

# Optimizacija prihodka pri dobavi električne energije električnim vozilom

**Damir Imširović, Matej Rejc, Miloš Pantoš**

*Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: damir.imsirovic@fe.uni-lj.si, matej.rejc@fe.uni-lj.si, milos.pantos@fe.uni-lj.si*

**Povzetek.** Nadaljnji razvoj na področju električnih vozil (EV) bo v EES vnesel večje spremembe. Z razvojem tehnologij EV in aktivnih omrežij bodo lahko EV sodelovala na trgu z električno energijo, kjer bi baterije EV uporabljali kot skupen shranjevalnik električne energije. V članku predstavljamo optimizacijski algoritem polnjenja in praznjenja EV z namenom maksimizacije prihodka dobavitelja električne energije EV, kar bi posledično za uporabnike EV pomenilo cenejše stroške vožnje EV. Za poenostavitev optimizacijskega problema predstavljamo združevanje večjega števila EV v flote s podobnimi voznimi navadami. Tako v optimizacijskem postopku pridobimo konstantno število spremenljivk ne glede na število EV. Pri spreminjanju števila EV se s tem spreminja le ena od omejitev optimizacijskega algoritma. Za združevanje voznih redov EV v flote smo uporabili metodo k-tih povprečij. Na podlagi izdelanih voznih redov flot EV algoritem določi optimalno polnjenje oz. praznjenje baterij s sodelovanjem na urnem trgu z električno energijo. Kot rešitev dobimo optimalne čase nakupa in prodaje električne energije za namen vožnje in sodelovanja na trgu. Te se med seboj ločujejo glede na način in uro vožnje. V članku smo podali deterministični način reševanja podanega optimizacijskega problema, v nadaljnjem raziskovalnem delu pa bomo problem razširili na verjetnostni problem in proučili različne načine združevanja EV v flote.

**Ključne besede:** metoda k-tih povprečij, trg z električno energijo, linearna optimizacija

## Optimization of Energy Supply of Electric Drive Vehicles

Increased electric drive vehicle (EDV) use is expected in the future due to the rapid development of new EDV technologies, increased environmental concerns, increasing petroleum-based fuel prices and the possibility of EDV participation on electricity markets. In this paper, an optimization algorithm for EDV charging and discharging for electricity-spot market participation is presented. The use of the presented algorithm would bring lower EDV driving costs for its users and a competitive advantage for the EDV electricity provider that would use the EDV batteries as a storage system in order to purchase and sell additionally stored energy on the electricity market. To simplify the optimization algorithm, individual EDV are grouped into larger EDV fleets. The use of EDV fleets introduces a constant number of optimization variables in the optimization process. K-means clustering algorithm is used to group individual EDV into larger fleets. The optimization problem was approached deterministically and in future work, a probabilistic approach to the problem will be presented.

## 1 UVOD

Z razvojem tehnologij električnih vozil (EV), povečane okoljske zavednosti, višjih cen goriva, možnosti sodelovanja EV na trgu z električno energijo in zahtev po doseganju energetske neodvisnosti lahko v bližnji prihodnosti pričakujemo čedalje širšo uporabo EV. S

povečanjem števila EV bodo elektroenergetski sistemi (EES) izpostavljeni velikim spremembam, zahtevam po uporabi novih tehnologij, gradnjami polnilnih mest in ojačitvam omrežja. Dodatno naj bi z razvojem električnih baterij EV lahko sodelovali na urnem trgu z električno energijo, kjer bi baterije EV uporabljali kot skupen shranjevalnik električne energije [1].

V članku predstavljamo optimizacijski algoritem shranjevanja električne energije v baterijah EV, rešitev optimizacijskega postopka pa bi bili optimalni časi polnjenja EV in prodaje shranjene energije na urnem trgu z električno energijo. S tem bi dobaviteljem električne energije (obstoječa podjetja, ki se ukvarjajo z distribucijo in dobavo električne energije) omogočali maksimizacijo prihodka s prodajo dodatne shranjene energije v baterijah EV. Maksimizacija prihodka bi posledično za uporabnike EV pomenila nižje stroške vožnje EV.

