

**NAČINI SMANJENJA POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE
TRAMVAJSKOG SAOBRAĆAJA**

**WAYS TO REDUCE ELECTRICITY CONSUMPTION OF TRAM
TRAFFIC**

Stručni članak

*Pred. VŠ Ali Damadžić**

Sažetak

Efikasnost i uštede na električnoj energiji, teme su kojima se bave inženjeri u svijetu danas. Javni prijevoz koji predstavlja primarni vid prijevoza u svim svjetskim metropolama teži ka modernizaciji i elektrifikaciji. Tramvajski saobraćaj je jedan od najstarijih tipova javnog prijevoza na električni pogon. Tematika efikasnosti i optimizacije potrošnje električne energije ne analizira se detaljno, i ne razmišlja se o uštedama koje bi se mogle postići sa unaprijeđivanjem tramvajskog saobraćaja. U ovom radu dane su neke postavke problema, zbog kojih faktora se povećava potrošnja električne energije, te načini smanjenja potrošnje električne energije, prilikom projektovanja i rekonstuisanja tramvajskih mreža.

Ključne riječi: energetska efikasnost, tramvajski saobraćaj, optimizacija potrošnje električne energije.

Abstract

Electrical efficiency and savings of energy are the topics of interest for electrical engineers in the world today. Public transport, which is the primary mode of transport in all the world's capitals, tends to modernize and electrify. Tram traffic is one of the oldest types of public electric types of transport. Unfortunately, the topics of efficiency and optimization of electricity consumption have not been analyzed in detail, and economy savings that could be achieved with improvement of tram traffic are not considered enough. In this paper some basic problem settings are given, factors that influence electricity consumption, ways to reduce that consumption, during the design phase and reconstruction phase of tram traffic.

Key words: energy efficiency, tram traffic, optimization of electricity consumption.

* *Visoka škola "CEPS - Centar za poslovne studije" Kiseljak. E-mail: ali.damadzic@ceps.edu.ba*

1. UVOD

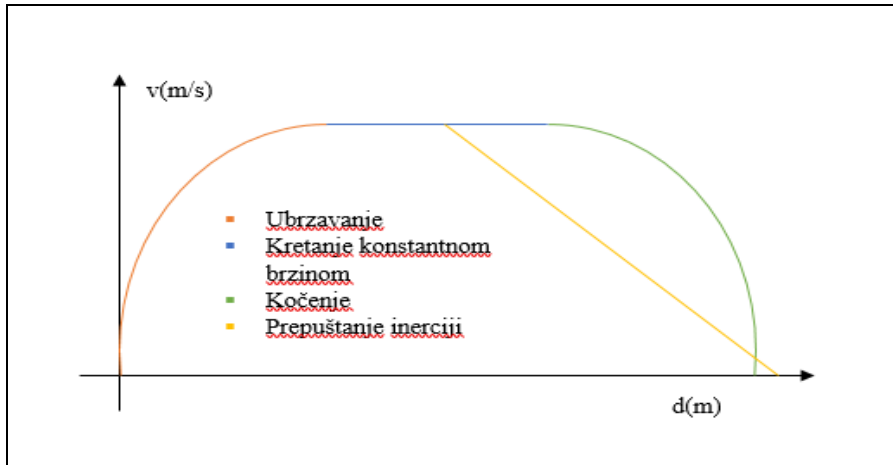
Potrošnja električne energije električnih vozila postaje od ključnog značaja za razvoj modernih električnih vozila. Potrebno je značajno unaprijediti sisteme električnih vozila kako bi se smanjila i optimizirala potrošnja električne energije. Da bi se došlo do zaključaka i potrebnih informacija potrebno je napraviti detaljne analize i simulacije. Tramvajski saobraćaj je jedan od najzastupljenijih vidova električnih vozila. Mnogi su načini poboljšanja efikasnosti tramvaja i tramvajske mreže, u smislu jednake usluge za manju potrošnju električne energije. Primarni načini da se smanji potrošnja električne energije je rekonstrukcija samih vozila, sa naglaskom na energetske efikasnije motore, rekonstrukcija mreže, raspored elektrovučnih podstanica po sekcijama i druge tehničke reparacije. Dovođenjem tramvajske mreže i vozila do kvalitetnog i zadovoljavajućeg nivoa može se ići ka optimizaciji potrošnje električne energije, ciljevi koji se nameću za optimizaciju električne energije su:

