

OBRATOVALNA ZMOGLJIVOST AVTOMATIZIRANEGA OBDELOVANJA KMETIJSKIH POVRŠIN PRI SPREMEN- LJIVI RAZPOLOŽLJIVOSTI SOLARNE ENERGIJE V RAZLIČNIH ČASOVNIH OBDOBJIH

Domen Šeruga, Primož Poredoš, Dominik Kozjek, Aleš Gosar, Marko Nagode, Jernej Klemenc

Izvleček:

Trajnostno obdelavo urbanih kmetijskih površin bomo lahko v prihodnosti dosegli z uporabo avtomatiziranih flot obdelovalnih robotov, ki bodo zmožne svojo dejavnost prilagajati razpoložljivosti solarne energije. Ker se ta vir energije spreminja glede na letni čas, je pri snovanju napajalnih sistemov in algoritmov za delovanje robotov ključno upoštevati več dejavnikov. V okviru študije smo analizirali vpliv razpoložljive sončne energije v Ljubljani na napajanje izbranega Li-ionskega baterijskega paketa. Ta je vseboval 7 celic s kapaciteto 20 Ah in nominalno napetostjo 24 V, kar bi zadoščalo za približno 4 ure obratovanja pri moči 100 W. Rezultati kažejo, da se v oblačnem januarskem dnevu pri izbrani velikosti fotovoltaičnih panelov lahko napolni le en baterijski paket, v jasnem januarskem dnevu pa število možnih polnjenj naraste na 20. Jasen junijski dan pri isti velikosti fotovoltaičnih panelov omogoči polnjenje kar 55 baterijskih paketov. Za uspešno avtomatizacijo je torej ključno poznavanje vseh vplivnih dejavnikov, saj nihanja razpoložljive solarne energije neposredno vplivajo na zmogljivost flote obdelovalnih robotov.

Ključne besede:

obratovanje, avtomatizacija, Li-ionske baterije, sončna energija, fotovoltaični paneli

1 Uvod

Zelene skupnosti prihodnosti predstavljajo vizijo urbanega sobivanja, ki temelji na trajnostnem delovanju, tehnološki naprednosti in povezanosti z naravo [1–5]. Njihov razvoj izhaja iz potrebe po oblikovanju prostorov, ki poleg zmanjševanja okoljskega odtisa tudi izboljšujejo kakovost življenja prebivalcev. Ključ do takšnega sobivanja je v sodelovalnem

načrtovanju, kjer lokalne oblasti, prebivalci, podjetja in nevladne organizacije soustvarjajo strategije za trajnostni razvoj mest. S pomočjo smernic, kot jih ponuja mednarodni standard SIST EN ISO 37101 [6], se krepi odgovorno upravljanje mestnih okolij, ki upoštevajo socialne, okoljske in gospodarske vidike.

Pomemben gradnik zelenih skupnosti je vključevanje naravnih elementov v urbano strukturo, saj drevesa, vrtovi in ostale zelene površine ne vplivajo le na estetsko vrednost, temveč tudi izboljšujejo kakovost zraka, uravnavajo temperaturo in prispevajo k ohranjanju biotske pestrosti. Vključevanje pametnih tehnologij v skupnosti omogoča optimiranje upravljanja virov predvsem z uporabo obnovljivih virov energije ter rešitev za nadzor porabe. Zanimiv izziv zelenih skupnosti prihodnosti predstavlja uporaba flot avtomatiziranih obdelovalnih robotov, ki bi s pomočjo recikliranih baterijskih paketov obdelovale javne površine in skrbele za njihovo vzdrževanje.

