

Andrija Ostojić*
andrijaostojic0@gmail.com

Luka Šaranović
lsaranovic96@gmail.com

doc. dr Martin Čalasan
martinc@ucg.ac.me

UTICAJ REŽIMA VOŽNJE NA EFIKASNOST REGENERATIVNOG KOČENJA KOD ELEKTRIČNIH AUTOMOBILA

KRATAK SADRŽAJ

Ovaj rad se bavi uticajem režima vožnje na efikasnost regenerativnog kočenja kod električnih vozila. U tom cilju u radu su izvedeni i prikazani analitički izrazi za vrijednost energije koja se koristi za kretanje električnog vozila kao i energije koja se koristi za kočenje električnog vozila i udio regenerativnog kočenja u njoj. Pokazano je da režimi vožnje, a samim tim i sredina kroz koju se saobraća, imaju veliki uticaj na efikasnost regenerativnog kočenja.

Ključne riječi: Regenerativno kočenje – Efikasnost

IMPACT OF DRIVING MODE ON THE EFFICIENCY OF REGENERATIVE BRAKING IN ELECTRIC VEHICLES

SUMMARY

This paper deals with impact of driving mode on the efficiency of regenerative braking in electric vehicles. For this purpose, the analytical expressions for the value of the traction energy of an electric vehicle, as well as the braking energy and the proportion of regenerative braking in it, are also derived and presented. It has been shown that the driving modes, and therefore the driving areas, have a major impact on the efficiency of regenerative braking.

Key words: Regenerative braking – Efficiency

1. UVOD

1.1. Električna vozila

Električna vozila su vozila koja koriste jedan ili više električnih motora za pogon. U kategoriju električnih vozila spadaju: automobili, vozovi, motocikli kamioni i slično. U ovom radu fokus će biti na električnim automobilima [1-3].

Električni automobili su se pojavili sredinom 19. vijeka. Međutim, uprkos njihovoj pojavi, potisnuti su usled pronalaska alansera kod dizel automobila i ubrzanom eksploatacijom nafte. Krajem 20. vijeka električna vozila opet stupaju na automobilsku scenu, i uzimaju značajniju pažnju i proizvođača i kupaca.

*Ul. Luke Gojnića bb, Podgorica

Glavni problem električnih vozila jeste u punjenju akumulatora, a samim tim u mogućoj dužini predjenog puta sa jednim punjenjem. Punjenje električnih automobila može se ostvariti na nekoliko načina – klasični metod u punionicama, regenerativnim kočenjem [4-5], bežičnim punjačem, solarnim krovom i drugim. Skladištenje električne energije takođe varira od klasičnog sistema sa baterijama preko hibridnih sistema koji proizvode električnu energiju unutar automobila, do *fuel cells* automobila koji koriste vodik kao gorivo kojim se proizvodi električna energija. Takođe, sve više se pominju električni automobili koji koriste ultrakondenzatore kao skladište energije. Samim tim postoji i više vrsta električnih automobila - električni automobili sa baterijama, plug-in hibridni automobili, hibridni automobili i slično [1].

Značaj električnih automobila ogleda se najviše u smanjivanju zagađenja okoline. U prosjeku, od proizvodnje pa tokom životnog vijeka i konačno do odlaganja, električni automobili proizvedu 50% manje štetnih gasova od automobila koji koriste motore sa unutrašnjim sagorijevanjem. Takođe, uzimajući samo značaj električnih vozila za gradove, električna vozila rešavaju dva problema sa kojima se gradovi susreću - zagađenje vazduha i buka.

Sa druge strane, električna vozila imaju manje djelova, naročito onih pokretnih, samim tim jednostavnija su za održavanje i korišćenje, istrajnija su i izdržljivija.

Međutim, njihov uticaj na mrežu, obzirom da svako električno vozilo ima bateriju u sebi, mogao bi imati izuzetno dobru primjenu u sistemima za skladištenje električne energije dobijene iz vjetroelektrana, solarnih panela i samim tim riješiti glavni problem obnovljivih izvora energije. Sa druge strane, priključenje električnog vozila na mrežu ima i negativnih efekata – kao posljedica konverzije naizmjenične energije u jednosmjernu, ili obrnuto, neizostavna je pojava viših harmonika koji prljaju mrežu [1].