- ✚ Identificirati optimalnu trajektoriju tramvaja baziranu na tramvajskoj ruti.
- ✚ Implementirati optimalnu trajektoriju na terenu kako bi se evaluirali i analizirali rezultati te trajektorije.
- ✚ Izraditi detaljan simulator sa većim brojem (sa svim) tramvajima, izvorima napajanja (podstanicama) i detaljnom tramvajskom rutom.
- ✚ Koristiti simulator u smislu identifikacije optimalnog dizajna infrastrukture i operacionih metoda. (Zhao, 2012)

Različite optimizacijske metode su istraživane i implementirane za smanjenje potrošnje električne energije i povećanje energetske efikasnosti. U ovom članku osnovni ulazni parametri i postavke optimizacijskih problema su opisani.

2. FORMULACIJA PROBLEMA

Cilj optimalne trajektorije jednog tramvaja je da se minimalizira potrošena energija na ukupnom predjenom putu. Tramvaj može raditi u neka 4 osnovna stanja: maksimalno ubrzanje (pri kretanju), održavanje konstantne brzine (pri vožnji), slobodni rad (kada se samo prepusti inerciji) te kočenje (pri zaustavljanju) prikazanih na Slici 1. Poznavajući ukupnu distancu, optimalno vrijeme prelaska puta te maksimalnu brzinu tramvaja moguće je i odrediti optimalnu trajektoriju sa optimalnom potrošnjom električne energije.



Slika 1. Stanja kretanja tramvaja

Kako su brzina tramvaja i snaga (samim tim i potrošnja električne energije) direktno povezani optimalna trajektorija svakog tramvaja ovisit će od:

- ✚ Dužine puta između stanica
- ✚ Signalizacionih svjetala (semafora) na trasi
- ✚ Maksimalne brzine vozila
- ✚ Mogućnosti regenerativnog kočenja (te postojanja drugih vozila na istoj podstanici)
- ✚ Najdužem vremenu u kojem vozilo treba proći put (rasporedu vožnje)

Same jednačine koje se koriste za modeliranje tramvaja su vrlo jednostavne, gdje postoji sila motora tramvaja, sila otpora zraka, težina tijela, trenje točkova i šina. Nadalje, u radu (Ghaviha, 2016) opisana je formulacija sa dodatkom mogućnosti skladištenja električne energije u baterije.

2.1. Analiza nagiba terena

Jedan od parametara koji može značajno uticati na potrošnju električne energije je nagib terena. I najmanji nagib terena posmatrajući na cijelu trasu može značajno uticati na potrošnju električne energije. Sile koje opisuju kretanje tramvaja:

$$F_a = F_{m1} - F_{oz} - \cos\alpha \, mg \, \mu - \sin\alpha \, mg$$

$$F_a = F_{m2} - F_{oz} - \cos\alpha \, mg \, \mu + \sin\alpha \, mg$$

Gdje je:

F_a – sila koja tramvaju treba da se kreće određenom brzinom

F_{m1} – sila motora „uzbrdo“

F_{m2} – sila motora „nizbrdo“

Foz – sila otpora zraka
 $\cos\alpha mg$ – sila trenja
 $\sin\alpha mg$ – težina

Uzimajući u obzir i druge parametre koji utiču na potrošnju električne energije jednačine postaju sve složenije. Regenerativno kočenje, n-M karakteristike motora, i ostale karakteristike posebni su parametri koje treba uzeti u obzir prilikom projektovanja tramvajskog saobraćaja.

