Ocena potenciala implicitne prožnosti električnih vozil v Sloveniji

Jerneja Bogovič[1], Marko Kolenc[2], Miloš Pantoš[1]

[1] Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana
[2] ELES, d. o. o., Hajdrihova ulica 2, 1000 Ljubljana
E-pošta: jerneja.bogovic@fe.uni-lj.si

Assessment of the potential of implicit flexibility of electric vehicles in Slovenia

Abstract. *The growing number of electric vehicles (EVs) increases electricity consumption while also providing potential for demand-side flexibility. Therefore, this paper assesses the implicit flexibility potential of EVs in Slovenia. The assessment is based on a survey of 70 EV owners, who provided information on charging power, daily driving distance and the periods in which they usually charge their vehicles. For each respondent, the flexibility potential was calculated by considering the extent to which charging is currently adjusted to price signals and the probability of charging within a specific time window.*

The results show that the flexibility potential varies considerably throughout the day. The average flexibility potential per EV is estimated at 35 W on weekday mornings, 90 W on weekday afternoons, 891 W at night and 366 W during weekends. Based on approximately 24,500 EVs registered in Slovenia at the beginning of 2026, the total potential ranges from about 1 MW on weekday mornings to 22 MW at night. Assuming unchanged charging patterns and price signals, the night-time potential could reach 142 MW by 2030 and 477 MW by 2040. The results confirm that, in addition to technical characteristics, user behaviour must also be considered when assessing EV flexibility potential.

1 Uvod

Ker je Evropska unija (EU) elektrifikacijo prometa predstavila kot enega izmed ukrepov za zmanjšanje emisij toplogrednih plinov in odvisnosti od fosilnih goriv, število električnih vozil (EV) v EU narašča. Pri tem Slovenija ni nobena izjema, saj EV že sedaj predstavljajo pomemben del voznega parka. Nadaljnja rast števila EV pa je predvidena tudi v posodobljenem dokumentu Nacionalni energetski in podnebni načrt (NEPN). Poleg elektrifikacije prometa se krepi tudi elektrifikacija ogrevanja, kar povečuje porabo električne energije. Posledično se zato povečuje tveganje za nastanek preobremenitev in prezasedenosti v elektroenergetskem sistemu (EES). Tveganje pa je mogoče omejevati bodisi z investicijami v nadgradnjo sistema bodisi s prilagajanjem odjema oz. prožnostjo porabe [1].

Pri tem predstavljajo EV enega izmed perspektivnejših virov prožnosti, saj je polnjenje baterije ločeno od dejanske uporabe vozila [2], [3], visok tehnični potencial pa izhaja iz velike priključne moči in kapacitete baterij [4]. Vendar pa visok tehnični potencial še ne pomeni tudi dejanskega. Ta je odvisen predvsem od vedenja uporabnikov, pripravljenosti na prilagajanje in dejanskega priklopa vozil na omrežje ter ustreznega finančnega nadomestila [5]. Aktivacija prožnosti se pri tem lahko izvede implicitno, na podlagi cenovnih signalov (dinamične tarife, tarife, vezane na čas uporabe) ali eksplicitno, kot daljinsko voden odziv na stanje na trgu ali potrebe sistema, podprt s finančnimi spodbudami [6]. Ker slednja možnost zahteva kar nekaj vlaganj v infrastrukturo ter ovrednotenje pogodbenih razmerij, predstavlja implicitna aktivacija najpreprostejšo obliko aktivacije, pri čemer pa je obseg le-te neznan. Ker lastniki EV del implicitne prožnosti predstavljajo že danes, ko čas polnjenja prilagajajo nižjim cenam električne energije ter omrežnine, s tem predstavljajo izhodiščni potencial implicitne prožnosti EV [7], [8], [9].

