cdot (1 + \varepsilon)} \cdot dt \left[\frac{m}{s} \right], \quad (23)$$

$$s = \int v \cdot dt = \int \frac{F_t - \sum F_w}{m_{vl} \cdot (1 + \varepsilon)} \cdot dt \cdot \int dt [m], \quad (24)$$

Analitičko rješavanje dobivenih jednadžbi kretanja svodi se na poznavanje funkcija $F_t(t)$ i $F_w(t)$. Kako ove ovisnosti nisu unaprijed poznate, do rješenja dolazimo računanjem s konačnim prirastom Δt u kojem je moguće pretpostaviti iznose konstantnih sila koje djeluju na vlak. Dakle, vrši se približno integriranje, odnosno zbrajanje konačnih prirasta brzine i udaljenosti, pa izraze (23) i (24) možemo zapisati kao:

$$\Delta v = a \cdot \Delta t = \frac{F_t - \sum F_w}{m_{vl} \cdot (1 + \varepsilon)} \cdot \Delta t, \quad (25)$$

$$\Delta s = v_0 \cdot \Delta t + \frac{a \cdot (\Delta t)^2}{2}, \quad (26)$$

gdje je v_0 – brzina na početku intervala.

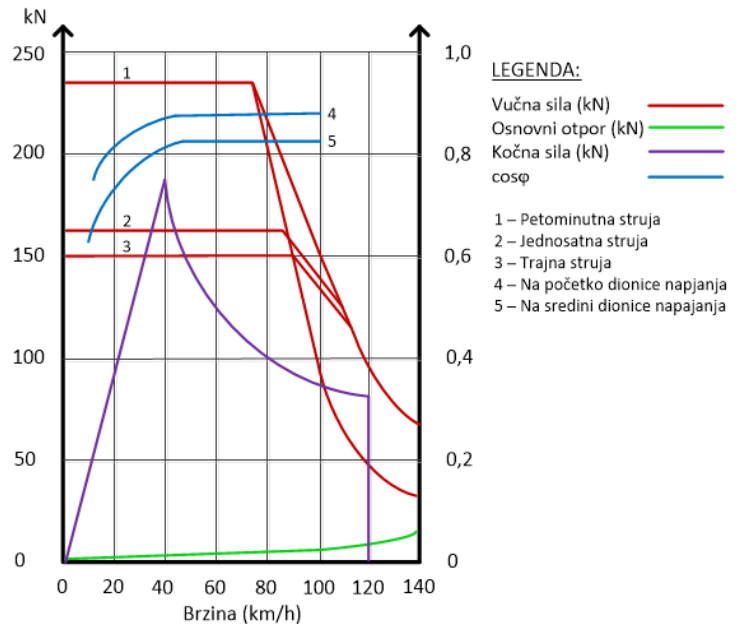
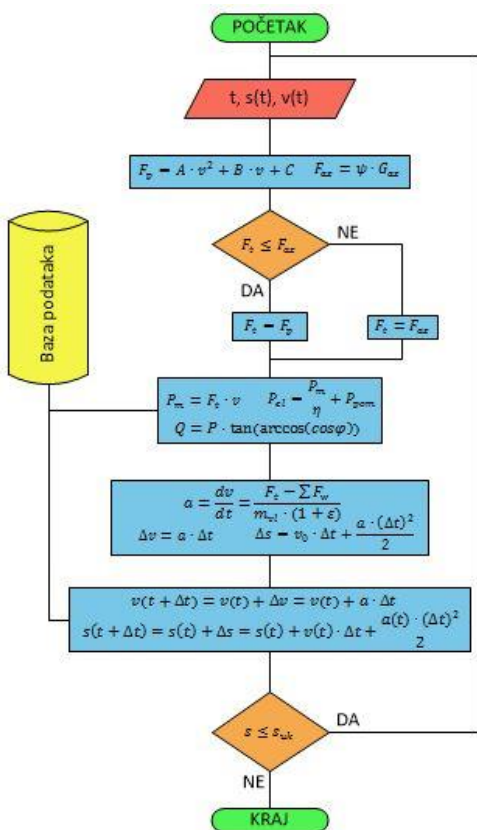
Potrebno je odabrati dovoljno mali interval Δt u kojem će prirast brzine biti toliko malen da se sile koje djeluju na vlak i akceleracija mogu smatrati približno konstantnima. Zbog velike inercije, promjene brzine, a samim time i F_t i $\sum F_w$ su dovoljno spore da je interval proračuna od par sekundi sasvim prihvatljiv. Što je interval Δt manji, to je manja i greška do koje dolazi jer se umjesto integriranja provodi zbrajanje s konačnim vrijednostima. Neka su v i s vrijednosti brzine i prijeđenog puta koje vlak ima u trenutku t , vrijednosti nakon intervala Δt su:

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a \cdot \Delta t \quad (27)$$

$$s(t + \Delta t) = s(t) + v(t) \cdot \Delta t + \frac{a(t) \cdot (\Delta t)^2}{2} \quad (28)$$

2.4. Način izvođenja proračuna

Ukoliko u trenutku t imamo poznatu brzinu vlaka i njegov položaj na pruži mogu se izračunati otpori vožnje i sila adhezije, te odrediti moguću vučnu silu lokomotive koja ovisi o režimu vožnje vlaka. Na temelju poznate vučne sile i brzine računa se mehanička snaga, te djelatna i jalova električna snaga za trenutak t . Nakon toga računa se akceleracija, ako vlak ubrzava, a zatim prirasti brzine i puta. Postupak se ponavlja za naredni vremenski interval Δt – korak proračuna. Na slici 3. prikazan je dijagram toka za simulator kretanja vlaka.



Slika 3. Dijagram toka za simulator kretanja vlaka

Slika 4. Ovisnost vučne sile, kočne sile i faktora snage o brzini

3. KARAKTERISTIKE TESTNOG TERETNOG VLAKA

Testni teretni vlak sastoji se od dvije lokomotive HŽ-a serije 1141 i trinaest vagona, masa tereta kojeg vlak prevozi iznosi 520 t, dok je ukupna masa vlaka 788 t. Lokomotive serije 1141 isporučivane su HŽ-u u razdoblju od 1970. do 1981. godine i ne posjeduju mogućnost povrata snage u mrežu. Lokomotive imaju ugrađene istosmjernje motore, a pretvaranje izmjeničnog napona u istosmjerni vrši se pomoću dioda. Osnovni tehnički podaci za lokomotivu serije 1141 prikazani su u tablici 3. Neizostavni podaci lokomotive potrebni za elektrovučni proračun su vučna i kočna sila, te faktor snage ($\cos \varphi$). Na slici 4. prikazane su njihove ovisnosti o trenutnoj brzini. Faktor snage lokomotive kreće se u rasponu od 0,65 do 0,85, osim o trenutnoj brzini ovisi i o udaljenosti od mjesta napajanja odnosno iznosu napona. Vučna sila, osim o brzini, ovisna je i o struji uzbude, odnosno o naponu.

Tablica III. Tehnički podaci za lokomotivu serije 1141

BROJ OSOVINA:	4
Trajna snaga za vuču:	3860 kW
Jednosatna snaga:	4080 kW
Maksimalna brzina:	140 km/h
Masa:	82 t
Snaga elektrodinamičke kočnice:	1740 kW ($\eta=0,8$)

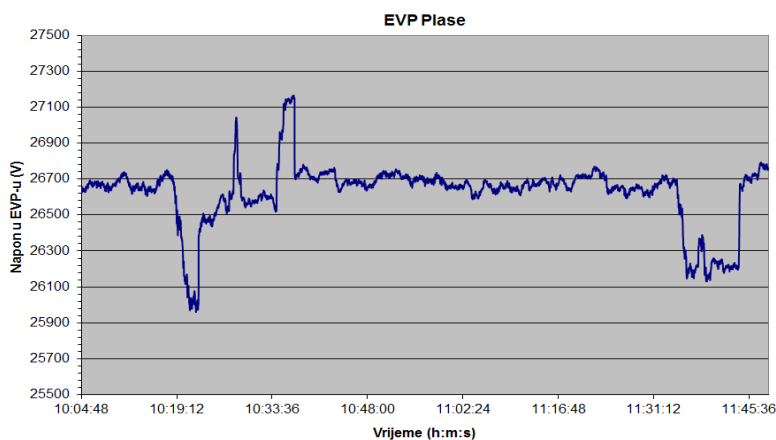
4. ANALIZA MJERNIH REZULTATA

U EVP Plase instalirana su dva transformatora nazivne snage 10 MVA, prijenosnog omjera 110/27,5 kV \pm 10x1,5%, s regulacijom pod teretom na niskonaponskoj strani, [4]. U EVP-u su ugrađene kondenzatorske baterije kojima je u seriju dodana prigušnica, te postoji mogućnost regulacije jalove snage u šest stupnjeva, u beznaponskom stanju. Vrijednosti i tolerancije napona za elektrovučni sustav 25 kV, 50 Hz definirane su prema normi EN50163 i navedene u tablici IV.