Za poenostavitev optimizacijskega problema smo združili posamezne EV v večje flote s podobnimi voznimi navadami. Tako se število spremenljivk v optimizacijskem postopku s spreminjanjem števila EV ohranja. Spreminja se le vozni diagram posameznih flot ter omejitve shranjevanja energije v baterije EV. Zato v članku predstavljamo način združevanja posameznih EV v flote z uporabo metode k-tih povprečij. Na podlagi

izdelanih vozni redov flot EV algoritem določi optimalno polnjenje oz. praznjenje baterij s sodelovanjem na trgu z električno energijo. Kot rešitev dobimo optimalne čase nakupa električne energije, ki se shrani v baterije za vožnjo in sodelovanje na trgu ter prodajo električne energije iz baterij. S tem dobavitelj kupi energijo, kadar je najcenejša, in shranjeno energijo, ki je EV ne potrebuje za vožnjo, proda, ko je cena najvišja.

Raziskave na področju polnjenja EV obsegajo predvsem vpliv polnjenja EV na EES [1-3], čedalje bolj aktualne pa so tudi raziskave na področju optimizacije polnjenja in sodelovanja EV na različnih trgih električne energije [4, 5].

V predstavljenem članku podajamo osnovo za vse nadaljnje raziskave na tem področju, ki razširijo deterministični pristop na verjetnostnega in upoštevanje večih trgov in drugih ekonomskih in tehničnih dejavnikov, kot so analiza morebitnega zmanjšanja toplogrednih plinov, upoštevanje stroškov povezanih z življenjsko dobo baterij, upoštevanje izmenjave shranjene energije med flotami ipd.

V poglavju 2 podajamo opis EV in vlogo dobavitelja električne energije. V poglavju 3 podajamo opis metodologije za optimalno sodelovanje EV na trgu z električno energijo, v poglavju 4 pa podajamo rezultate analize. V poglavju 5 sledijo ugotovitve prispevka.

## 2 OPIS ELEKTRIČNIH VOZIL IN VLOGA DOBAVITELJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Pri rabi energije v prometu se fosilnim gorivom in biogorivom pridružuje električna energija. Prehod do širše vključitve vozil na električno energijo v vozni park bo postopen in je po nekaterih napovedih pričakovati, da bodo do leta 2030 EV skoraj vsa na novo prodana vozila. V primerjavi z motorji na notranje zgorevanje je energetska učinkovitost električnega motorja večja; učinkovitost pretvorbe energije iz baterij je okvirno 90-odstotna, medtem ko motorji z notranjim zgorevanjem pretvorijo okvirno 30 odstotkov energije shranjene v gorivu [1]. Kot dodatno prednost EV lahko omenimo bistveno nižje in lokalno omejene emisije toplogrednih plinov. Kljub temu je treba upoštevati dodatne emisije pri sami proizvodnji električne energije iz premoga in plina. Predvidoma bi se emisije CO<sub>2</sub> ob uporabi izključno EV zmanjšala za približno trikrat [6]. EV imajo prav tako trenutno veliko slabosti, ki pa so večinoma povezane s samo baterijo in ceno EV. Te slabosti naj bi se z razvojem tehnologije EV zmanjšale. Tako je trenutna slabost EV njihov doseg, ki je v povprečju enak približno 150 km na polnjenje, kar je približno trikrat manjši doseg kot pri vozilih na notranje zgorevanje. Slabost baterij je prav tako njihov polnilni čas – ta lahko traja od 4 do 8 ur [7]. Omeniti je treba tudi prihajajoče ekološke probleme, ki bi jih povzročale odpadle baterije – v prihodnosti bo nujna reciklaža starih baterij. Prav tako bodo potrebne večje naložbe v

infrastrukturo EES, razvoj aktivnih omrežij in postavitev novih regulatornih pravil za systemske operaterje in dobavitelje električne energije. S tem bodo igralci na trgu z električno energijo in dobavitelji potrebovali primerna analitična orodja za obravnavo EV.

Uporaba aktivnih omrežij in EV tako pomeni novo dimenzijo pri delovanju EES in trgih z električno energijo. S tem bodo dobavitelji lahko z EV v prihodnje sodelovali na trgu sistemskih storitev za regulacijo frekvence, razbremenjevanju delov sistema, sodelovanje na izravnalnem trgu ipd. Osnovna ideja tega je uporaba baterij EV kot začasne shranjevalnike električne energije, polnjenje/praznjenje baterij pa bi lahko bilo časovno nastavljivo glede na odločitve dobavitelja. S sodelovanjem na trgu bo dobavitelj lahko zmanjšal stroške nakupa energije za vožnjo, kjer bi s prodajo dodatne energije v času višjih cen električne energije ustvaril prihodek. S tem dobavitelj pokrije del stroškov nakupne energije za vožnjo. To je konkurenčna prednost pred dobavitelji, ki teh orodij nimajo.