V literaturi je metodologija za izračun trenutnega potenciala implicitne prožnosti opisana v [10], [11], [12] in temelji predvsem na privzetih tehničnih karakteristikah naprav, vedenjski vzorci pa so pridobljeni na podlagi anketiranja ali na podlagi analize porabe posameznega odjemalca. Ker se tudi nekatere tehnične karakteristike, ki so pomembne za oceno potenciala prožnosti EV med odjemalci razlikujejo, je v prispevku obstoječa metodologija nadgrajena z uporabo podatkov iz ankete.

Namen prispevka je na podlagi anketiranja oceniti trenutni potencial implicitne prožnosti EV v Sloveniji po različnih časovnih oknih. Trenutni potencial prožnosti je pri tem izražen kot povprečna moč polnjenja, ki jo je mogoče v posameznem časovnem obdobju prilagoditi oziroma časovno prestaviti ob upoštevanju trenutnih navad, uporabe in polnjenja EV. Pri tem je v prvem koraku narejen izračun za posamezno vozilo. V naslednjem koraku pa je narejen preračun na raven celotne Slovenije glede na trenutno število EV, za prihodna leta pa na podlagi projekcij.

2 Metodologija

Metodologija za izračun trenutnega potenciala implicitne prožnosti EV temelji na podatkih, pridobljenih z anketiranjem, ki predstavlja sistematično metodo zbiranja podatkov o značilnostih, vedenju, stališčih in željah anketirancev.

V okviru anketnega vprašalnika smo za potrebe ocene trenutnega potenciala prožnosti lastnike EV spraševali:

- kako pogosto prilagajajo polnjenje cenovnim signalom,
- v katerih od naštetih časovnih oken najpogosteje polnijo EV,
- s kakšno močjo najpogosteje polnijo EV ter
- kakšna je povprečna dnevna prevožena razdalja z EV.

Na podlagi enačbe (1) smo rezultate ankete pretvorili v kvantitativno oceno trenutnega potenciala prožnosti EV v različnih časovnih oknih t (delavnik dopoldan (6.00-14.00), delavnik popoldan (14.00-22.00), delavnik ponoči (22.00-6.00) in vikend).

$$P_{t,i} = P_p \cdot s \cdot \alpha_t \tag{1}$$

Pri tem P_p predstavlja moč polnjenja EV v kW, s faktor trenutnega prilagajanja polnjenja EV, α_t pa faktor sočasnosti polnjenja EV v t-tem časovnem oknu. Faktor trenutnega prilagajanja s je odvisen od odgovora na anketno vprašanje o tem, ali lastnik EV že prilagaja polnjenje EV glede na cenovne signale in ima vrednost med 0 in 1. Pri tem vrednost 0 pomeni, da uporabnik polnjenja ne prilagaja cenovnim signalom, vrednost 1 pa, da ga prilagaja večino časa. Faktor sočasnosti uporabe α_t pa predstavlja verjetnost, da se EV polni v posameznem časovnem oknu. Tudi v tem primeru je vrednost faktorja omejena na interval med 0 in 1 ter se za vsako časovno okno izračuna po enačbi (2).

$$\alpha_t = \frac{\frac{l \cdot \Phi}{P_p}}{T_o} \tag{2}$$

Pri tem l predstavlja povprečno dnevno prevoženo razdaljo EV v km, Φ povprečno porabo električne energije EV v kWh/km, P_p moč polnjenja EV v kW in T_o trajanje posameznega časovnega okna v urah.

Iz ocene potenciala prožnosti anketiranih lastnikov EV sledi izračun povprečnega potenciala prožnosti po enačbi (3).

$$\bar{P}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} P_{t,i} \tag{3}$$

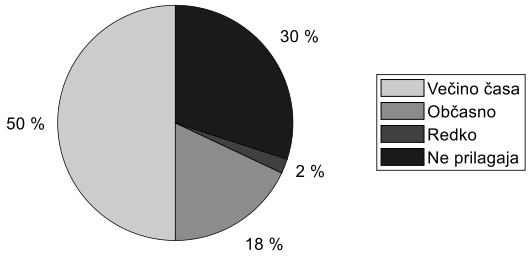
Pri tem $P_{t,i}$ predstavlja moč prožnosti i-tega lastnika EV v posameznem oknu t in N število vseh anketiranih lastnikov EV, tudi tistih, ki polnjenja ne prilagajajo ali EV v posameznem časovnem oknu ne polnijo.