Ovaj rad se bavi uticajem režima vožnje na vrijednost utrošene i vraćene energije kod električnog automobila. U tom cilju, u radu je dat i matematički opis mehanike automobila i ukazano na uslove konverzije mehaničke energije u električnu. U tom cilju, u drugom poglavlju je opisano izvođenje matematičkog modela električnog vozila, sa krajnjim ciljem dobijanja funkcije zavisnosti energije oslobodjene pri kretanju vozila od vremena. U trećem poglavlju su tabelarno i grafički prikazani rezultati simulacija koji opisuju vrijednosti preuzete energije iz akumulatora i vraćene energije, za različite režime vožnje automobila.

2. MATEMATIČKI MODEL ELEKTRIČNOG VOZILA

Pod matematičkim modelom vozila podrazumijevaju se jednačine kojima se izražava zavisnost uložene ili utrošene snage i oslobodjene energije pri kretanju od brzine vozila i njegovog ubrzanja [1]. Kao početnu tačku uzima se jednačina dinamike vozila koja glasi:

$$M \frac{dv}{dt} = (F_{tf} + F_{tr}) - (F_{rf} + F_{rr} + F_w + F_g) \quad (1)$$

i koja važi za slučaj kretanja vozila po jednom pravcu. U navedenoj jednačini M je masa vozila, a $\frac{dv}{dt}$ predstavlja ubrzanje vozila. Član jednačine koji je odgovoran za računanje komponente otpora vazduha je F_w . Otpor vazduha se računa koristećenjem formule:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho A_f C_D (V - V_w)^2 \quad (2)$$

gdje je ρ – gustina vazduha, A_f - površina prednje strane vozila, C_D – koeficijent otpora vazduha koji zavisi od oblika tijela vozila, V – brzina vozila i V_w – komponenta brzine vjeta koja je u smjeru kretanja vozila.

Članovi F_{tf} i F_{tr} koji čine prvu zagradu jednačine (1) predstavljaju pogonske sile koje djeluju na prednju i zadnju osovinu vozila, respektivno. Njihov zbir označen je sa F_t .

Članovi F_{rf} i F_{rr} predstavljaju sile kojima se ekvivalentira dejstvo otpornog momenta kotrljanja na prednjim i zadnjim točkovima, respektivno. Njihov zbir označen je sa F_r .

Sila dodatnog otpora koja se javlja prilikom kretanja vozila po terenu sa nagibom, obilježava se sa F_g . Njeno dejstvo se posmatra zajedno sa dejstvom sile F_r , i predstavljene su formulom:

$$F_{rd} = F_r + F_g = Mg(f_r \cos \alpha + \sin \alpha), \quad (3)$$

gdje je α - ugao nagiba terena.

Međutim, za potrebe proračuna jednačina (1) se modifikuje. Naime, masa vozila se množi sa faktorom δ koji predstavlja rotacioni faktor inercije. Uloga faktora δ je da ekvivalentira dodatni otpor pri promjeni brzine tijela koji nastaje usljed rotacione inercije točkova automobila pri obrtanju. Prema tome, kada se jednačina (1) zapiše na drugi način, grupišući članove po ranije navedenim pravilima, dobija se:

$$M\delta \frac{dv}{dt} = F_t - F_{rd} - F_w \quad (4)$$

Cilj je da se iz gornje jednačine izrazi vučna silu F_t ,

$$F_t = F_{rd} + F_w + M\delta \frac{dv}{dt} \quad (5)$$

da bi data formula bila iskorištena za dobijanje jednačine za uloženu snagu [1-3]:

$$P = F_t V = V \left(F_{rd} + F_w + M\delta \frac{dv}{dt} \right) = V \left(Mg f_r + \frac{1}{2} \rho A_f C_D V^2 + M\delta \frac{dv}{dt} \right) \quad (6)$$

Na kraju da bi se dobila energiju koja se oslobodi pri kretanju vozila tokom nekog vremenskog perioda potrebno je da se zadnja jednačina integriše po vremenu:

$$E = \int P dt . \quad (7)$$

3. REZULTATI SIMULACIJA

Prilikom ispitivanja efikasnosti regenerativnog kočenja realizovane su simulacije koristeći matematički model vozila i više različitih režima vožnje. Uzeto je da se regenerativno kočenje ne vrši za brzine manje od 15 km/h.