Izr. prof. dr. Domen Šeruga, univ. dipl. inž., doc. dr. Primož Poredoš, univ. dipl. inž., doc. dr. Dominik Kozjek, univ. dipl. inž., dr. Aleš Gosar, prof. dr. Marko Nagode, univ. dipl. inž., prof. dr. Jernej Klemenc, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



© The Authors 2025. CC-BY 4.0

<https://doi.org/10.5545/Ventil-31-2025-5.11>

vanje. Takšna tehnološka nadgradnja bi spodbudila iskanje inovativnih rešitev za proizvodnjo, pretvorbo in shranjevanje energije v pogojih, ki so odvisni od naravnih virov. Obstajajo že primeri dobre prakse, kjer je življenjska doba baterijskih paketov, prvotno namenjenih uporabi v transportnih sredstvih, podaljšana z uporabo v stacionarnih aplikacijah za pokrivanje energijskih potreb zelenih skupnosti [7].

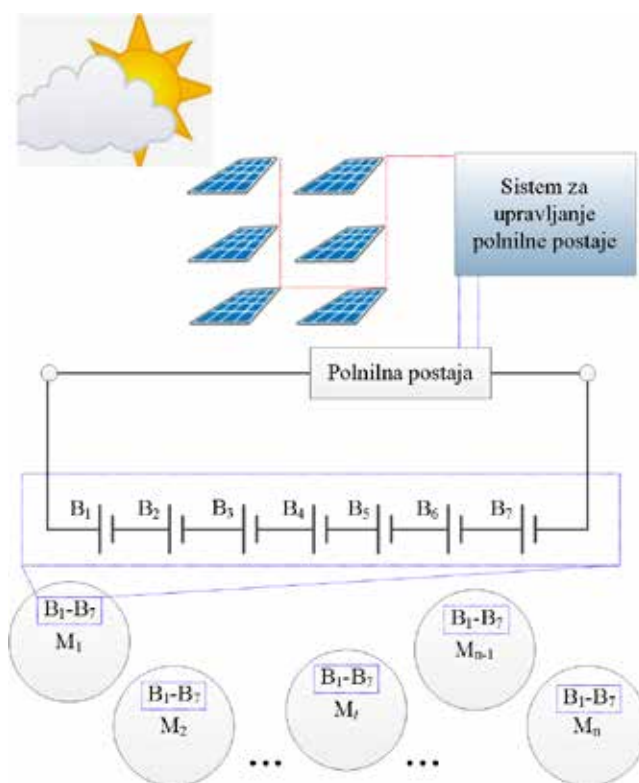
Zelene skupnosti prihodnosti je možno predstaviti tudi kot eksperimentalna okolja, kjer se prepletajo znanost, izobraževanje, civilna družba in lokalna politika [1–3]. S podporo programov partnerstev v okviru organizacije UNESCO [4] ter strategije Evropske komisije [5] se krepi pomen lokalnih rešitev za globalne izzive. Zelene skupnosti torej niso samo možen odgovor na podnebne spremembe, temveč postajajo simbol prostorov, kjer bi tehnologija lahko služila naravi ter ljudem in kjer bi prebivalci lahko soustvarjali pogoje za zdravo, vključujoče in odporno življenje.

Študija v prispevku predstavlja nadaljevanje začetne analize razmer polnjenja in praznjenja baterij obdelovalnih robotov v urbanem prostoru Ljubljane, pri čemer smo zajeli tri ločena časovna obdobja in štiri značilne oblike njihovega delovanja [8]. Dodatno smo analizirali vpliv zamika polnjenja baterijskih paketov, kar se izkaže za najbolj vpliven parameter pri uporabi solarne energije.

2 Metoda

Uporabili smo Li-ionski tip baterijske celice LiNiMn-CoO₂ (NMC) z nazivno kapaciteto 70 Wh ter napekostnim razponom med 3.0 V v izpraznjenem stanju in 4.15 V v povsem napolnjenem stanju [9–11]. Na tej osnovi je bil baterijski paket sestavljen iz sedmih zaporedno vezanih celic B₁–B₇, kar proizvede nazivno napetost 24 V, čeprav se napetostni razpon nekoliko spreminja glede na napolnjenost, in kapaciteto okrog 500 Wh (Slika 1).

