

# Regenerativno kočenje na elektromotornim vozovima serije 413/417 “Srbija voz” a.d.

Branislav Gavrilović, Zoran Bundalo, Aleksandar Blagojević

Elektrotehnika u saobraćaju  
Visoka železnička škola strukovnih studija  
Beograd, Srbija

gavrilovicbranislav5@gmail.com / cheminot@gmail.com/ aleksandar.blagojevic23@gmail.com

**Sažetak**—Prihvaćeni koncept interoperabilnosti željezničkog saobraćaja u Evropskoj uniji postavlja zahtev primene regenerativnog kočenja i na elektrificiranim prugama “Infrastrukture železnice Srbije” a.d. U radu je prikazan princip rada regenerativne kočnice kod elektromotornih vozova serije 413/417 „Srbija voz“ a.d, kao i problemi koji se mogu pojaviti prilikom regenerativnog kočenja. Na kraju rada su dati rezultati merenja kvaliteta električne energije na 110 kV naponskom nivou pri električnoj vuči i regenerativnom kočenju ovih vozova.

*Ključne riječi*—regenerativno kočenje, elektromotorni voz, kvalitet električne energije.

## I. UVOD

Ulaskom Republike Srbije u Evropsku uniju “Infrastruktura železnice Srbije” a.d. mora osigurati uslove za korišćenje regenerativnog kočenja na elektrovoćnim vozilima. Naime, u nacrtu tehničkih specifikacija za interoperabilnost za trans-europske konvencionalne željezničke pruge, podsistem energija 2015. godine, navedeno je da naizmjenični sistemi za napajanje električne vuće moraju biti izvedeni tako da dozvoljavaju korišćenje regenerativnog kočenja [1].

Regenerativno kočenje elektrovoćnih vozila može u određenim situacijama dovesti do injektiranja električne energije (snage) u prenosnu 110 kV mrežu koja se nalazi u nadležnosti JP “Elektroprivrede Srbije”.

Uz tehničke uslove najveću prepreku predstavlja pravno stanje. Naime željeznica je trenutno u Republici Srbiji isključivo definisana kao potrošač. Trebalo bi napraviti pravni okvir po kojemu bi željeznica mogla postati i proizvođač. Zato je potreban znatan napor da bi se stvari uskladile sa pravne strane, što je i obveza “Infrastrukture železnice Srbije” a.d. ulaskom Republike Srbije u Evropsku uniju.

## II. PRINCIP RADA REGENERATIVNOG KOČENJA

Ranije generacije elektromotornih vozova u „Infrastrukturi železnice Srbije“ a.d. oslanjale su se na diodne ispravljačke spojeve kako bi se iz naizmjeničnog napajanja dobilo jednosmerno, kojim su napajani vućni motori. Kako takvi diodni ispravljači omogućavaju tok snage samo u jednom smeru, motori nisu mogli vraćati snagu u kontaktnu mrežu. Prvi tiristorski upravljivi pretvarači koji su omogućili

konceptualnu sposobnost pretvaranja jednosmerne struje nazad u naizmjeničnu, omogućavajući tako regenerativno kočenje, predstavljeni su 1980. godine. Pripadajući faktor snage takvih spojeva bio je loš u širokom operativnom području, što je ograničavalo njihovu efektivnost i mogućnost za prihvatanje tako dobijene energije od strane JP “Elektroprivrede Srbije“. Takođe je postojao problem stabilnosti pogonskih motora, te su se u praksi koristili polu-upravljivi (pola uređaja su diode, pola tiristori), što znači da su mogli zapravo raditi samo u motorskom režimu.

Potpuna upotreba regenerativnog kočenja za naizmjeničnu vuću omogućena je pojavom četverokvadrantnih mrežnih pretvarača za vućnu upotrebu. To je puno-upravljivi ispravljač (sva četiri uređaja u mosnom spoju su upravljivi poluprovodnički ventili) i koristi se za pretvaranje naizmjenične snage u jednosmernu tokom motornog režima rada, te za pretvaranje jednosmerne u naizmjeničnu tokom generatorskog režima. Njima se može kontrolisati faktor snage u oba režima rada.