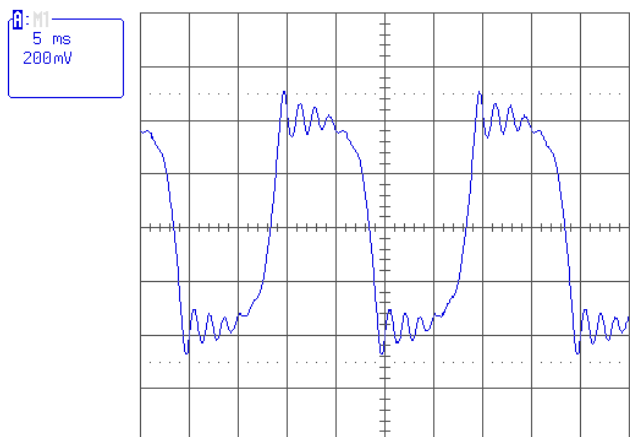
Tablica IV. Normirane vrijednosti napona za elektrovučni sustav 25 kV, 50 Hz

$U_{min1} = 17,5$ kV	Trenutno dozvoljeni minimalni napon KM
$U_{min2} = 19$ kV	Trajno dozvoljeni minimalni napon KM
$U_n = 25$ kV	Nazivni napon KM
$U_{max1} = 27,5$ kV	Trajno dozvoljeni maksimalni napon KM
$U_{max2} = 29$ kV	Maksimalni napon KM ($t \leq 5$ min)
$U_{max3} = 38,75$ kV	Maksimalni napon KM ($t \leq 20$ ms)

Tijekom vožnje vlaka duž područja napajanja EVP Plase dolazi do oscilacija napona koji se kreće u vrijednostima od 25,96 kV do 27,16 kV (slika 5). S obzirom da su navedene vrijednosti, prema normi EN50163, u trajno dozvoljenim granicama može se zaključiti da su tijekom cijelog vremena mjerenja bili prisutni stabilni naponski uvjeti. Valni oblici struje prikazani na slici 6. su tipični za diodnu lokomotivu serije 1141. Struja lokomotive sadrži znatan udio viših harmonika: 3.h – 24,2%, 5.h – 12,2%, 7.h. – 6.8%, 9.h. – 4.8%, 11.h – 5,7%, 13.h – 7,0%, 15.h. 1,7%.. (iskazan je postotak višeg harmonika u odnosu na osnovni harmonik 50 Hz). Takva struja na impedancijama kontaktne mreže, elektrovučnog transformatora i 110 kV mreže stvara nesinusoidalne padove napona, što izobličuje napon napajanja i utječe na kvalitetu napona odnosno električne energije. Dakle, osim nesimetričnog opterećenja (spoj na dvije faze 110 kV mreže) struja električne vuče utječe i na kvalitetu napona u 110 kV mreži.

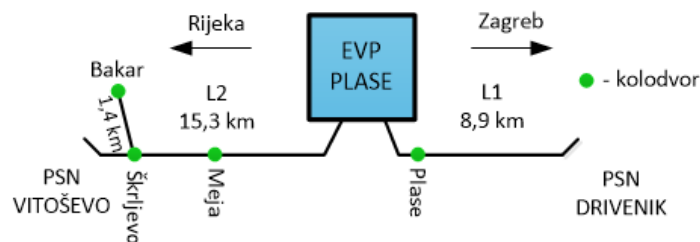


Slika 5. Napon u EVP Plase



Slika 6. Struja diodne lokomotive serije 1141 (100 mV=80 A)

EVP Plase napaja dva kraka. Krak prema Zagrebu (L1) do PSN Drivenik dugačak je 8,9 km. Krak prema Rijeci (L2), do PSN Vitoševo dugačak je 15,3 km. Spomenuti EVP napaja i 1,4 km pruge Škrljevo – Bakar. Krakovi napajanja EVP Plase zajedno s kolodvorima na području napajanja prikazani su na slici 7.



Slika 7. Krakovi napajanja EVP Plase

Testni teretni vlak putuje na dionici Škrljevo – Moravice. U području napajanja EVP Plase vlak se nalazi od samog početka kretanja, 10:19 h do 11:44 h, te će se u tom vremenskom intervalu promatrati rezultati mjerenja. U tablici V je dat vremenski pregled kretanja testnog vlaka.