Ocena trenutnega potenciala prožnosti na ravni države po posameznih časovnih oknih pa se izračuna po enačbi (4) kot produkt povprečnega potenciala $\bar{P}_t$ in števila vseh EV v Sloveniji n.

$$P_{SLO,t} = n \cdot \bar{P}_t \tag{4}$$

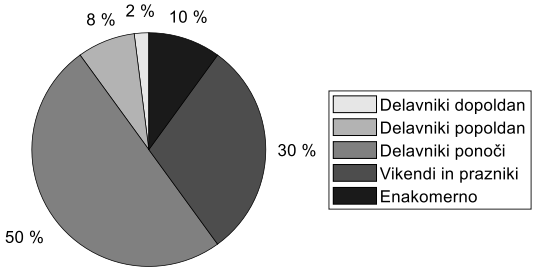
3 Rezultati

V okviru anketiranja je anketni vprašalnik izpolnilo 70 anketirancev, ki so navedli lastništvo EV (N = 70). Pri tem 68 % lastnikov občasno ali večino časa prilagaja polnjenje EV različnim signalom, 2 % redko, 30 % pa polnjenja ne prilagaja, kar je prikazano tudi na sliki 1.



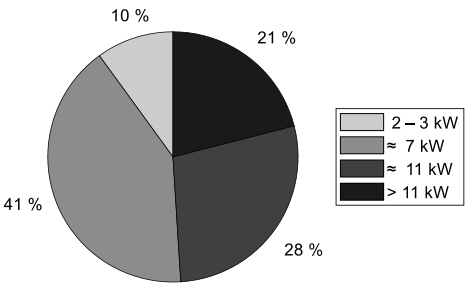
Slika 1. Pogostost prilagajanja polnjenja EV cenovnim signalom

Nadalje polovica odjemalcev navaja, da polnjenje izvaja med delavniki ponoči, 30 % med vikendi in prazniki, preostalih 20 % pa izvaja polnjenje med delavniki dopoldan ali popoldan ali enakomerno čez teden (slika 2).



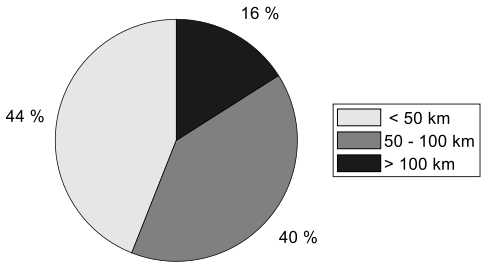
Slika 2. Časovna okna najpogostejšega polnjenja EV

Večina lastnikov EV vozila polni doma, tretjina pa se poslužuje polnjenja v službi ali na javnih polnilnicah. Pri polnjenju doma anketirani lastniki EV najpogosteje navajajo, da polnijo z močjo okoli 7 kW, pri polnjenju v službi ali na javnih polnilnicah pa so moči polnjenja višje, tj. 11 kW ali več. Slika 3 prikazuje najpogostejšo moč polnjenja EV, pri čemer 10 % lastnikov polni z močjo med 2 in 3 kW, 41 % z močjo okoli 7 kW, 28 % z okoli 11 kW, 21 % pa z močjo, višjo od 11 kW.



Slika 3. Najpogostejša moč polnjenja EV

Na sliki 4 pa so prikazani odgovori na vprašanje o povprečni dnevni prevoženi razdalji z EV. 44 % anketiranih je odgovorilo, da prevozijo manj kot 50 km, 40 % anketiranih prevozi z EV med 50 in 100 km dnevno, 16 % pa z EV povprečno prevozi več kot 100 km dnevno. Po rezultatih ankete povprečna dnevna prevožena razdalja, ki jo anketiranci naredijo s svojim EV, znaša okoli 61 km. Dobljena vrednost je nekoliko višja, vendar primerljivega velikostnega reda kot je za slovenska EV privzeta v [13].