V analizi smo predpostavili, da ima vsak robot v obdelovalni floti nameščen tak baterijski paket, ki omogoča njegovo premikanje in izvajanje operativnih nalog. Definirali smo tri tipične polnilne karakteristike fotovoltaičnih panelov glede na tri različne vremenske pogoje. Obravnavali smo oblačen januarski dan (min januar), jasen januarski dan (max januar) in jasen junijski dan (max junij). Da bi lahko zagotovili ravno dovolj energije za polnjenje 1 paketa v najslabših polnilnih pogojih (min januar), smo dimenzionirali solarno napajanje z vzporedno vezavo 6 fotovoltaičnih panelov. V ostalih vremenskih pogojih (max januar in max junij) se je nato glede na razpoložljivo solarno energijo čas polnjenja ustrezno skrajšal. Najkrajši razpoložljiv čas za delovanje fotovoltaičnih panelov na izbrani lokaciji v okolici mesta Ljubljana je namreč 10 ur v januarju, junija pa je časa za polnjenje baterijskih paketov z



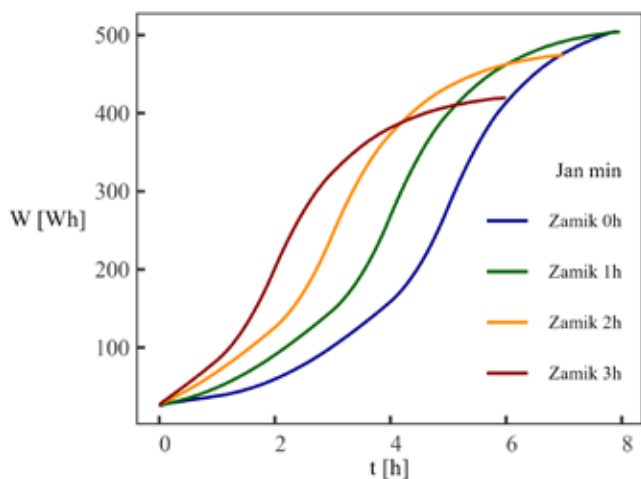
Slika 1 : Solarno napajanje baterijski paket B₁–B₇ za zagotavljanje energije flote obdelovalnih robotov M_i; $i = 1, \dots, n$ [8]

uporabo fotovoltaičnih panelov okrog 16 ur. V vseh preostalih delih leta je časa za polnjenje med 10 in 16 urami. Če bi torej izbrali oblačen junijski dan, bi bila polnilna karakteristika fotovoltaičnih panelov med krivuljami za oblačen januarski in jasen junijski dan.

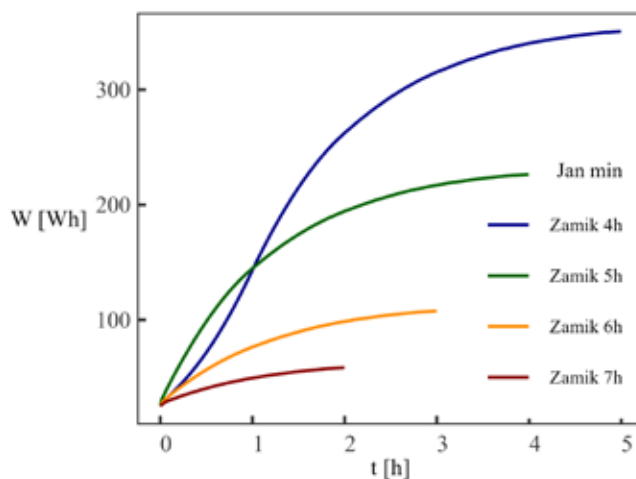
Najbolj vpliven faktor sistema, ki vpliva na čas polnjenja enako velikih baterijskih paketov, je zamik začetka polnjenja od sončnega vzhoda. Glede na zamik polnjenja z izbranim korakom $\Delta t = 1$ h smo torej najprej analizirali polnilne karakteristike baterijskega paketa. Povprečni porabi posameznega obdelovalnega robota velikosti 100 W (Slika 1), ki vključuje premikanje po obdelovalnih tleh in koristno delo, smo dodali še tipične praznilne karakteristike za 200, 400 in 700 W. 200 W moči vključuje premikanje in obdelovanje bolj zahtevnih tal. 400 W porabe zahteva obdelovalni robot pri obdelovanju najzahtevnejšega terena brez premikanja, najvišjo porabo pa predstavlja samo premikanje po zelo zahtevnem terenu.