2.2. Efikasnost motora

Rekonstrukcija tramvaja, odnosno rekonstrukcija ili kompletna zamjena motora može uveliko smanjiti potrošnju električne energije. U Osijeku u kojem su električni tramvaji u upotrebi od 1926. godine, zadnjih godina ulaže se u energetska efikasnost tramvaja. Zbog nemogućnosti kupovine novijih, korištenih tramvaja radi nestandardne širine pruge u Osijeku su tramvaji tipa T3 povrgnuti rekonstrukciji od strane Krma firme u Češkoj Republici. Pored same modernizacije tramvaja urađeni su novi motori, energetska efikasniji od prijašnjih motora. I pored porasta broja putnika, smanjena je ukupna konzumacija električne energije. Pošto sama cijena električnog motora unutar životnog vijeka trajanja motora predstavlja samo 2% ukupnog troška slijedi da se isplati uložiti više u energetska efikasniji motor. Modernizacijom vozila, odnosno samim ugrađivanjem novih motora moguće je uveliko smanjiti potrošnju električne energije te napraviti ukupne uštede unutar životnog vijeka motora (Glavaš, 2013).

Na primjeru tramvaja u Osijeku i na osnovu istraživanja uvidjelo se da samom rekonstrukcijom vozila, ugradnjom novih motora se uveliko može smanjiti potrošnja električne energije. I sa ekonomskog aspekta je očigledna velika isplativost ovakvog vida rekonstrukcije.

3. OPTIMALNA TRAJEKORIJA JEDNOG TRAMVAJA

Da bi procijenili izvedbu optimalne putanje jednog tramvaja, potrebno je izvesti terenski test. Sistem za podršku vozačima (DAS) je specijalno razvijen za ovu namjenu. DAS će uključivati rezultate optimizacije koje su postigle u cilju optimalne trajektorije jednog tramvaja. (Zhao, 2015) (RSBB, 2012) Jedan od mogućih načina implementacije DAS-a je SmartDrive paket za postizanje primjene energetska učinkovite vožnje i strategije. Razvoj sistema SmartDrive-a nastao je iz saradnje između Ricarda Rail-a i Birmingham centra za željezničko istraživanje i obrazovanje (BCRRE). (Shashaj, 2016) SmartDrive predstavlja relativno jeftin i učinkovit način smanjenja potrošnje električne energije i povećanje energetske efikasnosti.

SmartDrive se sastoji od metoda optimizacije brzine vozila, povezana sa Driver Practical Sistem treningom (DPTS) i paketom svijesnosti, koji su pogodni za većinu željezničkih pruga zasnovanih na ručnom(ljudskom) upravljanju. (Shashaj, 2016)

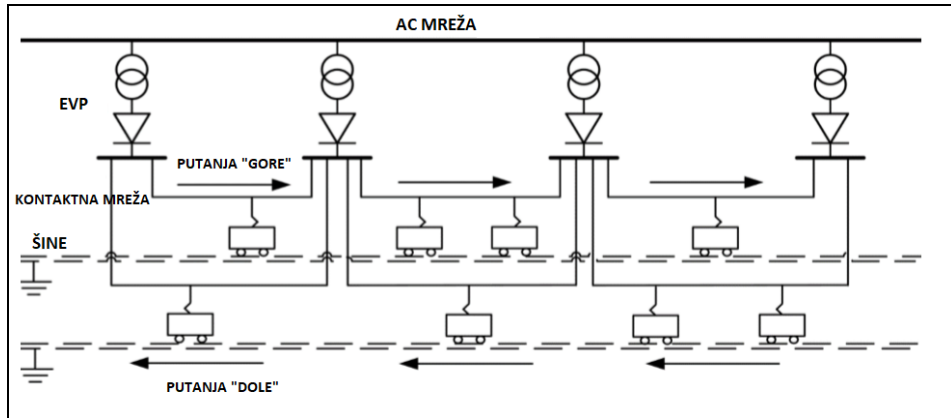
Sa fiksiranim parametrima karakteristika vozila i dužine i putanje rute, trajektorija brzine vozila se određuje sa upravljačkim kontrolama. Istraživanjem prema principu Protaginskog maksimuma dokazano je da je slobodan rad(prepuštanje inerciji) dobra metoda za energetska efikasnost, tj. uštedu energije.(Howlett, 2000) (Liu, 2003) U studijama energetska efikasne vožnje dokazano je da maksimalno ubrzanje i maksimalno kočenje takođe doprinose uštedi energije. Prema različitim dužinama puta i rasporedima vožnje, različiti odnosi kretanja konstantnom brzinom i slobodnog rada dovode do optimalne potrošnje. (Shashaj, 2016) U SmartDrive sistemu sa DPTS-om vozačima se prema svim ovim parametrima na displeju daju nalozi za prelazak iz stanja vožnje konstantnom brzinom u stanje slobodne vožnje (inercije).