Tablica V. Pregled kretanja testnog teretnog vlaka

KOLODVOR	DOLAZAK (HH:MM)	ODLAZAK (HH:MM)
Škrljevo	-	10:19
Meja	10:28	10:28
Plase	10:38	11:35
Drivenik	11:45	11:45
Fužine	11:55	12:11
Lokve	12:23	12:23
Delnice	12:31	12:31
Zalesina	12:39	12:39
Skrad	12:47	12:52
Brod-Moravice	13:03	13:03
Moravice	13:11	-

4.1. Kretanje teretnog vlaka na kraku prema Rijeci

Vlak se na kraku prema Rijeci (L2) nalazi od 10:19h do 10:34h, kada prelazi na krak napajanja prema Zagrebu (L1). Rezultati mjerenja struje, te djelatne i jalove snage u ovisnosti u vremenu prikazani su na slici 8.

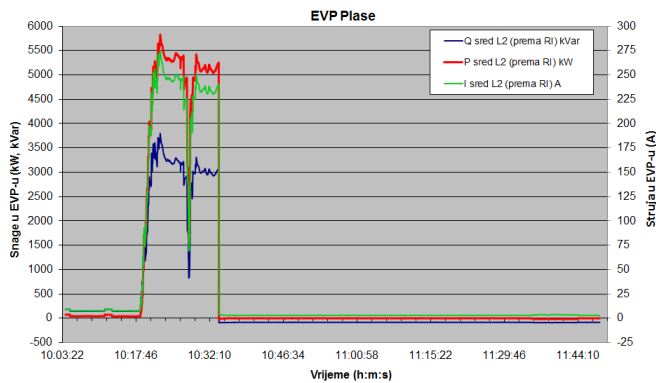
Na slici 8. možemo zamijetiti struju vuče, te djelatnu i jalovu snagu u razdoblju od početka mjerenja (10:03h) do polaska vlaka (10:19h). Potrošnja djelatne snage u tom vremenu iznosi prosječno 45 kW, potrošnja jalove snage nešto je veća i prosječno iznosi 147 kVAr, vrijednost struje iznosi 7,7 A. U to vrijeme vlak je stacioniran na kolodvoru u Škrljevu, a spomenuta potrošnja razlog je uključenih pomoćnih pogona (grijanje/hlađenje, kompresori, pumpe, ventilatori i sl.). Do oscilacija struje, te djelatne i jalove snage dolazi zbog periodičkog uključivanja/isključivanja pojedinih pomoćnih pogonskih sustava.

Navedeni testni teretni vlak s dvije lokomotive, prilikom ubrzavanja do propisane dozvoljene brzine, na uzbrdici od 25 ‰, iz mreže uzima maksimalnu struju od 274,9 A, maksimalnu djelatnu snagu u iznosu 5,82 MW i maksimalnu jalovu snagu u iznosu 3,8 MVar.

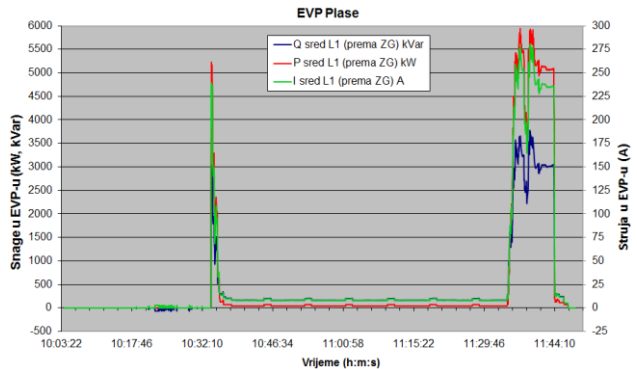
4.2. Kretanje teretnog vlaka na kraku prema Zagrebu

Vlak na krak prema Zagrebu (L1) dolazi u 10:34h, nakon minute vožnje počinje usporavati, te se u 10:38h zaustavlja na kolodvoru Plase (slika 9). Vlak stoji zaustavljen na kolodvoru sve do 11:34h. U tom vremenskom intervalu može se primijetiti da vlak iz mreže uzima prosječnu struju u iznosu 8,1 A, prosječnu djelatnu snagu od 45 kW i prosječnu jalovu snagu od 164 kVAr.