3 Rezultati in diskusija

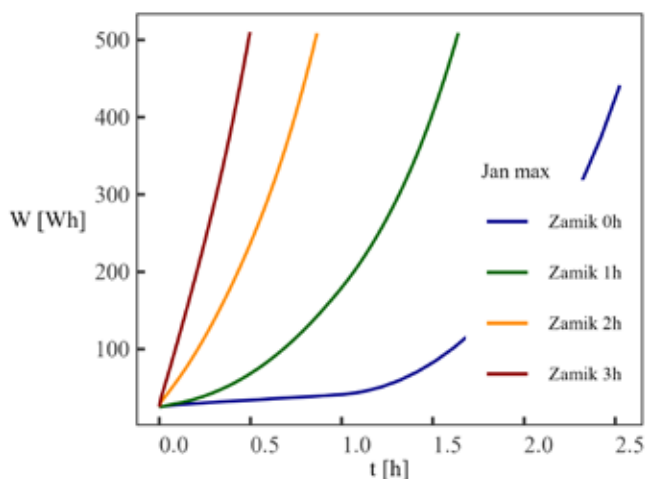
Rezultati simuliranih polnilnih časov glede na različne vremenske pogoje in zamike začetka polnjenja baterijskih paketov so zbrani na Slikah 2–8. Predpostavka simulacij je, da lahko baterijske pakete polni-



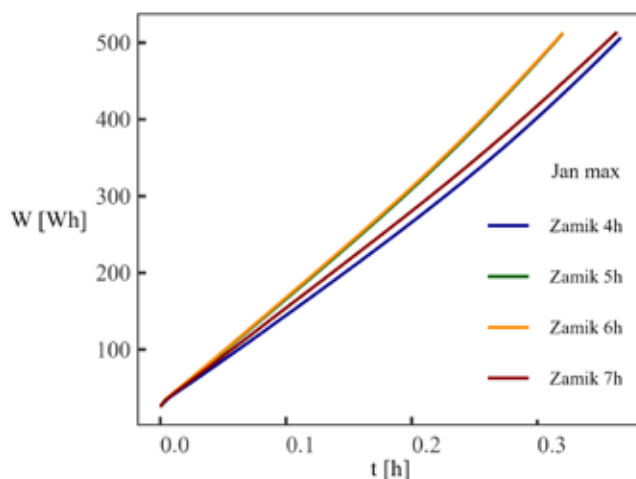
Slika 2 : Polnilni pogoji baterijskega paketa pri upoštevanju polnjenja v oblačnem januarskem dnevu z zamiki med 0 in 3 urami od sončnega vzhoda



Slika 3 : Polnilni pogoji baterijskega paketa pri upoštevanju polnjenja v oblačnem januarskem dnevu z zamiki med 4 in 7 urami od sončnega vzhoda



Slika 4 : Polnilni pogoji baterijskega paketa pri upoštevanju polnjenja v jasnem januarskem dnevu z zamiki med 0 in 3 urami od sončnega vzhoda