Elektrodinamičko kočenje (ED kočnica) je kočenje kada elektromotorni voz pređe iz vožnje u kočenje i vućni elektromotori pređu iz motorskog u generatorski način rada, a proizvedena energija u postupku kočenja koristi se na dva načina:

a) otporničko kočenje - gde se energije odaje iz elektrovoćnog vozila u sistem otpornika, te se gubi kao toplota;

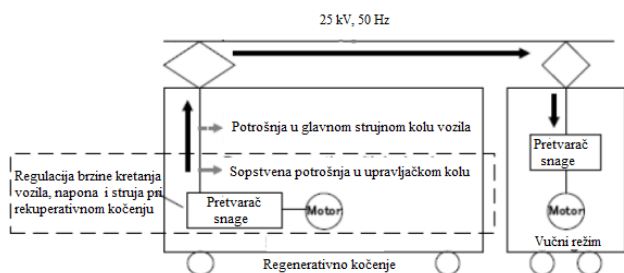
b) regenerativno kočenje - gde se energije vraća nazad u napojni sistem i koristi bilo gde.

U vožnji voz uzima energiju iz jednofaznog napona 25 kV, frekvencije 50 Hz, ispravlja je i pretvara u trofazni napon 50 Hz za pogon vućnih motora. Pri tome energija teče iz prenosne 110 kV mreže “Elektroprivrede Srbije” a.d., preko elektrovoćnih podstanica 110/25 kV “Infrastrukture železnice Srbije” a.d. u kontaktnu mrežu, a iz nje do motora vućnog vozila.

Pri kočenju vućnog vozila motori se i dalje vrte u istom smeru, ali ih sada pokreće kinetička energija osovinjskih sklopova vozila u zaustavljanju dok oni prelaze u generatorski rad. Trošeći tu kinetičku energiju oni kočće vućno vozilo i voz i

proizvode električnu energiju, koja se vraća u suprotnom smeru.

Na slici 1 prikazana je električna šema pri regenerativnom kočenju vučnog vozila sa asinhronim pogonom u elektrovučnom sistemu 25 kV, 50 Hz [2].



Slika 1. Električna šema pri regenerativnom kočenju vučnog vozila sa asinhronim pogonom u elektrovučnom sistemu 25 kV, 50 Hz.

Električna energija vraćena regenerativnim kočenjem može se koristiti u sledeće svrhe:

a) za vlastite potrebe elektrovučnog vozila (za pomoćne funkcije ili klimatizaciju/grejanje), koje su međutim daleko manje od energije koja se može dobiti regenerativnim kočenjem,

b) energijom vraćenom natrag u kontaktnu mrežu mogu se napajati drugi vozovi koji se nalaze u blizini (ako se nalaze na području napajanom od iste elektrovučne podstanice).

c) u nekim sistemima elektrovučnih podstanica energija se može vratiti i u nacionalnu elektroprivrednu mrežu, što je u principu moguće za naizmenične sisteme električne vuče. Drugo je pitanje koliko je to za željeznicu atraktivna opcija jer vraćenu energiju većina dobavljača nadoknađuje po znatno nižoj ceni od cene po kojoj je energiju predala željeznici.

### III. UPRAVLJANJE PRI REKUPERATIVNOM KOČENJU

Izgled i tehnički podaci elektromotornog voza serije 413/417 „Srbija voz“ a.d. prikazani su na slici 2 i u tabeli 1 [3].