## 3 ALGORITEM ZA OPTIMALNO SODELOVANJE EV NA TRGU Z ELEKTRIČNO ENERGIJO

Dobavitelj bo z večanjem števila EV potreboval orodje za optimalno razporejanje polnilnih časov in časov prodaje dodatno shranjene energije iz EV, s čimer bo zmanjšal stroške nakupa energije, potrebne za vožnjo. Zato v članku podajamo predlog optimizacijskega algoritma, ki omogoča optimalno polnjenje EV oz. optimalnega sodelovanja EV na trgu. Za poenostavitev optimizacijskega problema smo vozne rede posameznih EV združili v večje flote, s čimer smo omejili število optimizacijskih spremenljivk. Pri spreminjanju števila EV se tako spreminja le ena od omejitev optimizacijskega problema.

Ker so vozni redi v večini primerov odvisni od delovnih navad ljudi, smo EV združili v različne flote, ki sovpadajo z voznimi navadami različnih skupin ljudi (npr. skupine ljudi, ki delajo v jutranji izmeni, večerni izmeni, vozijo na manjših ali večjih razdaljah, ipd.). Zato predstavljamo način združevanja EV v večje flote z uporabo metode k-tih povprečij.

V podpoglavju 3.1 predstavljamo primere voznih diagramov posameznih EV, razloge in način združevanja voznih redov EV v posamezne flote. V podpoglavju 3.2 pa predstavljamo optimizacijski algoritem za sodelovanje EV na trgu z namenom zmanjševanja stroškov nakupa električne energije za EV.

### 3.1 Združevanje voznih redov EV v vozne flote EV

Vozni diagrami EV različnih skupin ljudi so nepredvidljiva množica voznih diagramov. Za sodelovanje na trgu to lahko pomeni težavo, saj se ljudje vozijo ob različnih časih in prevozijo različne razdalje.

Prav tako pri optimizaciji polnjenja EV in sodelovanja na trgu ni priporočljivo upoštevati vsakega EV posebej, zato se ta združijo v flote, to so tipične skupine s podobnimi voznimi navadami. S tem dobimo nadomestne vozne diagrame. Prednost uporabe flot je pridobitev konstantnega števila optimizacijskih spremenljivk. S spremembo števil EV se spreminja le omejitev, ki se nanaša na skupne zmogljivosti baterij v floti.

V članku smo za namen združevanja EV v skupine (flote EV) zato uporabili metodo k-tih povprečij (angl. k-means clustering) [8]. Z metodo k-tih povprečij določimo tipične oblike voznih redov EV iz množice voznih redov vseh opazovanih EV. Tako metoda iteracijsko z minimizacijo kriterijske funkcije (1) združi posamezne vozne rede v k reprezentativnih flot. Metoda je v teoriji določanja vzorcev zelo razširjena, ker je preprosta.

$$J = \min \sum_{g=1}^k \sum_{d_j \in g} \|d_j - \mu_g\|^2, \quad (1)$$

$$\mu_g = \frac{1}{m_g} \sum_{d_j \in g} d_j, \quad (2)$$

kjer je  $J$  kriterijska funkcija,  $k$  je število flot,  $d_j = [d_{j,1}, d_{j,2}, \dots, d_{j,t}]$  je vozni diagram j-tega EV, ( $t = 24$  ur).  $\mu_g = [\mu_{g,1}, \mu_{g,2}, \dots, \mu_{g,t}]$  pomeni aritmetično sredino voznih redov v g-ti floti,  $m_g$  pomeni število EV v g-ti floti. Ta aritmetična sredina pomeni nadomestni diagram voznih redov EV, ki spadajo v floto g, kar je cilj združevanja.

Postopek k-tih povprečij lahko strnemo v naslednje korake. Cilj postopka je iteracijsko določiti aritmetične sredine voznih redov k flot, da dosežemo minimum kriterijske funkcije.