Sa dobrom podlogom, npr. dobro utvrđenim i digitaliziranim tzv. “zelenim valom” signalizacijskih svjetala tramvajska optimizacija bi bez pomjeranja rasporeda signalizacijskih svjetala trebala “gađati” taj period zelenog svjetla, tj. neometanog prolaska vozila gdje bi se značajno moglo uštediti na potrošnji električne energije. Tramvajska vozila bi imala manje perioda zaustavljanja i što je bitnije manje puta bi kretali iz stanja mirovanja kada je najveća potrošnja električne energije.

Generalno DAS sistemi kao i sve nove tehnologije nose određeni rizik. Rizik DAS sistema se ogleda u prihvatanju od strane vozača, jer ipak u praksi DAS samo daje vozačima naloge kako bi trebali upravljati vozilom, a vozači su ti koji na terenu vrše kontrolu nad vozilima.

4. OPTIMALNA TRAJEKTORIJA VIŠE VOZILA

Vrši se detaljna simulacija kretanja vozila kroz mrežu sa uticajima na kontaktnu DC mrežu i napojnu AC mrežu. Računa se potrošnja električne energije elektrovučnih podstanica i potrošnja pojedinih vozila unutar mreže. Analizira se ukupna potrošnja električne energije sa uključenim specifičnim rasporedima vožnje. Idenificirati i kvalificirati gubitke energije.



Slika 2. Prikaz napajanja tramvaja preko EVP-a koje se spajaju na AC mrežu

U svijetu (npr. U Velikoj Britaniji) operateri vozila moraju plaćati penale za svaki minut kašnjenja vozila. Prema tome duža kašnjenja predstavljaju i dodatne troškove za operatera vozila. Povećavanjem brzine vozila moguće je smanjiti kašnjenje, ali samim povećavanjem brzine raste i potrošnja električne energije te interakcija sa vozilom ispred. Iz ovoga slijedi da je potrebno uzeti u obzir oba ova parametra koji donose dodatne troškove za operatera. (Zhao, 2015) Kreiran je model više vozila za ove svrhe. Ovakvim modelom se može uzeti u obzir:

- ✚ Optimalni profil ciljne brzine vozila, zasnovan na performansama svih vozila u mreži, iz perspektive posmatranog vozila
- ✚ Vrijeme putovanja i upotreba električne energije zajedno, kao dva parametra koja se transformišu u troškove
- ✚ Penali za kašnjenja koja mogu varirati na ruti