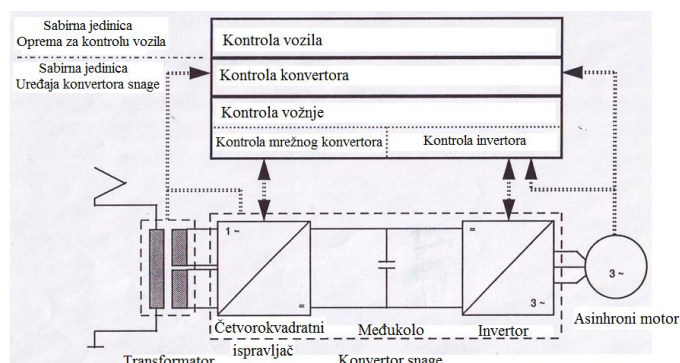


Slika 2. Elektromotorni voz serije 413/417 „Srbija voz“ a.d.

TABELA 1. TEHNIČKI PODACI ELEKTROMOTORNOG VOZA SERIJE 413/417 „SRBIJA VOZ“ A.D.

|   |  |
|---|--|
| Širina koloseka   | 1.435 mm   |
| Maksimalna brzina   | 160 km/h   |
| Klasifikacija UIC   | Bo'+2'+2'+2'+Bo'   |
| Minimalni radijusi krivine:<br>- normalna vožnja (kvačeni EMV)<br>- u zoni depoa (raskvačeni EMV tara)<br>- S krivina   | R 150 m<br>R 100 m<br>R 150 m sa 6 m pravca između krivina |
| Ukupan broj sedišta   | 234  |
| Broj mesta za stajanje na osnovu 4 putnika po m <sup>2</sup>  | 230  |
| Dužina na nivou kvačenja kolskog sanduka  | 77.100 mm  |
| Širina kola   | 2.820 mm   |
| Razmak osovina pogonskog obrtnog postolja   | 2.500 mm   |
| Prečnik pogonskog točka nov/istrošen  | 920/850 mm   |
| Razmak osovina slobodnog obrtnog postolja   | 2.700 mm   |
| Prečnik točka slobodnog obrtnog postolja nov/istrošen   | 760/690 mm   |
| Tara masa (uključujući opremu)  | 133 t  |
| Bruto masa (prosečno opterećenje u eksploataciji u skladu sa EN 15563):<br>sva sedišta bez preklopnih sedišta sa 70 kg;<br>mesta za stajanje zauzeta sa 4 putnika po m <sup>2</sup> | 165 t  |
| Bruto masa (opterećenje u skladu sa dokumentom 500.001 tačka 3.1 pod f)<br>sva mesta za sedenje i stajanje zauzeta sa 4 putnika po m <sup>2</sup> (svako po 80 kg)                  | 170 t  |
| Maksimalno osovinsko opterećenje, pogonsko obrtno postolje  | 18,8 t   |
| Maksimalno osovinsko opterećenje, slobodno obrtno postolje  | 18 t   |
| Specifična trajna snaga po težini, tara   | 15 kW/t  |
| Specifična težina po dužini, tara   | 1,7 t/m  |
| Maksimalna snaga na točku   | 2.600 kW   |
| Trajna snaga na točku   | 2.000 kW   |
| Maksimalna vučna sila pri startu do 47 km/h   | 200 kN   |
| Maksimalno ubrzanje do 47 km/h  | 1,1 m/s <sup>2</sup> (165 t)                               |
| Maksimalna snaga kočenja elektrodinamičkom kočnicom   | 200 kN   |

Principijelna šema upravljanja ovog elektromotornog voza prikazana je na slici 3 [3].



Slika 3. Principijelna šema upravljanja elektromotornog voza serije 413/417 „Srbija voz“ a.d.