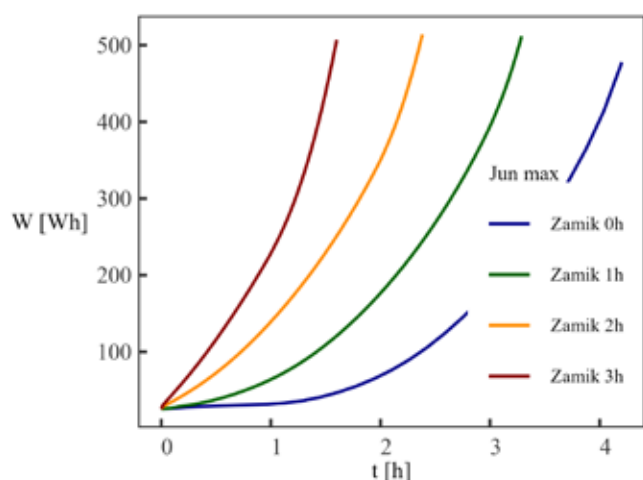
Slika 5 : Polnilni pogoji baterijskega paketa pri upoštevanju polnjenja v jasnem januarskem dnevu z zamiki med 4 in 7 urami od sončnega vzhoda

mo z maksimalnim tokom, ki ga dobimo iz fotovoltaičnega panela. Dejanska vrednost je sicer odvisna od maksimalnega polnilnega toka, ki ga dovoljuje posamezen tip baterijske celice. Na *sliki 2* vidimo, da lahko v najslabših pogojih (min januar) s 6 fotovoltaičnimi paneli napolnimo vsaj 1 porabnika iz flote obdelovalnih robotov, ki ima paket s 7 baterijskimi celicami, če začnemo polniti takoj ob sončnem vzhodu ali z enournim zamikom. Ob štiriurnem zamiku lahko napolnimo le nekoliko več kot polovico baterijskega paketa, pri sedemurnem zamiku pa polnjenje skoraj nima več učinka (*Slika 3*).

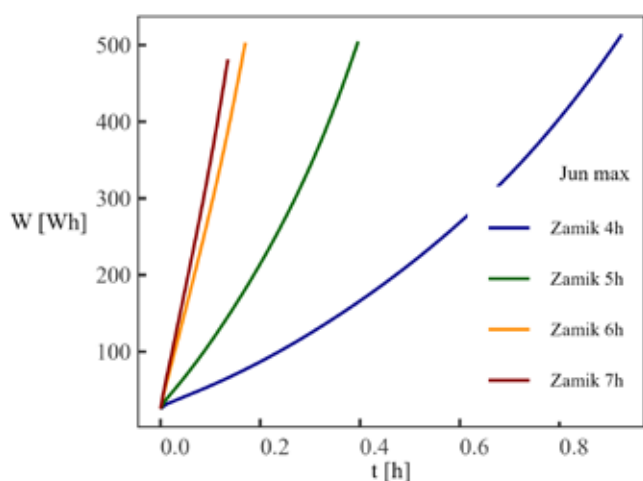
V jasnem vremenu januarja bi lahko napolnili 1 baterijski paket po okrog treh urah, če bi začeli polniti takoj ob sončnem vzhodu oz. po okrog pol ure, če bi polnili z zamikom treh ur (*Slika 4*). Polnilni čas bi se še nekoliko skrajšal pri zamiku 5 oz. 6 ur od

sončnega vzhoda, z zamikom polnjenja 7 ur in več pa bi se spet začel podaljševati (*Slika 5*). Razlog za takšno obnašanje tiči v gostoti solarne energije, ki višek doseže sredi dneva.