Sistem regenerativnog kočenja funkcioniše tako što se do određene vrijednosti zahtijevane snage kočenja, čitav kočioni moment obezbjeđuje pomoću električnog motora, a za veće vrijednosti snage uključuje se mehaničko kočenje kojim se obezbjeđuje dodatni kočioni moment.

Tabela I. Statistički rezultati mjerenja

Režim vožnje	Energija pogonjenja [kWh]	Regenerisana energija [kWh]	Postotak regenerisane energije u odnosu na Energiju pogonjenja [%]	Postotak regenerisane energije u odnosu na Energiju kočenja [%]
FTP75	2.0988	0.6873	32.58	97.5
Elementary Urban Cycle	0.245	0.1023	41.77	96.77
Highway	1.692	0.149	8.8	93
US06	2.2858	0.44	19.29	83.89
SC03	0.7328	0.2611	35.64	93.6
NY	0.3256	0.1294	39.74	89.44
UDDS	1.3879	0.4701	33.87	97.2
Extra Urban Cycle	2.4598	0.2186	8.9	58.83

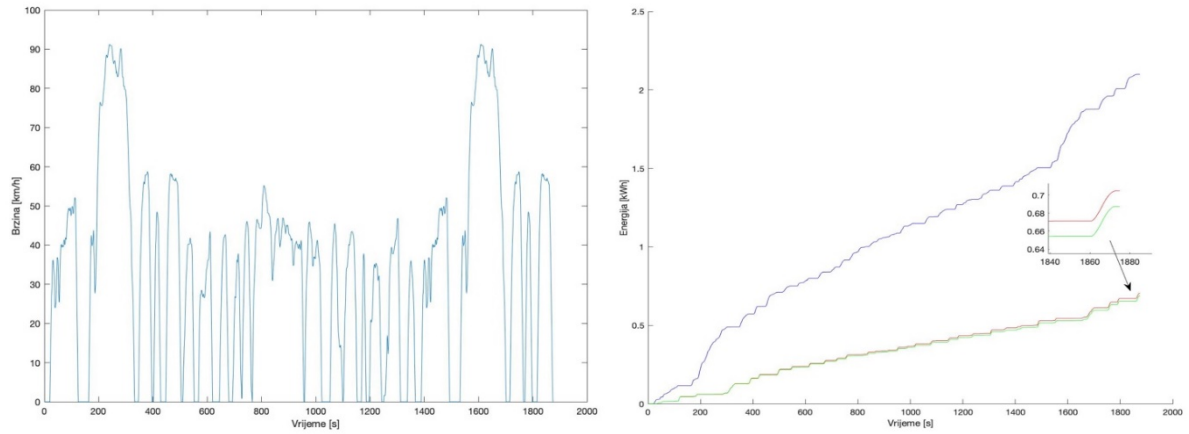
Na slikama 1-5 prikazani su grafici na kojima su prikazani režimi promjene brzine, energije pogonjenja, kočenja i regenerisana energija u toku vožnje. Za režime vožnje uzeti su testni sistemi najčešće korišćeni u literaturi.

Boje na graficima imaju sljedeća značenje:

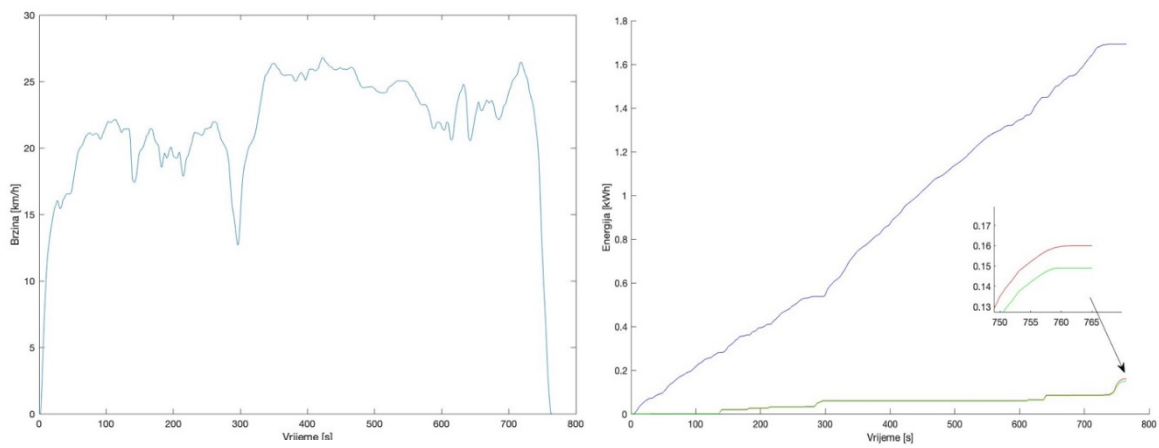
- Plava boja – Energija pogonjenja
- Crvena boja – Energija kočenja