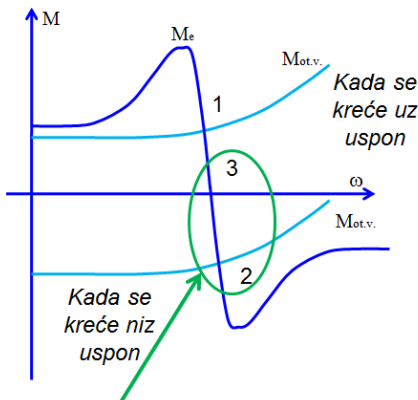
Upravljačko kolo voza obavlja četiri važna zadatka u regulisanom vučnom pogonom sa asinhronim motorima [2], [4]: upravlja poluprovodničkim komponentama konvertora, razmenjuje podatke između konvertora i perifernih uređaja, skuplja izveštaje i poruke o greškama i ostvaruje zaštitu

motora i samog konvertora. Kvalitet i brzina upravljanja su znatno poboljšane uvođenjem mikroprocesora u upravljačka kola, a značajno su se proširile i same mogućnosti konvertora pri pokretanju voza.

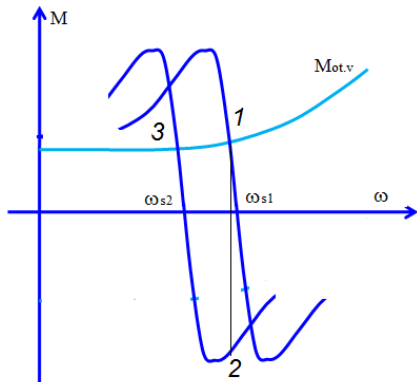
Indirektno vektorsko upravljanje asinhronih vučnih motora kod ovog voza zasnovano na merenju njegove brzine obrtanja ali i strujnom regulatoru statorskih struja koji sa visokim performansama omogućuje raspregnuto upravljanje sa magnetnim fluksom i elektromagnetnim momentom kako u stacionarnim stanjima tako i u toku prelaznih režimima rada motora.

Kod ovog voza do rekuperativnog kočenja dolazi se uglavnom na dva načina i to zbog:

- a) povećanja brzine obrtanja osovine rotora motora iznad sinhrona na padovima železničkih pruga  $\omega > \omega_s$  (slika 4),
- b) smanjenja sinhrona brzine ispod trenutne brzine rotora zbog smanjenja učestanosti napajanja (slika 5).



Slika 4. Rekuperativno kočenje na dugim padovima koloseka



Slika 5. Rekuperativno kočenje pri regulaciji brzine promenom frekvencije napajanja

Na slici 4 prikazane su statička karakteristike asinhrona mašine i otpora vuče na usponu i padu železničke pruge kada se asinhrona mašina pri nepromenjenoj frekvenciji napajanja uvodi u generatorski režim rada i generatorsko kočenje. Uslov da asinhroni motor radi u generatorskom režimu je da brzina obrtanja rotora postane veća od brzine obrtanja statorskog

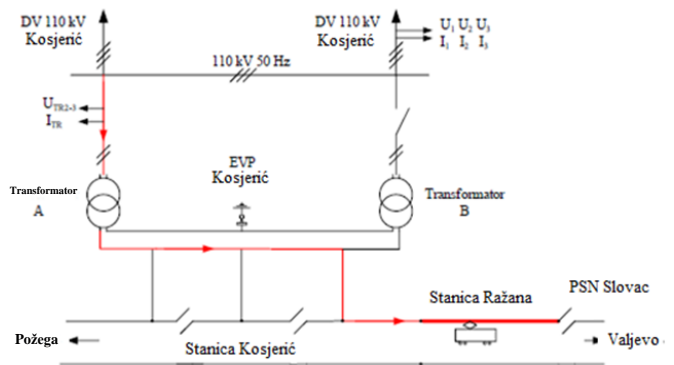
magnetskog polja tj.  $\omega > \omega_s$  i da se iz kontaktne mreže obezbedi pobuda ili struja magnećenja  $I_{\mu}$ .