1. V prvi iteraciji izberemo število flot  $k$ , kjer  $k \leq m$  in izračunamo aritmetične sredine k flot  $\mu_g(1)$ .
2. V q-ti iteraciji postopka razdelimo vozne diagrame v k flot. Vozni diagram j uvrstimo v g-to floto, če:

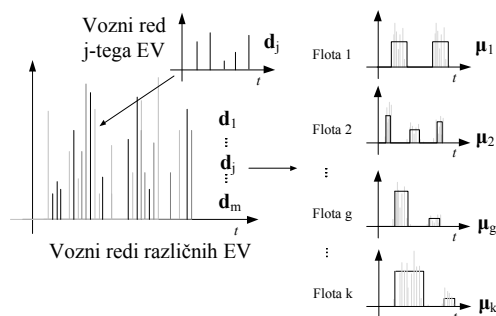
$$\|d_j - \mu_g(q)\| < \|d_j - \mu_{ng}(q)\|, \quad (3)$$

$$\forall 1, 2, \dots, k \vee g \neq ng,$$

kjer so  $ng$ , v pogoju za floto g, neopazovane flote.

3. Izračunamo nove aritmetične sredine k flot  $\mu_g(q+1)$ .
4. Če je  $\mu_g(q+1) = \mu_g(q)$  za vseh k flot, je postopek končan.

Uporaba tega postopka na splošno zahteva eksperimentiranje z različnim številom flot in z različnimi začetnimi aritmetičnimi sredinami. Pri opazovanju EV je treba za določitev števila flot upoštevati različne vozne navade različnih flot ljudi (delavci v industriji, v storitvenem sektorju, študenti, upokojenci, poklicni vozniki ipd.). Kot rezultat združevanja voznih redov EV v flote dobimo nadomestne vozne diagrame za različne flote voznih navad ljudi, slika 1.

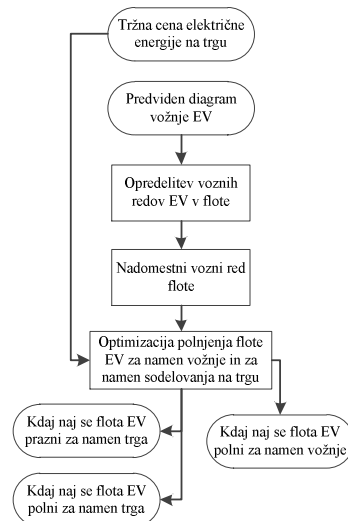


Slika 1: Zdrževanje voznih redov EV v flote

### 3.2 Optimizacija sodelovanja EV na trgu z električno energijo

Optimizacijski algoritem omogoča optimalen nakup energije za vožnjo in za prodajo shranjene električne energije na trgu. Cilj uporabe algoritma je pridelati prihodek s sodelovanjem na trgu [2-4].

Slika 2 predstavlja diagram poteka optimizacijskega algoritma polnjenja in praznjenja EV z namenom maksimizacije prihodka dobavitelja. Za začetek postopka zahtevamo uporabo združevanja voznih redov EV v flote, s čimer dobimo nadomestne vozne diagrame flot EV (uporaba metode k-tih povprečij, podpoglavje 3.1). Za to potrebujemo podatke o voznih redih EV. Za določitev teh voznih redov morajo uporabniki EV določiti predviden diagram vožnje oz. to določi dobavitelj na podlagi preteklih podatkov o voznih redih EV. Tako dobavitelj z uporabo optimizacijskega algoritma določi optimalni potek polnjenja EV za namene vožnje in optimalno sodelovanje EV na trgu.



Slika 2: Optimizacijski algoritem polnjenja in praznjenja EV

Z enačbami od (4) do (10) opisujemo optimizacijski algoritem, ki zajema optimalno sodelovanje na trgu in optimalen nakup energije za namen vožnje. Kriterijska funkcija, s katero opisujemo optimalno sodelovanje g-te flote EV za vožnjo EV in sodelovanja na trgu, je enaka:

$$J_g = \sum_{i=1}^t c_i \cdot y_{g,i} \cdot \eta_{pra} - \sum_{i=1}^t c_i \cdot x_{g,i} \cdot \frac{1}{\eta_{pol}} \Rightarrow \max, \quad (4)$$

kjer je  $t$  število opazovanih ur,  $c_i$  tržna cena električne energije na borzi v  $i$ -ti uri,  $y_{g,i}$  spremenljivka optimizacijskega izračuna, ki kot rešitev poda količino električne energije, ki jo lahko prodamo na trgu v  $i$ -ti uri za optimalno sodelovanje na trgu  $g$ -te flote EV,  $\eta_{pol}$  povprečen izkoristek polnjenja baterij vseh EV v floti,  $x_{g,i}$  spremenljivka optimizacijskega izračuna, ki kot rešitev poda količino električne energije, ki jo moramo kupiti na trgu v  $i$ -ti uri za vožnjo in za sodelovanje na trgu  $g$ -te flote EV,  $\eta_{pra}$  povprečen izkoristek praznjenja baterij vseh EV v floti.