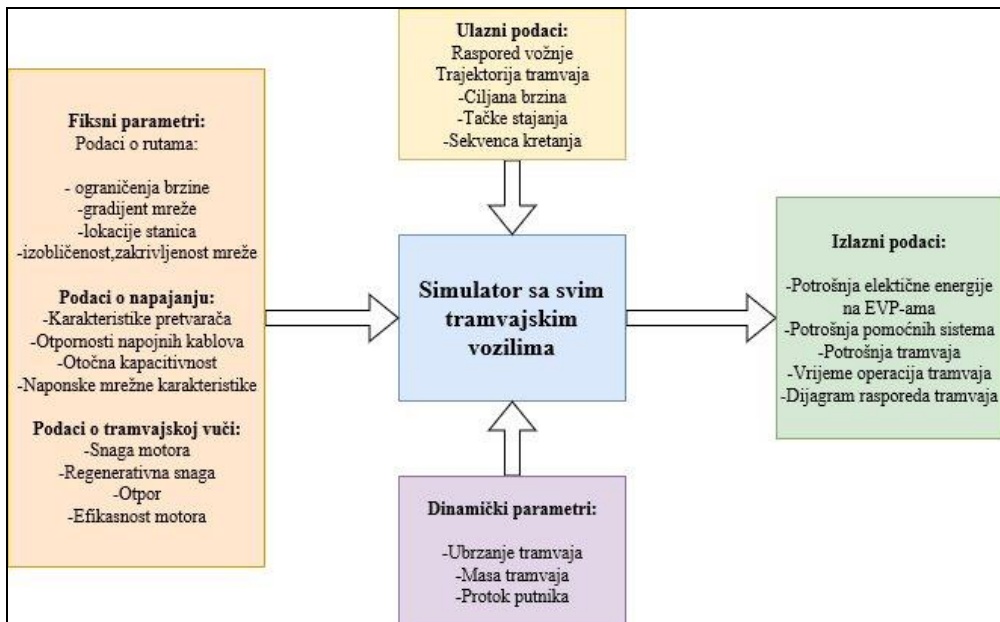
Različiti koeficijenti mogu simulirati različite stilove vožnje, kao što su prioritet za uštedu energije ili prioritet praćenja rasporeda vožnje.

5. OPTIMALNA TRAJEKTORIJA SA UKLJUČENIM SVIM VOZILIMA

Bazira se na rezultatima dobivenim iz prethodne tri stavke u ovom poglavlju. Genetički algoritam se koristi da bi se izvršila optimizacija sa uključenim rasporedima vožnje i sa korištenjem maksimalnog potencijala regenerativnog kočenja.

Tokom procesa pretvaranja električne energije u kinetičku energiju, smanjuje se energija za određene gubitke. Gubitak energije se ogleda u ugrađenim elektroničkim pretvaračima i gubicima u motorima kao toplinska

energija. Korišteni dijelovi mehaničke energije za prevazilaženje trenja i gravitacione sile su definisane kao gubitci kretanja i potencijalni gubitci, respektivno. Nakon oduzimanja svih gubitaka vozilo stiže brzinu i kinetičku energiju. Ako je željezničko vozilo implementirano s regenerativnim kočnim sistemima, dio kinetičke energija može se regenerirati kao električna energija tokom kočenja. Regenerativna kočna energija može se ponovo koristiti u drugim vozilima, ali regenerativna energija kočenja ovisi o prijemljivosti regenerativnog kočenja na mrežu i raspored vožnje (postojanja drugih vozila na trasi). (Tian, 2016) (Liu, 2003)



Slika 3. Shema simulatora sa svim tramvajskim vozilima

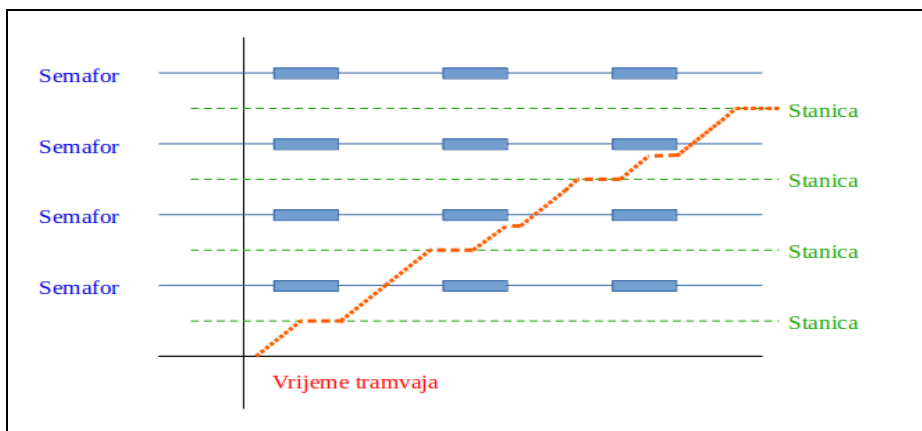
Jedna od metoda više tramvajске optimizacije je MDP (Markov Decision Process) formulacija opisana u (Ghaviha, 2016). Ova metoda se bazira na iskorištenju regenerativne energije kočenja za tramvaje koji su na istoj sekciji mreže. Radom je pokazano da je ova metoda dobra te da daljim usavršavanjem u smislu potpune interakcije i komunikacije između tramvaja MDP može biti dobar optimizacijski model.