- Zelena boja – Energija regenerisana pri kočenju
- Cyan boja – Režim vožnje (zavisnost brzine)

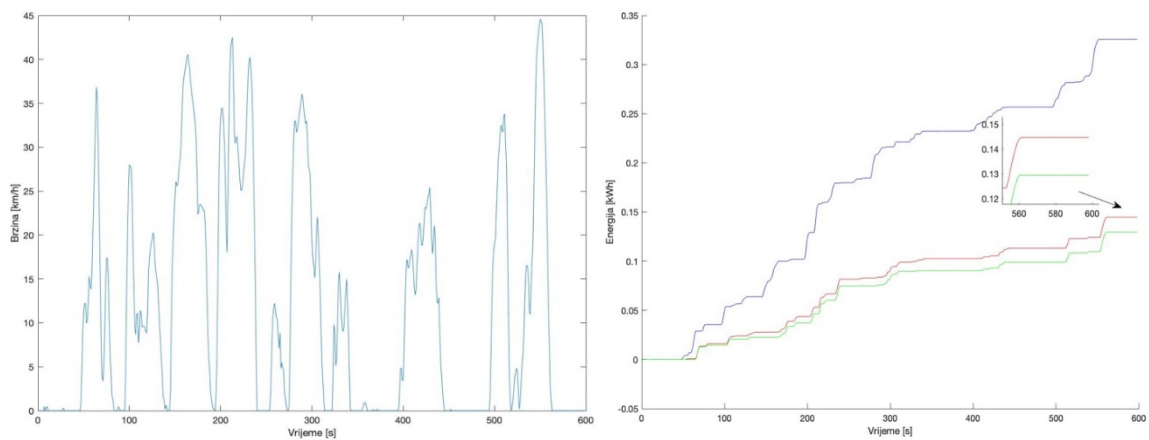
Sve veličine prikazane su u zavisnosti od vremena t.