Kriterijska funkcija in optimizacijski algoritem ne upoštevata pospešene degradacije zmogljivosti baterij in krajšanja njihove življenjske dobe zaradi intenzivnega angažmaja baterij na trgu z električno energijo. Zanimarjeni so tudi stroški, povezani s to problematiko, ki bi načeloma morali biti zajeti v kriterijski funkciji. Pripadajoče omejitve podajamo v nadaljevanju.

Hitrost polnjenja baterij za vožnjo ali za prodajo na trgu določa omejevalec toka polnilnega mesta, kjer so EV  $g$ -te flote priključeni:

$$0 \leq x_{g,i} \cdot \frac{1}{\eta_{pol}} \leq P_{pol}, \quad (5)$$

kjer je  $P_{pol}$  maksimalna moč polnjenja in je konstantna v vseh urah. Hitrost praznjenja baterij za namen trga prav tako določa omejevalec toka polnilnega mesta, kjer so EV  $g$ -te flote priključeni:

$$0 \leq y_{g,i} \cdot \eta_{pra} \leq P_{pra}, \quad (6)$$

kjer je  $P_{pra}$  maksimalna moč praznjenja, konstantna v vseh urah.

Količina energije, ki je v baterijah EV  $g$ -te flote, ne sme presegati svoje zmogljivosti  $K_{g,i}$  v  $i$ -ti uri:

$$0 \leq \sum_{i=1}^j x_{g,i} \cdot \frac{1}{\eta_{pol}} - \sum_{i=1}^j y_{g,i} \cdot \eta_{pra} - \sum_{i=1}^j V_{g,i} \leq K_{g,i}, \quad (7)$$

$$\forall j=2, \dots, t,$$

kjer je  $V_{g,i}$  poraba za namen vožnje EV  $g$ -te flote.

Kadar EV  $g$ -te flote v  $i$ -ti uri niso priključeni na polnilna mesta, ne morejo sodelovati pri nakupu električne energije za vožnjo in za trženje:

$$x_{g,i} = y_{g,i} = 0. \quad (8)$$

Do ure vožnje ali do ure prodaje električne energije na trgu morajo biti baterije toliko polne, kolikor se porabi za vožnjo in kolikor prodamo na trgu:

$$\sum_{i=1}^j x_{g,i} \cdot \frac{1}{\eta_{pol}} - \sum_{i=1}^j y_{g,i} \cdot \eta_{pra} - \sum_{i=1}^j V_{g,i} \geq 0, \quad (9)$$

$$\forall j=2, \dots, t,$$

Spremenljivke v optimizacijskem algoritmu morajo biti večje ali enake nič, zato podajamo naslednje omejitve:

$$\begin{aligned} x_{g,i} &\geq 0, y_{g,i} \geq 0, \\ \forall i &= 1, \dots, t \end{aligned} \quad (10)$$

V naslednjem poglavju podajamo rezultate združevanja EV v flote in rešitev optimizacijskega problema.

## 4 REZULTATI

Za preizkus predstavljenega optimizacijskega postopka z združevanjem EV v flote smo obravnavali primer 17162 EV z različnimi voznimi navadami. To število EV pomeni 6 odstotkov [6] celotne porabe na izbrani distribuciji. Vozne navade smo določili glede na trenutne vozne navade različnih skupin ljudi (delavci v industriji, v storitvenem sektorju, študenti, upokojenci, poklicni vozniki ipd.) oz. smo vozne navade ljudi definirali naključno glede na trenutne povprečne čase prometnih konic na cestah). Vozne diagrame oz. čase in količine polnjenja smo določili glede na:

- trenutne čase konic na cestah in naključne čase skozi dan (npr. vožnja v trgovske centre, na izlete, ipd.),
- poraba EV, ki je predvidoma 0,1 do 0,2 kWh/km (odvisno od načina vožnje) [1, 2],
- razdalja povprečne vožnje je 30 km za večino ljudi, ki živijo v urbanem naselju, in 60 km za ljudi, ki živijo zunaj urbanega naselja.