Na električne tramvaje treba gledati kao na dio integrisanog sistema Smart-City koncepta budućnosti, u radu (Brenna, 2012) pobliže je objašnjeno koliko je bitan tramvajski podsistem unutar Smart-City koncepta, razvoj sistema u smislu smanjenja ukupne potrošnje energije i pravljenja novih, energetski učinkovitijih trasa.

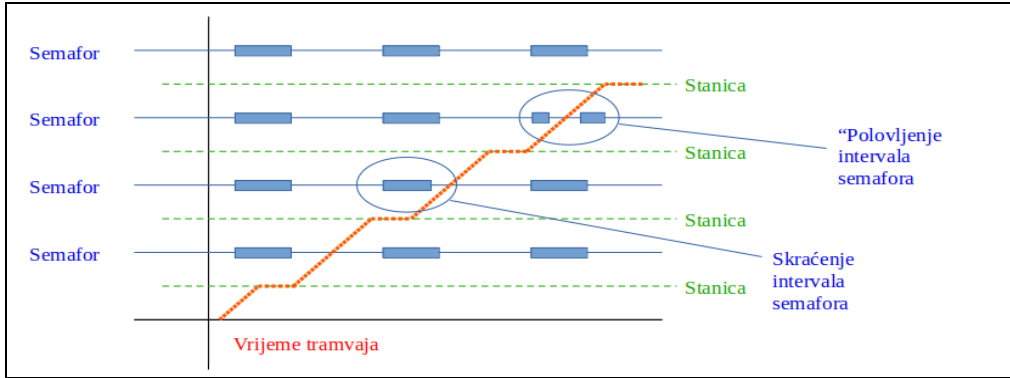
5.1. TSP

Moderni tramvaji su u konstantnom napretku performansi širom svijeta. Jedan od dobrih načina smanjenja stajanja tramvaja na raskrsnicama je uvođenje TSP-a (Transit Signal Priority) koji omogućava prioritetni tretman tramvaja na signalnim raskrsnicama. Postoji pasivni prioritet i aktivni prioritet. Pasivni podrazumjeva zeleni val za tramvaje prema rasporedu vožnje, u idealiziranom slučaju ovo bi predstavljalo savršen zeleni val. Međutim radi stajanja na stanicama i drugih smetnji pri vožnji ovakav sistem nije lako izvodljiv u praksi. Aktivna prioritetnost može detektovati tramvaj u pokretu koji se približava raskrsnici te omogućiti zeleno signalno svjetlo za prolaz tramvajskog vozila bez stajanja. Ovo može biti omogućeno uslovno ili bezuslovno, tako da uslovna aktivna prioritetnost na primjer može uslovljavati i da li tramvaj kasni i uključiti u proračun i druga vozila na raskrsnici.

Dodatno se može smanjiti broj stajanja na semaforima optimizirajući raspored vožnje tramvajskih vozila. Postoje različiti načini da se to napravi kao što su duže zadržavanje tramvaja na stanici, smanjenje brzine ili povećanje brzine kretanja. Pošto je brzina kretanja uslovljena parametrima tramvaja, brojem putnika i stanjem pruge nemoguće bi bilo optimizirati samo raspored vožnje. TSP i optimizacija rasporeda vožnje bi u kombinaciji mogli donijeti dobre rezultate (Zhou, 2019) (Shi, 2017).