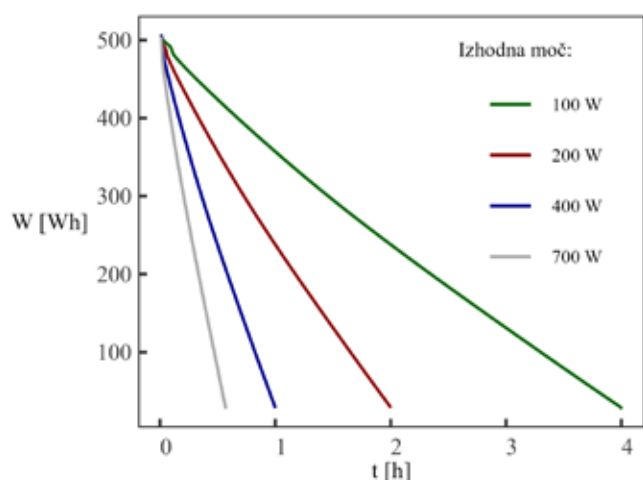
Podobno obnašanje kot v jasnem januarskem dnevu opazimo tudi v jasnem junijskem dnevu (*Slika 6*). Zanimivo je, da je na začetku jasnega januarskega dneva (*Slika 4*) mogoče baterijski paket napolniti hitreje kot na začetku sončnega junijskega dneva (*Slika 6*). Z začetkom polnjenja ob sončnem vzhodu v jasnem junijskem dnevu bi potrebovali namreč okrog 4 ure za napolnitev 1 baterijskega paketa, s triurnim zamikom polnjenja pa okrog uro in pol. Kasneje se solarna moč v junijskem sončnem dnevu močno poveča glede na sončen januarski dan, hkrati pa je dan junija daljši, kar omogoča večkratno polnjenje baterijskih paketov (*Slika 7*). Z upošteva-



Slika 6 : Polnilni pogoji baterijskega paketa pri upoštevanju polnjenja v jasnem junijskem dnevu z zamiki med 0 in 3 urami od sončnega vzhoda



Slika 7 : Polnilni pogoji baterijskega paketa pri upoštevanju polnjenja v jasnem junijskem dnevu z zamiki med 4 in 7 urami od sončnega vzhoda



Slika 8 : Praznilni pogoji obravnavanega baterijskega paketa pri upoštevanju različnih obratovalnih pogojev obdelovalnih robotov [8]

njem začetka polnjenja takoj ob sončnem vzhodu bi lahko v jasnem januarskem dnevu napolnili 20 baterijskih paketov. V jasnem vremenu junija bi se ta številka lahko povzpela do 55, če bi polnili z maksimalnim tokom, ki ga fotovoltaični paneli lahko proizvedejo.

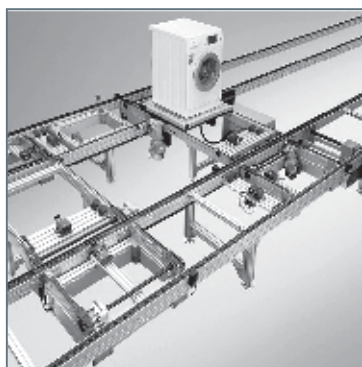
Analiza praznilnih časov glede na obratovalne lastnosti flote obdelovalnih robotov pokaže, da bi se analiziran baterijski paket pri maksimalni porabi izpraznil po približno 0,6 urah uporabe, medtem ko bi povprečna poraba obdelovalnega robota zagotavljala približno 4 ure obdelovalne avtonomije (Slika 8). Karakteristika baterijskega paketa ni linearna, zato tudi razpoložljiva kapaciteta s časom pada nelinearno. Izvedena analiza polnjenja in praznjenja je osnova za določitev optimalnega števila obdelovalnih robotov v floti in izbiranja posameznih robotov za polnjenje. Optimizacijski algoritem mora upoštevati njihovo gibanje oz. trenutne pozicije glede na preostalo energijo v baterijskih paketih, vremenske pogoje polnjenja in obdelovalne razmere, ki pogojujejo praznjenje baterijskih paketov.

4 Zaključek

V prihodnosti bo avtomatizirano obdelovanje tal kot ključen element zelenih skupnosti mogoče prilagajati in optimirati glede na razpoložljivost fotovoltaičnih panelov, število baterijskih paketov, velikost flote obdelovalnih robotov ter površino in namen obdelovalnih zemljišč. Sistemska integracija teh elementov bo omogočila razvoj modularnih in prilagodljivih platform, ki bodo tvorile osnovo za energetsko samooskrbo in lokalno krožno gospodarstvo.