Slika 4. Povprečna dnevna prevožena razdalja z EV

Z uporabo rezultatov ankete je bil po enačbi (1) izveden izračun ocene trenutnega potenciala implicitne prožnosti posameznega lastnika EV po časovnih oknih. Vrednosti so za vse anketirane odjemalce po različnih časovnih oknih prikazane v obliki histograma na sliki 5. Iz slike je razvidno, da je pri večini anketiranih lastnikov EV trenutni potencial implicitne prožnosti v dopoldanskem in popoldanskem času med delavniki zelo majhen ali enak nič. Rezultat je pričakovan, saj so vozila v tem času pogosto v uporabi ali pa niso priključena na polnilno mesto. Na drugi strani pa je bistveno več potenciala prožnosti na voljo med delavniki ponoči ter med vikendi. V teh primerih ocenjeni trenutni potencial prožnosti posameznega lastnika EV znaša tudi nekaj kW.

Na podlagi trenutne implicitne prožnosti anketiranih lastnikov EV po posameznem časovnem oknu je v naslednjem koraku sledil izračun povprečne vrednosti trenutnega potenciala implicitne prožnosti EV po posameznih časovnih oknih. Povprečni potencial prožnosti EV med delavniki dopoldan tako znaša le okoli 35 W. Relativno majhen je tudi med delavniki popoldan, ko znaša okoli 90 W. Potencial med vikendi znaša 366 W in je tako več kot desetkrat večji kot med delavniki dopoldan, največji pa je med delavniki ponoči, ko znaša 891 W. Vrednosti so podane tudi v tabeli 1.

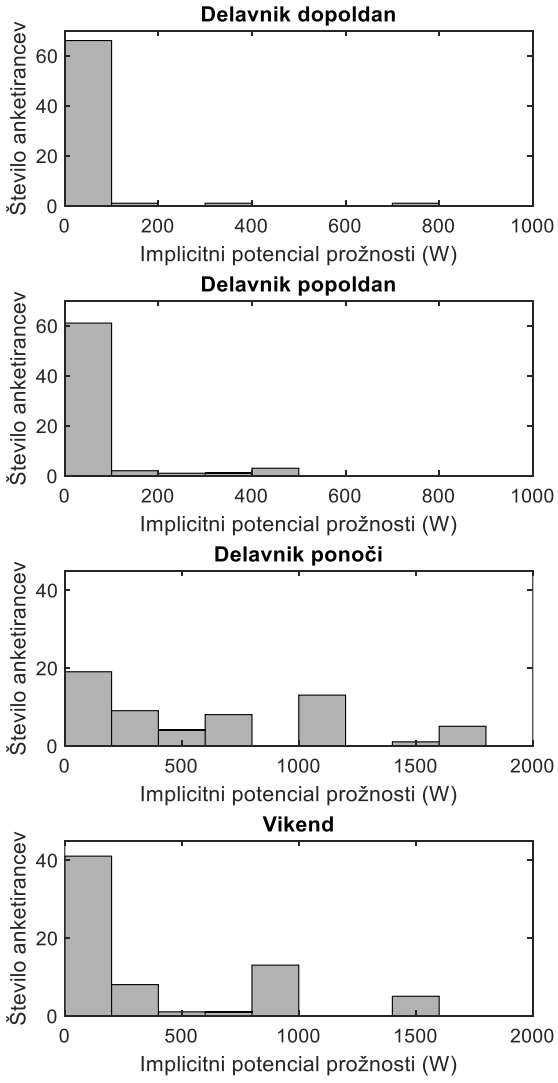
Tabela 1: Povprečni trenutni potencial implicitne prožnosti posameznega EV