Na slici 5 su prikazane i u I- kvadrantu dve karakteristike motora sa sinhronim brzinama  $\omega_{s1}$  i  $\omega_{s2}$ . Takođe prikazano je i geometrijsko mesto tačaka na statičkim karakteristikama kada se sinhrona brzina promeni sa  $\omega_{s1}$  na  $\omega_{s2}$ . Prvo se radna tačka iz stacionarnog stanja, tačka 1, premešta u tačku 2 na novoj karakteristici, zatim preko tačke praznog hoda, do novog stacionarnog stanja sa manjom brzinom (tačka 3). Rekuperativno kočenje se ima na delu karakteristike od tačke 2 do sinhrona brzine  $\omega_{s2}$ .

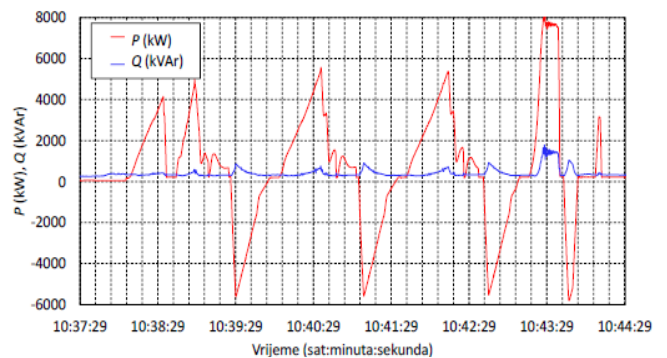
#### IV. ANALIZA IZMERNIH REZULTATA OPTEREĆENJA I KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE NA 110 kV NAPONSKOM NIVOU

Koliko kinetičke energije zaustavljanje vučno vozilo može regenerisati, tj. pretvoriti u električnu energiju zavisi od više uticajnih parametara kao što su: vrsta vučnog vozila, napon sistema vuče, relativnog broja pogonskih osovin, vrste vuče i topografije pruga.

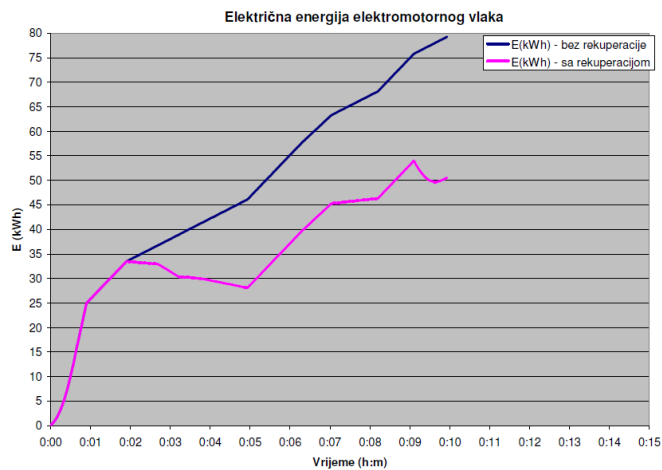
Merenja opterećenja i kvaliteta električne energije na 25 kV i 110 kV naponskom nivou pri vožnji i regenerativnom kočenju elektrovučnog vozila serije 413/417 „Srbija voz“ a.d. sprovedena su 20. maja 2013.g. u elektrovučnoj podstanciji (EVP) Kosjerić (slika 6) i prikazani su na slikama od 7 do 12 [3].



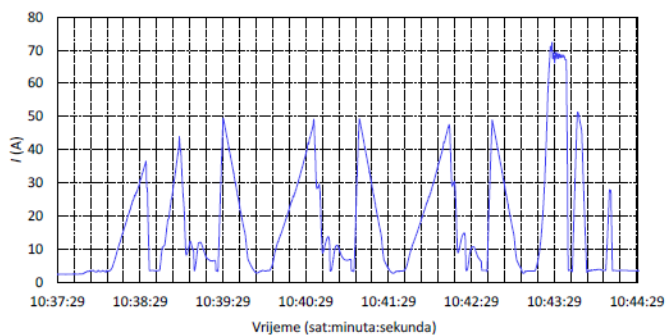
Slika 6. Uklopno stanje u EVP Kosjerić prilikom vožnje elektromotornog voza serije 413/417 „Srbija voz“ a.d.