Slika 4. Primjer kretanja vozila bez TSP-a

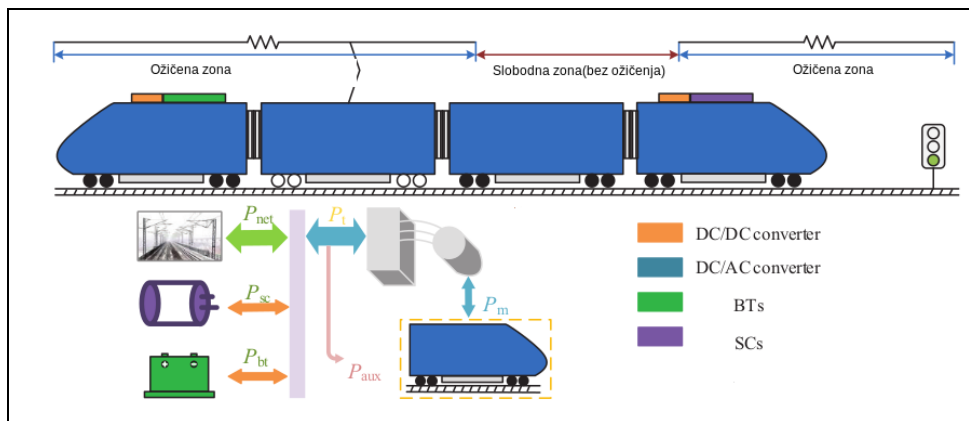


Slika 5. Primjer kretanja vozila sa TSP-om

Moguće metode za neometan prolazak tramvaja je adaptivno upravljanje semaforima. Na slici su prikazani neki od načina da se to ostvari, uzimajući u obzir da se ne kviri raspored semafora u smislu zelenog vala za automobile (i druga vozila).

5.2. Skladištenje energije

Tramvaji su jedno od najpopularnijih vozila za gradski prevoz u posljednjim godinama zbog ekonomskih i ekoloških prednosti. Postoje neke rute koje uključuju zone sa ožičenjem na mrežu i bez ožičenja, jer na nekim područjima nije pogodno postavljanje ožičenje tramvajske mreže zbog poslovnih centara ili turistički bitnih mjesta. Tramvaji s ugrađenim sistemima za skladištenje energije (ESS-ovima) mogu se pokretati autonomno bez ožičenja.



Slika 6. Vozilo sa baterijom i superkondenzatorom

U zonama bez mreže tramvaj samo pokreću ESS-ovi na vozilu. Dakle, vrsta ESS-a igra važnu ulogu za poboljšanje performansi tramvaja. Trenutno se u transportu široko koriste baterije (BT) i superkondenzatori (SC). Baterije imaju veliku energiju, ali su malih snaga dok SC-ovi mogu da daju veliku snagu i brz odziv, ali imaju nizak energetska kapacitet. Dakle, hibridni sistemi za skladištenje energije (HESS) u kombinaciji su BT i SC mogu poboljšati radne performanse tramvaja. Dijagram tramvaja s ugrađenim HESS-om i protok električne energije prikazan je na slici 6. Ovaj hibridni tramvaj sastoji se od tri vučne jedinice i jedne prikolice. Vučne jedinice su pogonjene sistemom za vuču preko pretvarača. BT i SC su spojeni na DC vezu sa dvosmjernim DC / DC pretvaračima, respektivno. Ova veza može isporučiti energiju iz ESS-a do istosmjerne mreže i obrnuto. Pored toga, BT i SC se mogu kontrolisati nezavisno. Tramvajski sistem sadrži i zone sa ožičenjem i zone bez ožičene mreže. U ožičenim zonama tramvaj uglavnom pokreće EVP, osim toga, HESS-ovi na vozilu koriste se za regulacija vršne snage za vrijeme pune snage i maksimalnog regenerativnog kočenja. Tramvaj se izravno napajaja s HESS-ovima u vozilu u zonama bez katenarne mreže, a HESS-ovi se uvijek pune ili režim pražnjenja kako bi se udovoljilo zahtjevu za napajanjem iz prenosnog sistema (Xiao, 2018).