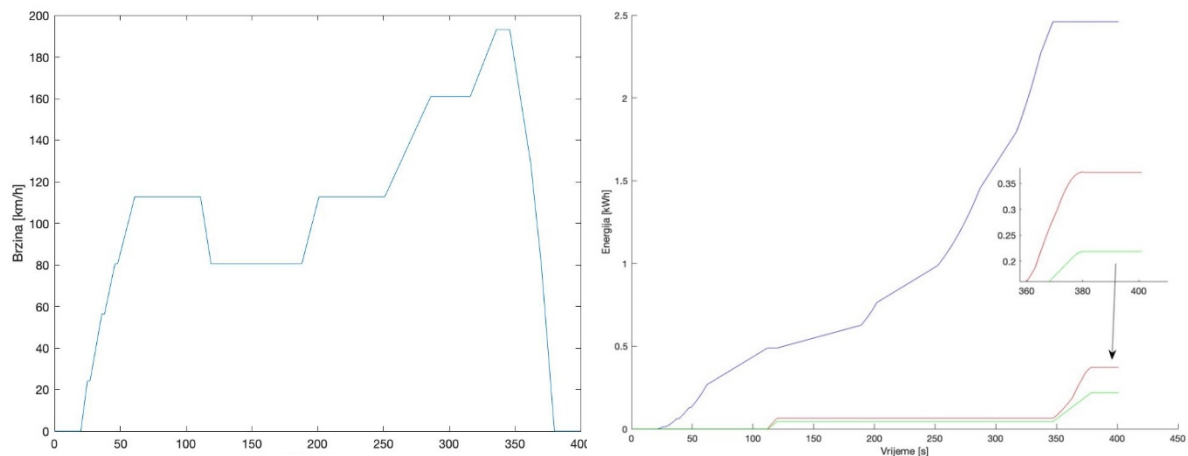
Slika 1. Highway režim vožnje



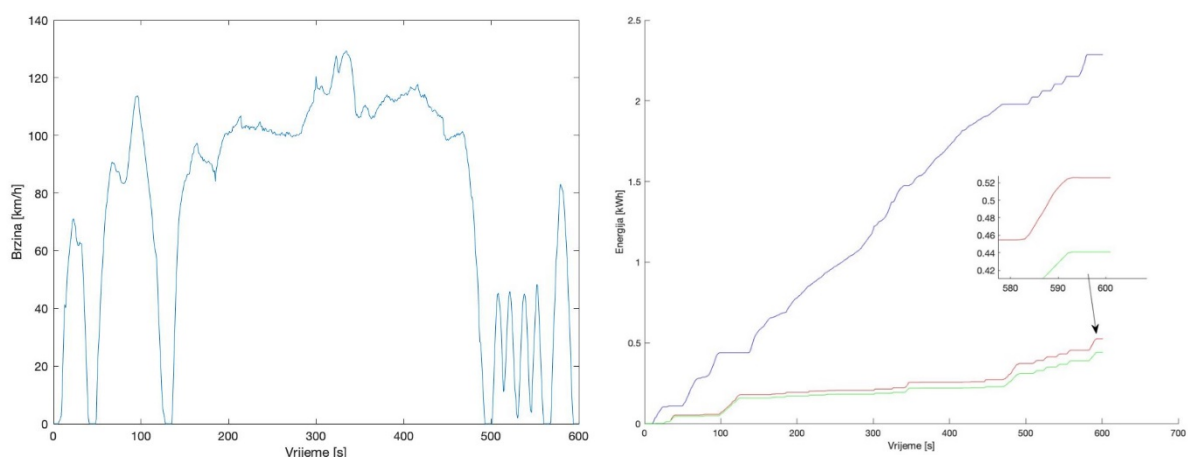
Slika 2. FTP75 režim vožnje



Slika 3. NY režim vožnje



Slika 4. Extra Urban režim vožnje



Slika 5. US06 režim vožnje

Iz dobijenih simulacija može se zaključiti da vrijednost energije potrošene na kočenje, kao i dio te energije koji je moguće regenerirati i vratiti u bateriju, bitno zavisi od režima vožnje. Dio energije koju je moguće regenerirati pri kočenju u odnosu na energiju koja se ulaže pri pogonjenju varira od 8.8% do 41.77%. Efikasnost regenerativnog kočenja, odnosno vrijednost regenerativne energije u odnosu na energiju kočenja varira od 58.83% do 97.5%.

Mogućnost značajne regeneracije se otvara u režimima gdje postoji učestalo kočenje, to se najviše odnosi na gradske oblasti. Pored učestalosti kočenja značajni faktori su brzina vožnje i snaga kočenja. Što je brzina veća, to je veća i kinetička energija automobila koja se može regeneracijom pretvoriti u električnu. Snaga kočenja je ograničavajući faktor, što se može vidjeti na primjeru „Extra Urban Cycle“ režima vožnje, gdje je snaga kočenja najveća a efikasnost regenerativnog kočenja najmanja.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu analiziran je uticaj režima vožnje na efikasnost regeneracije energije prilikom električnog kočenja kod elektromobila. Pokazano je da na efikasnost kočenja veliki uticaj ima režim vožnje, dok procenat vraćene energije zavisi i od brzine vožnje i snage kočenja.

U budućem radu analiziraće se efekat različitih tipova vozila na efikasnost kočenja za istu vrijednost režima vožnje.

5. LITERATURA

- [1] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, K. Ebrahimi, „Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles“, CRC Press, 2018
- [2] B. Xiao, H.Lu, H.Wang, J. Ruan, N. Zhang, „Enhanced Regenerative Braking Strategies for Electric Vehicles: Dynamic Performance and Potential Analysis“, MDPI ,Guangzhou, China, 2017
- [3] B. J. Varocky, „Benchmarking of regenerative braking for a fully electric car“, TNO Automotive, Eindhoven university of Technology, 2011
- [4] M. Čalasan, "Elektromotorni pogoni, teorija sa zadacima“, Skripta, Elektrotehnički fakultet, Podgorica 2018.
- [5] V. Vučković, "Elektromotorni pogoni“, Akademska misao, Beograd 2002.