Viri

- [1] HM Government: A Green Future: Our 25 Year Plan to Improve the Environment, OGL (2018), 1-151.
- [2] Costigan, S., Salmon, B.: Green Communities Canada, Strategic plan (2022), 1-12.
- [3] Ljubljanski urbanistični zavod: Strategija varstva in razvoja zelene infrastrukture v Ljubljanski urbani regiji, Regionalna razvojna agencija Ljubljanske urbane regije (2019), 1-79.
- [4] Greening Education Partnership Pillar 4: Greening Communities Guidance, UNESCO, 2024.
- [5] Evropska komisija: Industrijski načrt v okviru zelenega dogovora za neto ničelno dobo, EUR-Lex (2023), 62.
- [6] SIST EN ISO 37101:2023, Trajnostni razvoj v skupnostih, Slovenski inštitut za standardizacijo, (2023).
- [7] Somerville, M.: How 208 Hybrid Car Batteries

Rexroth**ORGATEX®****LEANPRODUCTS®****BOSCH****OPL**
automation

OPL avtomatizacija, d.o.o.
Dobrave 2
SI-1236 Trzin, Slovenija

Tel. +386 (0) 1 560 22 40
Tel. +386 (0) 1 560 22 41
Mobil. +386 (0) 41 667 999
E-mail: info@opl.si
www.opl.si

ries Changed Yellowstone National Park Forever, earth911.com (2015).

- [8] Šeruga, D., Poredoš, P., Kozjek, D., Gosar, A., Nagode, M., Klemenc, J.: Upoštevanje razpoložljivosti solarne energije pri napovedovanju obratovalne zmogljivosti avtomatiziranega obdelovanja kmetijskih površin, 16. industrijski forum IRT: zbornik foruma (2025).
- [9] Nagode, M., Gosar, A., Sweeney, C.-A., Jaguemont, J., Van Mierlo, J., Šeruga, D.: Mechanistic modelling of cyclic voltage-capacity response for lithium-ion bat-

teries, Energy (2019), 186, 115791.

- [10] Goutam, S., Timmermans, J.-M., Omar, N., Bossche, P.Vd., Van Mierlo, J.: Comparative Study of Surface Temperature Behavior of Commercial Li-Ion Pouch Cells of Different Chemistries and Capacities by Infrared Thermography, Energies (2015), 8(8), str. 8175-8192.
- [11] Šeruga, D., Gosar, A., Nagode, M., Klemenc, J.: Odziv baterijskih paketov na spremenljive obratovalne pogoje mehanskih sistemov, Akademija strojništva 2024 (2024), str. 116-117.

Operational capacity of automated agricultural land processing under variable solar energy availability across different time periods

Abstract:

Sustainable cultivation of urban agricultural areas in the future can be achieved by using automated fleets of processing robots that will be able to adapt their activities to the availability of solar energy. Since this energy source varies depending on the season, it is crucial to consider several factors when designing power systems and algorithms for robot operation. As a part of the study, the impact of available solar energy in Ljubljana on the power supply of a selected Li-ion battery pack has been analysed. The pack contained 7 cells with a total capacity of 20 Ah and a nominal voltage of 24 V, which would be sufficient for approximately 4 hours of operation with 100 W of power. The results show that using the selected size of photovoltaic panels, only one battery pack can be charged on a cloudy January day, whilst the number of possible charges increases up to 20 on a clear January day. The same size of photovoltaic panels allows for the charging of as many as 55 battery packs on a clear June day. Understanding of all influencing factors is therefore key to successful automation, as fluctuations in available solar energy directly affect the performance of a fleet of processing robots.

Keywords:

operation, automation, Li-ion batteries, solar energy, photovoltaic panels

Zahvala

Zahvala gre Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije za finančno podporo raziskovalnega programa št. P2-0182 Razvojna vrednotenja in interdisciplinarnega projekta Univerze v Ljubljani Zelene urbane skupnosti prihodnosti (I. pripravljalna faza).