Optimizacijski postopek smo preizkusili za en dan na urni osnovi. Pri simulaciji smo uporabili naslednje vhodne podatke in predpostavke.

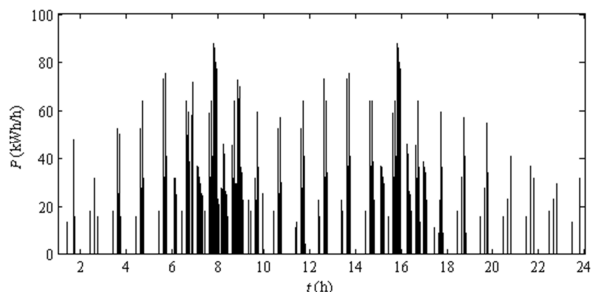
- Hitrost polnjenja definira omejevalec toka z omejitvijo 16 A, torej je hitrost polnjenja okvirno 3,7 kWh/h.
- Zmogljivost baterij EV je 16 kWh, kar pomeni doseg od 80 do 160 km [1, 2].
- Izkoristek polnjenja baterije je 90-odstoten, tudi izkoristek praznjenja baterije v omrežje je 90-odstoten.
- Zmogljivost baterije se ne zmanjšuje skozi čas s polnjenjem in praznjenjem in s tem povezanih stroškov nismo upoštevali.

Predpostavke povezane s stroški vožnje EV, so:

- Strošek vožnje EV je 0,175 EUR/kWh, ki je približna trenutna cena za enotarifni gospodinjski odjem [9]. Marža dobavitelja je zajeta v tej ceni.
- Ves dobiček, ki ga ustvari dobavitelj s sodelovanjem baterij EV na trgu se uporabi izključno za zmanjšanje stroškov uporabnikov EV. S tem naj bi dobavitelj dosegel konkurenčno prednost pred drugimi dobavitelji, t.j. nižje cene energije za vožnjo.
- Prodajna in nakupna cena na urnem trgu sta enaki.
- Na trgu z električno energijo je vedno dovolj ponudb in povpraševanja za energijo, ki se shranjuje v EV.
- Baterija je prazna oz. ima v sebi energijo za prvo uro, če je predvidena vožnja že v prvi uri.

Na sliki 3 podajamo čase priklopov EV na polnilna mesta in količino porabljene električne energije pretekle vožnje. Posamezen stolpec predstavlja čas priklopa in porabljeno količino energije v pretekli vožnji. Na sliki 3 vidimo, da se večina EV vozi med 6 uro in 1 uro ter med 13 in 18 uro, kar je razvidno iz časov priklopa

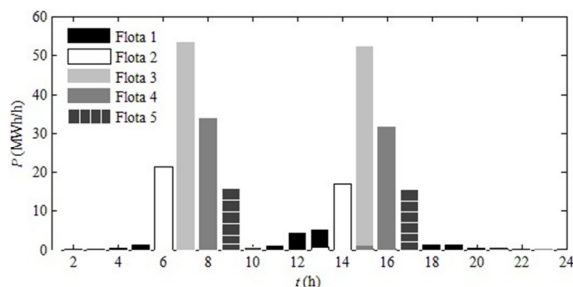
(večja gostota stolpcev v teh urah). Ob tem predpostavimo, da EV takoj priklopimo po končani vožnji. Povprečna poraba EV je 1,6 kWh/h, kar pomeni, da je povprečna vožnja okvirno 16 km v eni vožnji pri avtonomiji 160 km.



Slika 3: Časi priklopov EV na polnilna mesta in količina električne energije, porabljene za vožnjo

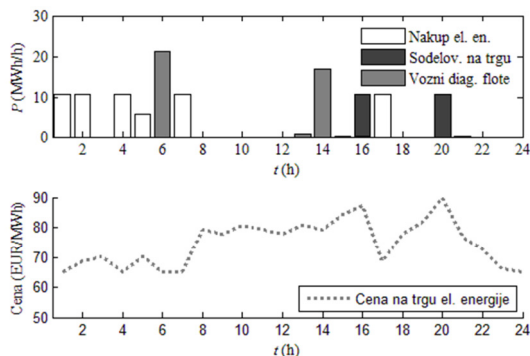
Za poenostavitev optimizacijskega problema združimo EV v flote. Za namen članka smo predpostavili 5 flot, s čimer smo najbolj reprezentativno predstavili podane vozne navade ljudi. Z uporabo metode k-tih povprečij določimo nadomestne vozne diagrame za posamezne flote in količino morebitne shranjene energije EV znotraj flote štejemo kot celoto.