Časovno okno	$\overline{P}_t$ **(W)**
Delavnik dopoldan	35
Delavnik popoldan	90
Delavnik ponoči	891
Vikend	366

Ob upoštevanju dejstva, da je bilo v začetku leta 2026 v Sloveniji registriranih približno 24.500 EV, smo na podlagi povprečnega trenutnega potenciala implicitne prožnosti izračunali skupni trenutni potencial implicitne prožnosti na ravni Slovenije po posameznih časovnih oknih. Največji potencial se pojavi v nočnem času in znaša 22 MW. V dopoldanskem in popoldanskem času je potencial bistveno manjši, in sicer približno 1 MW oziroma 2 MW, ocenjeni potencial med vikendi pa znaša približno 9 MW (tabela 2).

Tabela 2: Skupni trenutni potencial implicitne prožnosti EV na ravni Slovenije

Časovno okno	$P_{SLO,t}$ **(MW)**
Delavnik dopoldan	1
Delavnik popoldan	2
Delavnik ponoči	22
Vikend	9



Slika 5. Trenutni potencial implicitne prožnosti anketiranih lastnikov EV po različnih časovnih oknih

Zaradi pričakovane rasti števila EV je mogoče pričakovati, da bo naraščal tudi potencial implicitne prožnosti EV. Ob predpostavki, da ostaja uporaba električnega vozila enaka kot danes in da ne pride do sprememb v cenovnih signalih, bi ocenjeni potencial prožnosti po scenariju NEPN za leto 2030 ob 160.000 EV znašal od 6 MW v dopoldanskem času do 142 MW v nočnem času. Leta 2040 pa bi pri 535.000 EV znašal od 18 MW v dopoldanskem času do 477 MW v nočnem času.

4 Zaključek

Rezultati potrjujejo izhodiščno predpostavko, da EV v Sloveniji že danes predstavljajo pomemben potencial implicitne prožnosti, ki pa ni enakomerno razporejen čez dan. Največji potencial je na voljo ponoči, ko povprečni potencial posameznega EV znaša 891 W, na ravni Slovenije pa približno 22 MW. Med delavniki dopoldan in popoldan je potencial bistveno manjši in znaša le okoli 1 oz. 2 MW. To se sklada tudi z rezultati ankete, saj so EV v teh dveh časovnih oknih pogosteje v uporabi in zato niso priključena na omrežje. Ugotovitve tako potrjujejo, da dejanskega potenciala prožnosti EV ni mogoče oceniti zgolj na podlagi števila EV in nazivne moči polnjenja. Realnejšo oceno pridobimo z upoštevanjem vedenjskih vzorcev lastnikov EV ter odzivnosti lastnikov EV na cenovne signale.

Dobljeni rezultati so primerljivi z ugotovitvami predhodne raziskave o prožnosti EV v ZDA [10], ki prav tako največji potencial prožnosti ugotavlja v nočnem času, ko EV večinoma niso v uporabi, najmanjšega pa v dopoldanskem času. Do razhajanja pri rezultatih pa prihaja pri oceni potenciala prožnosti v popoldanskem času. V [10] je potencial EV v popoldanskem času primerljiv s potencialom v nočnem času. V okviru naše raziskave pa je potencial bistveno manjši in bližje vrednostim potenciala v dopoldanskem času. Razlog za to je na eni strani moč iskati v nezmožnosti polnjenja zaradi uporabe EV v popoldanskem času. Drugi možni razlog za razhajanje pa je v cenovnih signalih, ki so v Sloveniji v popoldanskem času enaki kot v dopoldanskem času in višji kot ponoči, zaradi česar lastniki EV ne izvajajo polnjenja v popoldanskem času, razen kadar je to nujno.

Pomemben prispevek raziskave je ocena trenutnega potenciala implicitne prožnosti EV, ki poleg tehničnih značilnosti upošteva tudi vedenje uporabnikov. Rezultati raziskave predstavljajo izhodišče za upoštevanje prožnosti EV kot referenčno tehnologijo v okviru ocene potreb po prožnosti. Nadalje pa so rezultati raziskave uporabni tudi za načrtovanje cenovnih signalov, s katerimi bi lahko aktivirali potencial implicitne prožnosti EV za potrebe razbremenjevanja EES.