U 11:34h vlak nastavlja svoj put prema Moravicama i počinje s mjesta ubrzavati do propisane dozvoljene brzine na tom području. Prilikom toga vlak iz mreže uzima maksimalnu struju 280,6 A, maksimalnu djelatnu snagu u iznosu od 5,93 MW i maksimalnu jalovu snagu u iznosu od 3,77 MVar.



Slika 8. Rezultati mjerenja djelatne i jalove snage, te struje u EVP Plase, na kraku napajanja prema Rijeci



Slika 9. Rezultati mjerenja djelatne i jalove snage, te struje u EVP Plase, na kraku napajanja prema Zagrebu

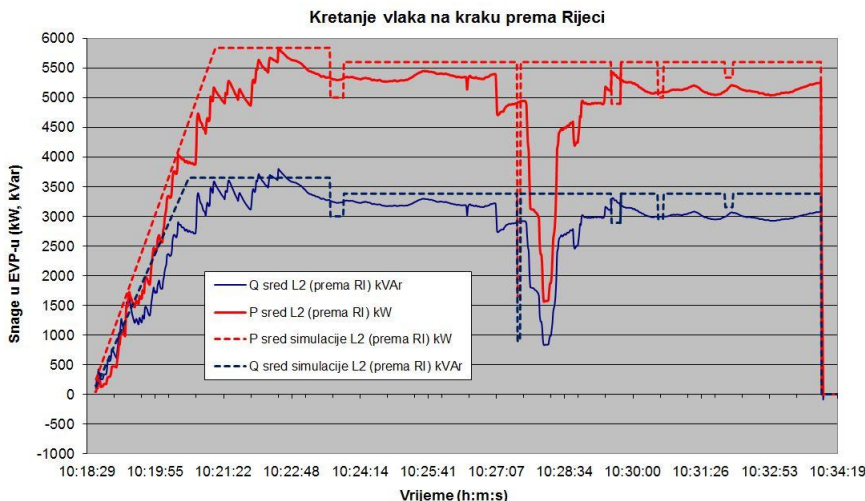
5. USPOREDBA SIMULACIJSKIH I MJERNIH REZULTATA

U programu je simulirano kretanje testnog teretnog vlaka, izuzevši vremena stajanja na kolodvorima.

5.1. Kretanje teretnog vlaka prema Rijeci

Maksimalna vrijednost djelatne snage (P) koju vlak prilikom kretanja na ovom kraku uzima iz mreže iznosi 5,838 MW, slika 10. Ako se ova vrijednost usporedi s maksimalnom izmjerenom vrijednošću djelatne snage uočavamo odstupanje simulacijskog rezultata za svega 0,3%. Maksimalna odstupanja vrijednosti djelatnih snaga između simulacijskih rezultata i stvarnih mjerenja na promatranom kraku iznose 17,2%, što je prihvatljivo, [5].

Maksimalna vrijednost potrošnje jalove snage (Q) prilikom kretanja vlaka na kraku prema Rijeci iznosi 3,65 MVar, što je odstupanje od 3,2% u odnosu na mjerne rezultate. Maksimalna odstupanja mjernih i simulacijskih vrijednosti jalove snage na promatranom kraku iznose 13,8%.



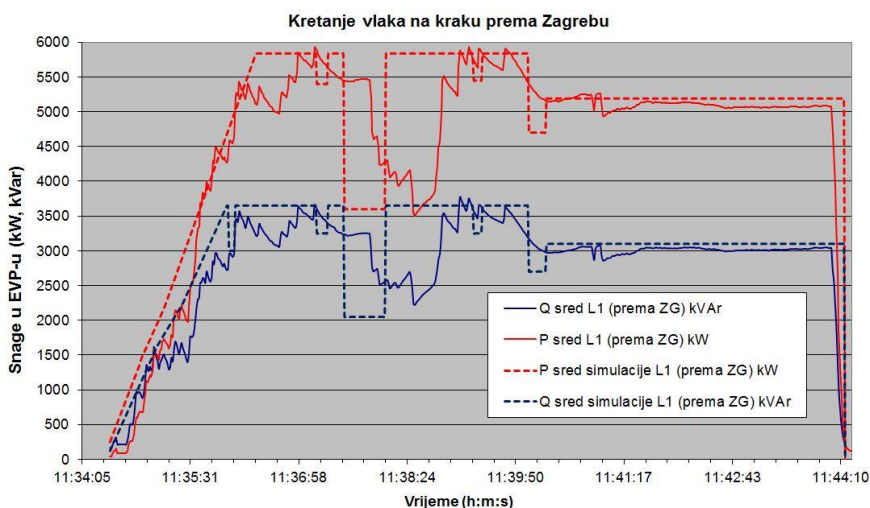
Slika 10. Usporedba mjernih i simulacijskih rezultata kretanja testnog teretnog vlaka na kraku prema Rijeci