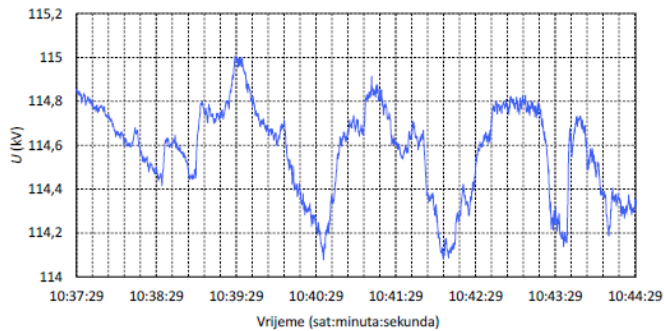
Slika 7. Aktivna i reaktivna snaga



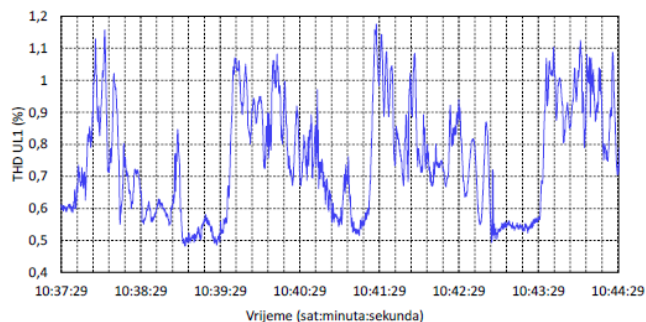
Slika 8. Utrošena električna energija analiziranog elektromotornog voza na relaciji Kosjerić – Ražana sa mogućnošću rekuperacije i bez nje



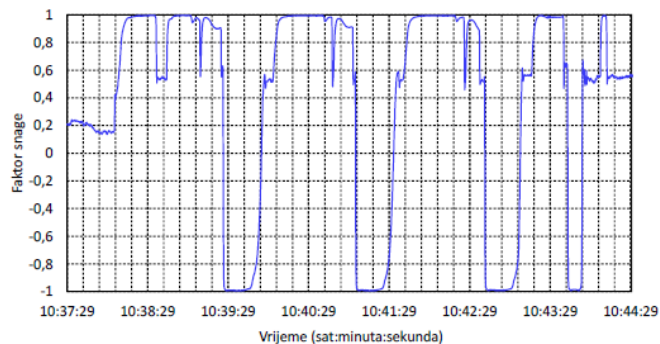
Slika 9. Efektivna vrednost struje na 110 kV strani transformatora - A



Slika 10. Efektivna vrednost linijskog napona na 110 kV strani transformatora - A



Slika 11. Ukupno harmonijsko izobličenje (THD) na 110 kV strani transformatora - A



Slika 12. Faktor snage na 110 kV strani transformatora - A

Maksimalna aktivna i reaktivna snaga koju je elektrovočno vozilo uzimalo iz mreže iznosila je 7,96 MW i 709 kVAr, a maksimalna aktivna snaga koja je vraćena prema mreži JP “Elektroprivrede Srbije“ iznosila je -5,8 MW. Napon kontaktne mreže menjao se u granicama od 25,4 kV do 26,1 kV, a struja elektrovočnog vozila od 5 A do 325 A. Kratkotrajna jakost flikera iznosila je 0,1225. Efektivna vrednost merenog napona kontaktnog voda ne prelazi granice propisane normom EN 50163:2007 - tačka 4.1. Faktori snage elektrovočnog vozila zadovoljavaju zahtevima evropske norme EN50388:2013 (tačka 6.2) [6], [7].