6. ZAKLJUČAK

Ovaj rad dao je pregled strukture optimizacije potrošnje električne energije tramvajskog saobraćaja. Predočili su se problemi vezani za potrošnju električne energije tramvajskih vozila, ciljevi optimizacije potrošnje električne energije. Potrošnja električne energije tramvaja bi se mogla smanjiti kroz niz mjera koje se mogu poduzeti. U ovom radu su predočene su različite mjere za smanjenje potrošnje. Prva i osnovna mjera koja ne zahtjeva ulaganja je optimizirana vožnja, tj. pomjeranje i usklađivanje intervala maksimalnog ubrzavanja, vožnje inercijom i kočenja prema rasporedima vožnje da se maksimalno smanji konzumacija električne energije. Dalje mjere uključuju popravku pruge kako bi se mogla efikasnije koristiti vozila (da voze nazivnim brzinama), moguća ulaganja u nove, energetska efikasnije motore, ulaganje u napredne tehnologije kao što su TSP, DAS i sl. Predočene su i druge vrste tramvajskih vozila koje koriste različite nove tehnologije u cilju povećanja komfora, sigurnosti i smanjenja konzumacije energije. Za dalja istraživanja trebalo bi praviti optimizacijske modele svih vrsta vozila tramvajskog saobraćaja neke tramvajske mreže. Poslije optimizacijskih modela trebalo bi vršiti terenska ispitivanja i dalje korake ka unaprijeđenju energetska efikasnosti i smanjenju potrošnje električne energije.

LITERATURA

1. Brenna, M., Falvo, F.C., 2012. *Challenges in Energy Systems for the Smart-Cities of the Future*
2. Ghaviha, N., Bohlin, M., Dahlquist, E., 2016. *Speed Profile Optimization of an Electric Train with On-board Energy Storage and Continuous Tractive Effort*
3. Glavaš, H., Ivanović, M., 2013. *Energy Efficiency of Tram Transport in the City of Osijek*
4. Howlett, P. G., *Ann. Oper. Res.*, vol. 98, nos. 1–4, pp. 65–87, 2000. *The optimal control of a train*
5. Liu, R., Golovitcher, I. M., vol. 37, no. 10, pp. 917–932, 2003. *Energy-efficient operation of rail vehicles*, *Transp. Res. A, Policy Pract.*
6. Palić, N., 2015. *Planiranje saobraćaja u gradovima: (sa primjerima iz prakse)*. Visoka škola „CEPS – Centar za poslovne studije“ Kiseljak.
7. Palić, N., Cinac, Dž. 2015. *Intermodalni transport sa zbirkom zadataka*. Visoka škola “Logos centar”, Mostar.
8. RSBB, 2012. *GB Operational Concept Standalone Driver Advisory System (S-DAS)*. The Rail Safety and Standard Board
9. Shashaj, A. 2016. *Markus Bohlin and Nima Ghaviha*. Joint Optimization of Multiple Train Speed Profiles
10. Su, S., Li, X., Tang, T., Gao, Z., 2013. *IEEE Trans.*, 2013. A subway train timetable optimization approach based on energy-efficient operation strategy
11. Tian, Z., et al., *IET Elect. Syst. Transp.*, vol. 6, no. 2, pp. 41–49, Jun. 2016. Energy evaluation of the power network of a DC railway system with regenerating trains
12. Tian, Z., Weston, P., Zhao, N., Hillmansen, S., Roberts, C., Chen, L., 2017. *Transp. Res. C, Emerg. Technol.*, vol. 75, pp. 120–135, Feb. System energy optimisation strategies for metros with regeneration
13. Tian, Z., Zhao, N., Hillmansen, S., Roberts, C., Dowens T., Kerr, C., 2018. *SmartDrive: Traction Energy Optimization and Applications in Rail Systems*
14. Xiao, Z., Sun, P., Wang, Q., Zhu, Y., Feng, X., 2018. *Integrated Optimization of Speed Profiles and Power Split for a Tram with Hybrid Energy Storage Systems on a Signalized Route*
15. Zhao, N., 2012. *Railway Traction and Power System Energy Optimisation*, Birmingham Centre for Railway Research and Education

16. Zhao, N., 2015. *A Multiple Train Trajectory Optimization to Minimize Energy Consumption and Delay*
17. Zhou, W., Bai, Y., Li J., Zhou, Y., Li, T., 2019. *Integrated Optimization of Tram Schedule and Signal Priority at Intersections to Minimize Person Delay*