Na slici 10. vidljiv je određeni vremenski pomak između simulacijskih i mjernih rezultata. Do njega dolazi zbog različitih brzina kretanja vlaka u simulaciji i u stvarnom vremenu. Vlak u simulatoru ubrzava do planirane brzine na određenoj dionici maksimalnom raspoloživom snagom u tom trenutku, dok u stvarnosti to nije uvijek slučaj. Odstupanja između simulacijskih i mjernih rezultata također mogu biti razlog nepridržavanja planiranih brzina i režima vožnje na pojedinim dionicama (ljudski faktor).

5.2. Kretanje teretnog vlaka prema Zagrebu

Vlak prilikom kretanja na kraku prema Zagrebu iz mreže uzima maksimalnu vrijednost djelatne snage u iznosu od 5,84 MW, slika 11. Maksimalna izmjerena vrijednost djelatne snage na promatranom kraku iznosi 5,93 MW, što znači da odstupanje između maksimalne simulacijske i mjerne vrijednosti iznosi 1,52%. Maksimalna odstupanja vrijednosti djelatnih snaga između simulacijskih i mjernih rezultata na pojedinim dijelovima iznose 17,8%.

Maksimalna vrijednost jalove snage koju vlak uzima iz mreže prilikom svog kretanja na kraku prema Zagrebu iznosi 3,73 MVar, te predstavlja odstupanje od 3,2% u odnosu na dobivene mjerne rezultate. Maksimalna odstupanja mjernih i simulacijskih rezultata potrošnje jalove snage na pojedinim dijelovima ovog kraka iznose 11,48%.



Slika 11. Usporedba mjernih i simulacijskih rezultata kretanja testnog teretnog vlaka na kraku prema Zagrebu

Na slici 11. također je vidljiv vremenski pomak između simulacijskih i mjernih rezultata uzrokovan prvenstveno različitim brzinama kretanja vlaka u simulaciji i u stvarnosti.

6. ZAKLJUČAK

Programska podrška, djelomično prikazana u ovom radu, je prvenstveno namijenjena za projektiranje infrastrukture električne vuče. Maksimalne simulacijske vrijednosti odstupaju od maksimalnih mjernih rezultata svega 3,2% u najgorem slučaju. Maksimalna zabilježena odstupanja između simulacijskih i mjernih rezultata ne prelaze 17,8%. Usporedbom simulacijskih i mjernih rezultata je pokazano kako je razvijena programska podrška sasvim dobra za predviđenu namjenu.

Električna vuča, osim što predstavlja nesimetrično opterećenje (spoj na dvije faze 110 kV mreže) utječe i na kvalitetu napona u 110 kV mreži zbog nesinusoidalne struje koju diodne lokomotive uzimaju iz mreže.

7. LITERATURA

- [1] I.Uglešić, I.Pavić, A.Marušić, V.Milardić, M.Mandić, B.Filipović – Grčić, „Analiza nesimetričnog opterećenja prijenosne mreže 110 kV i uvjeta paralelnog rada elektrovučnih podstanica 110/25 kV na pruzi Moravice – Rijeka – Sapjane“, studija, FER Zagreb, studeni 2007.
- [2] Bwo-Ren Ke, Chun-Liang Lin, Hsein-Hung Chien, „Improvement of Freight Train Timetable for Single-Track Railway System“, Consumer and Control, International Conference, Taiwan (Taichung) 4. – 6. June 2012.
- [3] I.Uglešić, I.Pavić, V.Milardić, M.Mandić, „Elektroenergetski proračun napajanja za prvu fazu nastavka izmjene sustava električne vuče na pruzi Zagreb – Rijeka i na priključnim prugama“, studija FER Zagreb, lipanj 2004.
- [4] I.Sitar, „Izvedbe i karakteristike transformatora za elektrovučne podstanice“, 8. Savjetovanje HRO CIGRE, Cavtat, 4. – 8. studenoga 2007.
- [5] B.Davydov, V.Gopkalo, „Real time energy consumption monitoring as a tool for the freight trains dispatching“, Railway Condition Monitoring, 4th IET International Conference, United Kingdom (Derby), 18. – 20. June 2008.