Nadaljnje raziskovanje v smeri potenciala prožnosti EV bi bilo smiselno nadgraditi z uporabo dejanskih merilnih podatkov o polnjenju EV ter oceniti potencial prožnosti EV za krajše časovne intervale.

Zahvala

To delo sta sofinancirala Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS) v sklopu programske skupine Elektroenergetski sistemi, P2-356 in podjetje ELES, d.o.o.

Literatura

[1] L. Göke, J. Weibezahn, in M. Kendziorski, »How flexible electrification can integrate fluctuating renewables«, *Energy*, let. 278, str. 127832, sep. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127832.

[2] Å. L. Sørensen, K. B. Lindberg, I. Sartori, in I. Andresen, »Analysis of residential EV energy flexibility potential based on real-world charging reports and smart meter data«, *Energy and Buildings*, let. 241, str. 110923, jun. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110923.

[3] F. Gonzalez Venegas, M. Petit, in Y. Perez, »Plug-in behavior of electric vehicles users: Insights from a large-scale trial and impacts for grid integration studies«, *eTransportation*, let. 10, str. 100131, nov. 2021, doi: 10.1016/j.etran.2021.100131.

[4] »Analiza stanja na področju elektromobilnosti in dvosmerne izmenjave električne energije (V2G)«. Pridobljeno: 20. april 2026. [Na spletu]. Dostopno na: https://www.agen-rs.si/documents/10926/31355/AnalizaStanjaV2G_20250707_Final_V1.1.pdf/3e80a0c3-becb-4e05-8908-0b7559e0d868

[5] M. Shariatzadeh, M. A. R. Lopes, in C. Henggeler Antunes, »Electric vehicle users' charging behavior: A review of influential factors, methods and modeling approaches«, *Applied Energy*, let. 396, str. 126167, okt. 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2025.126167.

[6] T. Marentič, D. Golubović, A. Kos, A. Smole, in M. Zajc, »Sodelovanje električnih vozil v lokalnih storitvah prožnosti: ocena potenciala prožnosti za izbrani primer uporabe tehnologij V2X«, 2025.

[7] C. Birk Jones *idr.*, »Impact of Electric Vehicle customer response to Time-of-Use rates on distribution power grids«, *Energy Reports*, let. 8, str. 8225–8235, nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.06.048.

[8] F. Daneshzand, P. J. Coker, B. Potter, in S. T. Smith, »EV smart charging: How tariff selection influences grid stress and carbon reduction«, *Applied Energy*, let. 348, str. 121482, okt. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121482.

[9] S. Limmer, »Dynamic Pricing for Electric Vehicle Charging—A Literature Review«, *Energies*, let. 12, št. 18, str. 3574, jan. 2019, doi: 10.3390/en12183574.

[10] M. Afzalan in F. Jazizadeh, »Residential loads flexibility potential for demand response using energy consumption patterns and user segments«, *Applied Energy*, let. 254, str. 113693, nov. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113693.

[11] B. Berg *idr.*, »Occupant-driven end use load models for demand response and flexibility service participation of residential grid-interactive buildings«, *Journal of Building Engineering*, let. 96, str. 110406, nov. 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2024.110406.

[12] A. Sridhar *idr.*, »Toward residential flexibility—Consumer willingness to enroll household loads in demand response«, *Applied Energy*, let. 342, str. 121204, jul. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121204.

[13] I. Mendek, T. Marentič, K. Anžur, in M. Zajc, »A Case Study on Electric Vehicles as Nationwide Battery Storage to Meet Slovenia's Final Energy Consumption with Solar Energy«, *Energies*, let. 17, št. 11, str. 2733, jan. 2024, doi: 10.3390/en17112733.