Slika 4 prikazuje primer voznih diagramov flot in količine energije, porabljene za vožnjo celotne flote.



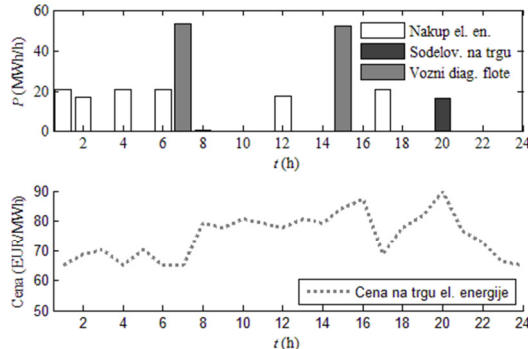
Slika 4: Diagram voznih redov posameznih flot EV

Sliki 5 in 6 prikazujeta rešitev optimizacijskega postopka za primera voznih redov druge flote, ki pomeni vožnjo EV ob 6. in 14. uri, ter tretje flote, ki pomeni vožnjo EV ob 7. in 15. uri.



Slika 5: Optimalno sodelovanje na trgu el. energije druge flote

Z optimizacijskim postopkom tako rekoč vedno zakupimo dovolj energije za vožnjo v jutranjih urah (od 1. do 5. ure, ko je cena najnižja). Večji del EV se v primeru druge flote vozi ob 6. in 14. uri in manjši del ob 13. in 15. uri. Ob 16. in 20. uri vsakič prodali približno 10 MWh energije (omejeno s hitrostjo praznjenja baterij), kjer pa smo za potrebe prodaje energije v uri 20 potrebovali dodaten nakup energije ob 17. uri, slika 5. S sodelovanjem na trgu smo tako pridelali določen prihodek, s katerim zmanjšamo nakupno ceno energije, potrebne za vožnjo flote.



Slika 6: Optimalno sodelovanje na trgu el. energije tretje flote

Flota 3 je po številu EV večja od flote 2 in za vožnjo potrebuje več energije. V urah 1, 2, 4 in 6 kupimo celotno energijo potrebno za vožnjo ob 7. uri in del energije za vožnjo ob 15. uri. V nasprotju s floto 2 ob 16. uri nimamo shranjene odvečne energije v baterijah, ki bi jo lahko prodali na trgu. Tako flota 3 sodeluje na trgu le ob 20. uri, ko smo potrebovali dodaten nakup energije ob 17. uri, slika 6.

V tabeli 1 podajamo rezultate stroškov vožnje EV in dobiček, ki ga ustvari dobavitelj s sodelovanjem EV na trgu glede na rezultate optimizacijskega postopka. Dodatno prikazujemo zmanjšanje stroškov voznikov EV zaradi uporabe njihovih baterij za trženje.

Flota 1 ima najmanjše zmanjšanje stroškov na EV, saj v tej floti EV vozijo ves dan in se baterije ne morejo napolniti do takšne mere, da bi bilo smiselno trgovati. Flota 2, 4 in 5 imajo največje zmanjšanje stroškov, saj so EV v času najvišjih cen razpoložljivi oz. imajo dovolj časa, da baterije napolnimo za sodelovanje na trgu. Ker v primeru flote 3 izrabimo tako rekoč vso energijo za vožnjo, je dobiček za en EV manjši kot v primerih flote 2, 4 in 5 (vozniki v floti 3 delajo večje razdalje pri vožnji). Floti 4 in 5 se razlikujeta po tem, da v primeru flote 5 ne moremo izvesti dodatnega nakupa ob 17. uri za sodelovanje na trgu ob 20. uri, ko se cena energije močno zvišajo, saj se EV se v pri floti 5 takrat v veliki meri vozijo.