## V. ZAKLJUČAK

Troškovi za električnu energiju potrebnu za vuču vozova imaju značajan iznos u ukupnim eksploatacijskim troškovima vuče vozova. Jedan od načina za smanjenje troškova za električnu energiju je vraćanje električne energije u napojnu mrežu, koristeći motore pri kočenju voza kao generatore. To je poznato kao rekuperativno ili regenerativno kočenje (rekuperacija energije), te ima široku primjenu na željeznicama širom sveta.

Korištenje regenerativnog kočenja rezultira smanjenim radom mehaničke kočnice, čak i potpunom redukcijom, te se tako mogu ostvariti značajne ekonomske i ekološke dobrobiti kroz smanjenje proizvodnje i odlaganje kočionih materijala.

Rezultati sprovedene analize pokazuju da se ne očekuju problemi sa povratnim uticajem regenerativnog kočenja na prenosnu mrežu. Isto tako iz rezultata sprovedenih merenja utvrđeno je da elektromotorni voz serije 413/417 „Srbija voz“ a.d. sa regenerativnim kočenjem zadovoljava zahteve odgovarajućih normi.

Sa tehničkog aspekta je korištenje regenerativnog kočenja na prugama Infrastrukture železnice Srbije moguće, pa bi sa tim u vezi trebala otpočeti procedura dobijanja upotrebne dozvole za primenu regenerativnog kočenja, a uzimajući u obzir rezultate ove analize.

## ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju na poslovno-tehničkoj saradnji sa „Srbija vozom“ a.d. i njihovoj svestranoj pomoći.

## LITERATURA

- [1] Pravilnik o tehničkim uslovima koje mora ispunjavati podsistem energija, "Sl. glasnik RS", br. 106/2015
- [2] „Regenerative braking in 50 Hz, 25 kV systems“, Energy Efficiency Technologies for Railways, UIC, 2002.
- [3] Stadler Rail AG: “Tehnički opis, FLIRT ŽS, L-4275 ZS-Serbia compiled translation 20130520.doc”, Železnice Srbije, 20.05.2013.
- [4] I. Uglešić, I. Pavić, B. Filipović – Grčić, „Primjena regenerativnog kočenja na elektrificiranim prugama HŽ Infrastrukture izmjeničnog sustava vuče 25 kV 50 Hz“, studija, FER Zagreb, studeni 2014.
- [5] M. Sjöholm, „Benefits of regenerative braking and eco driving for high-speed trains“, Master of Science Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), 2011.
- [6] Tomislav Capuder, Tomislav Tomiša, Matija Zidar, “Work package 2 report: Detaljno izvešće o opremi za napredno mjerenje kvalitete EE”, FENISG – Flexible Energy Nodes in Low Carbon Smart Grid funded by Croatian Science Foundation, Project grant No. 7766. Zagreb, lipanj 2015.
- [7] "Power Quality in European Electricity Supply Networks – 2<sup>nd</sup> edition", Network of Experts for Standardization, Eurelectric, 2003.

## ABSTRACT

One of the ways to reduce energy costs is regeneration of electric power into the traction power supply, using engine braking of the train as generators. This is known as

recuperative or regenerative braking (energy recovery), and is widely used on the railways around the world.

Using regenerative braking of electric multiple unit series 413/417 of Joint stock company for passenger railway transport "Srbija voz" results in reduced operation of the mechanical brake, and even in complete reduction, and can thus realize significant economic and environmental benefits through the reduction of production and disposal of brake material.

This paper will primarily specify the principle of regenerative brakes operation, as well as cost-effectiveness of the return of electricity into the contact network. After that, the problems that might occur during the regenerative braking of trains will be stated and explained. Finally, the results of measurements of load and power quality at the 110 kV level presented.

## **REGENERATIVE BRAKING OF ELECTRIC MULTIPLE UNIT SERIE 413/417 OF JOINT STOCK COMPANY FOR PASSENGER RAILWAY TRANSPORT „SRBIJA VOZ“**

Branislav Gavrilovic, Zoran Bundalo, Aleksandar Blagojevic