Tabela 1: Stroški vožnje EV za posamezno floto

Flota EV		1	2	3	4	5
Število EV		1529	2889	5607	4928	2209
Povp. porabljena energija za namen vožnje na dan (kWh)		3,54	7,24	5,01	5,24	4,74
Stroškov vožnje (EUR/dan)		0,63	1,27	0,88	0,92	0,83
Dobiček enega EV zaradi sodelovanja na trgu (EUR/dan)		0,02	0,06	0,028	0,046	0,04
Zmanjšanje stroškov vožnje zaradi sodelovanja na trgu (%)		3,17	4,73	3,2	5,02	4,82

Tako s sodelovanjem na trgu pridelamo določen prihodek in posledično znižajo nakupno ceno energije, potrebne za vožnjo flote. Tako imajo vozniki vseh flot nižje stroške za vožnjo zaradi sodelovanja na trgu.

## 5 UGOTOVITVE

Z razvojem tehnologij EV in aktivnih omrežij bodo lahko EV sodelovali na trgu z električno energijo, kjer bodo baterije EV dobavitelji oz. operaterji uporabljali kot skupen shranjevalnik električne energije.

V članku predstavljamo optimizacijski algoritem polnjenja in praznjenja EV za maksimizacijo prihodka dobavitelja, kar bi posledično za uporabnike EV pomenilo manjše stroške vožnje. Zaradi poenostavitve optimizacijskega postopka je ideja posamezne EV združiti v večje flote s podobnimi voznimi navadami, s čimer dosežemo konstantno število spremenljivk v optimizacijskem postopku. Za združevanje voznih redov EV v flote smo zato uporabili metodo k-tih povprečij.

Na podlagi izdelanih voznih redov flot EV algoritem določi optimalno polnjenje oz. praznjenje baterij s sodelovanjem na trgu z električno energijo. Kot rešitev dobimo optimalne čase nakupa električne energije za vožnjo in sodelovanje na trgu. Rezultati podajajo zmanjšanje stroškov vožnje EV za voznike, kjer so opazne razlike zmanjšanja stroškov glede na floto. Te se med seboj ločujejo glede na način in uro vožnje. Na podlagi rezultatov za podani primer smo ugotovili, da je dobiček enega EV od 0,02 EUR/dan do 0,06 EUR/dan glede na različne flote in cene na trgu, kar pomeni okvirno od 3-% do 5-% zmanjšanje stroškov vožnje EV.

V članku smo podali deterministični način reševanja podanega optimizacijskega problema, v nadaljevanju pa bomo problem razširili na verjetnostni problem in proučili različne načine združevanja EV v flote ter možnost sodelovanja EV na različnih trgih z električno energijo in medsebojne izmenjave energije med posameznimi flotami, s čimer se dobavitelj izogne različnim maržam na trgih.

## LITERATURA

- [1] Shortt, A.; O'Malley, M., Impact of optimal charging of electric vehicles on future generation portfolios, Sustainable Alternative Energy, 2009 IEEE PES/IAS Conference on, 2009
- [2] Tomic J., Kempton W., Using fleets of electric-drive vehicles for grid support, Journal of Power Sources, Volume 168, Issue 2, 2007
- [3] Acha, Salvador; Green, Tim C.; Shah, Nilay, Effects of optimised plug-in hybrid vehicle charging strategies on electric distribution network losses, Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES, 2010
- [4] K. Capion, Optimized charging of electric drive vehicles in a market environment, magistrsko delo, Technical University of Denmark, Danska, 2009.
- [5] Mets, K.; Verschueren, T.; Haerick, W.; Devellder, C.; De Turck, F.; Optimizing smart energy control strategies for plug-in hybrid electric vehicle charging, Network Operations and Management Symposium Workshops, 2010 IEEE/IFIP 2010
- [6] Zelena knjiga za NEP Slovenije, Posvetovalni dokument za javno obravnavo, 2009
- [7] Bradley T.H., Quinn C. W., Analysis of plug-in hybrid electric vehicle utility factors, Journal of Power Sources, Vol. 195, Issue 16, 2010.
- [8] Anders, G. J., Probability Concepts in Electric Power Systems, 1990.
- [9] Javna agencija RS za energijo <http://www.agen-rs.si/sl/>.

**Damir Imširović** je diplomiral leta 2009 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Trenutno je zaposlen kot raziskovalec v Laboratoriju za elektroenergetske sisteme na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani.

**Matej Rejc** je diplomiral leta 2007 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Trenutno je zaposlen kot asistent v Laboratoriju za elektroenergetske sisteme na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani.

**Miloš Pantoš** je diplomiral leta 2001 in doktoriral leta 2005 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Trenutno je zaposlen kot izredni profesor v Laboratoriju za elektroenergetske sisteme na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani.