

Koncepcija i realizacija napajanja skutera pomoću solarne energije

Vasilije Nosović, Radivoje Đurić

Apstrakt— U ovom radu je prikazana koncepcija solarnog skutera - električnog skutera sa solarnim panelom instaliranim sa njegove prednje strane. Energija dobijena iz solarnog panela, pomoću kontrolnog kola BQ25756, se koristi za punjenje litijum-jonske baterije skutera. Kontroler punjenja ima ulogu prilagodjenja napona i struje punjenja baterije, u skladu sa CC/CV profilom punjenja, sa implementiran MPPT algoritam za maksimalno iskorišćenje snage solarnog panela. Korišćenje solarne energije obavlja se u statičkom režimu, kada je skuter parkiran na jednom mestu i dinamički, tokom vožnje. Izvršen je proračun vremena punjenja u statičkom režimu i produženja vremena vožnje električnog skutera u dinamičkom režimu rada. Predstavljeni su i eksperimentalni rezultati.

Ključne reči— solarni skuter; solarni panel; MPPT algoritam; CC/CV profil punjenja; litijum-jonska baterija.

I. UVOD

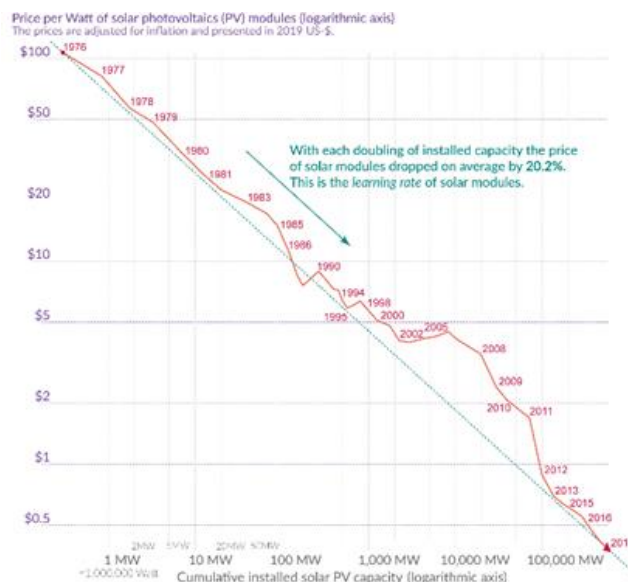
A. Energija Sunčevog zračenja i primena solarnih panela

Najveći deo korištene električne energije dobija se preradom fosilnih goriva. Međutim, na međunarodnom nivou se sve više ističe potreba za korištenjem obnovljivih izvora energije za generisanje elektriciteta. Jedan od glavnih izvora je energija Sunčevog zračenja - solarna energija. U 2023. godini, procenat električne energije dobijene iz solarne energije je iznosio 5% [1]. Iako ovaj procenat može izgledati vrlo nizak, značajno je viši od procenta generisane električne energije u 2015. godini (kada je potpisan Pariski sporazum o ublažavanju klimatskih promena), kada je iznosio 1%.

Solarni paneli se sastoje se od većeg broja solarnih ćelija, čiji se rad zasniva na efektu konverzije energije Sunčevog zračenja u električnu energiju - fotoelektričnom efektu (PV). Od 2010. do 2018. godine, cena generisanja elektriciteta pomoću PV sistema se smanjila za 77 %, a od 2005. do 2018. godine je sto puta uvećan broj PV sistema na planeti [2]. Cena materijala od kojih se proizvode solarni paneli je u stalnom opadanju. Po Svansonovom zakonu (sl. 1), cena solarnih panela se umanjuje za 20% svaki put kada se broj prodatih panela udvostruči [3]. Po nekim procenama [4], do 2050. godine će procenat dela električne energije dobijene od Sunčevog zračenja iznositi 16%.

Vasilije Nosović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: vasilije@etf.bg.ac.rs)

Radivoje Đurić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: rade@etf.bg.ac.rs)



Sl. 1. Svansonov zakon [3].

B. Električni skuteri

Električni skuteri su vozila za pojedinačni prevoz koja služe uglavnom za urbani transport. Poslednjih godina su postali široko rasprostranjeni, zbog prikladnosti i isplativosti korištenja. Imaju malu težinu, kompaktni su, lako se koriste i čuvaju. Godine 2018. godine je broj korisnika električnih skutera iznosio 10 miliona, a već 2022. godine je taj broj porastao na 77 miliona [5].

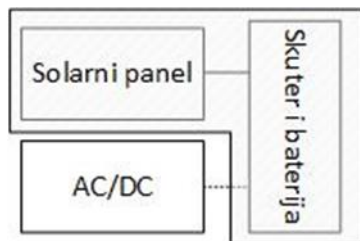
Električni skuteri sadrže uglavnom litijum-jonske baterije, iz kojih dobijaju energiju za vožnju. Od kapaciteta baterije zavisi put koji skuteri mogu da pređu sa jednim punjenjem. Punjenje baterije se vrši iz izvora električne energije (obično putem standardne AC utičnice) i unutar skutera. U prostoru ispod stajališta skutera, gde se nalazi i baterija, može se smestiti elektronika za kontrolu punjenja baterije i obezbeđivanja maksimalne snage koju skuter dobija od solarnog panela.

II. KONCEPCIJA SOLARNOG SKUTERA

Najvažniji elementi solarnog skutera su dati na sl. 2. Skuter sadrži bateriju iz koje dobija energiju za rad - pokretanje motora, napajanje elektronike unutar skutera i dr. Kod električnih skutera, standardno su u upotrebi litijum-jonske baterije, koje se pune spoljnim AC ili DC izvorom.

Solarni skuter se razlikuje od električnog po tome što pored napajanja iz AC/DC izvora poseduje i mogućnost napajanja energijom iz solarnog panela. Solarni panel se na skuter može

postaviti na više načina, a jedan od najefikasnijih i najrobusnijih je njegovo postavljanje sa prednje strane, ispod držača skutera (sl. 3). Na ovaj način se dobija relativno velika površina panela za konverziju solarne energije, a ne remete se značajno aerodinamičke osobine skutera. Aerodinamičnost se može popraviti neznatnim savijanjem krajeva solarnog panela na bočnim ivicama. Na ovako koncipiranom skuteru, korišćenje solarne energije se može obavljati u dinamičkom i statičkom režimu.



Sl. 2. Konceptija solarnog skutera.

Statički režim rada podrazumeva da skuter nije u pokretu kada se puni baterija. Umesto napajanja iz AC/DC izvora, za punjenje baterije se koristi energija solarnog panela. Kako bi se smanjio upadni ugao Sunčevog zračenja, prednji deo skutera je poželjno preklopiti i položiti uz zadnji, statični deo. Ovakav manevar se koristi i kod standardnih skutera radi lakšeg transporta. Korisnik može da postavi skuter u pravcu za koji je solarni panel maksimalno obasjan, odnosno kada mu se predaje najveća snaga i minimizira vreme punjenja baterije. Sa dovoljno velikom površinom panela i osunčanošću, vreme punjenja baterije uporedivo je sa vremenom punjenja iz spoljašnjeg AC/DC izvora. Statički režim punjenja je naročito pogodan u ruralnim mestima i izletištim, odnosno na mestima gde spoljašnja električna infrastruktura nije lako dostupna.



Sl. 3. Standardni skuter sa dodatim solarnim panelom.

Dinamički režim rada podrazumeva punjenje baterije u toku vožnje skutera. Postojanje tog režima predstavlja glavnu prednost solarnog skutera. Baterija se prazni u toku vožnje, ali se istovremeno dopunjava energijom iz solarnog panela. Dok

je u statičkom režimu punjenje moguće vršiti bilo iz AC/DC izvora, bilo iz solarnog panela, ovde se punjenje baterije vrši isključivo iz panela. Efektivno se dobija manja stopa pražnjenja baterije i produžuje se vreme za koje će se baterija isprazniti, samim tim se povećava maksimalno rastojanje koje skuter može da pređe.

III. SISTEM ZA SOLARNO PUNJENJE BATERIJE

Glavni delovi sistema za solarno punjenje baterije korišteni za potrebe ovog rada su:

- solarni panel nominalne snage 55W;
- litijum-jonska baterija nominalnog napona 37V i kapaciteta 6Ah.
- kontroler punjenja BQ25756EVM.

Pored tih delova, skuter može da poseduje servomehanizam povezan sa njegovim prednjim držačem, koji bi omogućavao rotaciju solarnog panela u položaj u kome panel bateriji predaje maksimalnu korisnu snagu.

A. Solarni panel

Zbog povećane efikasnosti i kompaktnih dimenzija izabran je monokristalni solarni panel čije su karakteristike date u tabeli I.

TABELA I
KARAKTERISTIČNE VREDNOSTI SOLARNOG PANELO

Maksimalna snaga (Pmax)	55W
Napon otvorenog kola (Voc)	24.5V
Napon za maksimalnu snagu (Vmp)	20.9V
Struja kratkog spoja	2.76A
Struja za maksimalnu snagu (Imp)	2.64A
Dimenzije	58cm x 54cm

B. Litijum-jonska baterija

Ovaj tip baterije ima veliku gustinu energije, veliki broj eksploatacionih ciklusa, malo samopražnjenje i vrlo važnu osobinu pri dinamičkom i nepotpunom punjenju, nema memorijski efekat. Za eksperiment je korišćena standardna skuterska litijum-jonska baterija sa posebnim izvodima za punjenje i eksploataciju, a čije su karakteristike date u tabeli II.

TABELA II
KARAKTERISTIKE LITIJUM-JONSKE BATERIJE

Nominalni napon	37V
Napon punjenja baterije	42V
Strujni kapacitet baterije	6Ah
Energetski kapacitet baterije	222Wh

C. Kontroler punjenja baterije sa BQ25756

Kao kontroler punjenja je iskorišćen evaluacioni modul BQ25756EVM [6] – štampana pločica bazirana na

integrisanom kolu BQ25756 – punjaču baterije koji poseduje buck-boost prekidački konvertor [7]. On podržava širok opseg vrednosti ulaznog napona - između 4.2V i 55V, a na izlazu se može povezati na red 2-13 litijum-jonskih. Programiranje pločice se obavlja eksternim mikrokontrolerom, pomoću I2C komunikacionog interfejsa. Na taj način se mogu očitavati veličine od interesa, ali se mogu i softverskim putem podešavati parametri punjenja i aktivirati softverski algoritam kojim se obezbeđuje maksimalan prenos snage (MPPT) od panela do skutera. Osim softverskog, moguće je i hardversko podešavanje karakterističnih parametara konvertora.

D. Servomehanizam

Radi maksimalnog iskorišćenja panela, može se ugraditi dodatni servomehanizam, koji obezbeđuje rotaciju solarnog panela oko osovine (prednjeg držača). Snaga koju generiše solarni panel zavisi od upadnog ugla zračenja Sunca, tako da se panel može zarotirati u položaj u kojem je taj ugao minimalan (tj. generisana snaga maksimalna). Kontroler punjenja već poseduje merenja napona i struje solarnog panela, samim tim i snage koju panel predaje bateriji, pa se ovi podaci mogu lako iskoristiti i za postavljanje položaja osovine pri predaji maksimalne snage.

IV. KONTROLNO KOLO SA BQ25756

Integrisano kolo BQ25756 je punjač litijum-jonskih baterija zasnovan na prekidačkom buck-boost konvertoru. Kolo pruža precizno podešavanje napona i struje punjenja baterije, automatsko regulisanje faza punjenja, kao i kontrolu parametara i očitavanje veličina punjenja putem I2C interfejsa. Ako se na ulaz kola poveže solarni panel, vrši se automatska regulacija ulaznog napona i struje pomoću MPPT algoritma.

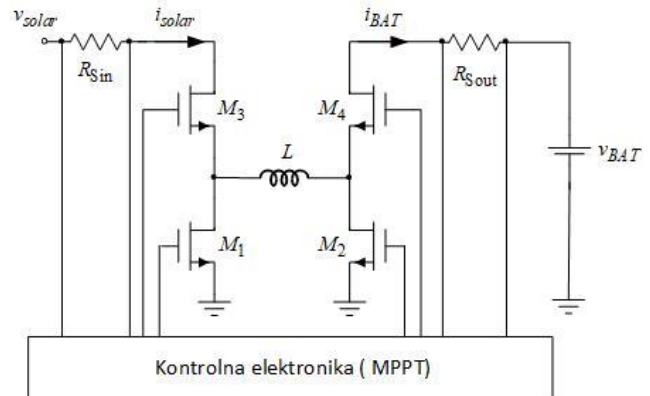
A. Prekidački buck-boost konvertor

Osnovu kola predstavlja prekidački DC-DC konvertor. Konvertor je realizovan delom unutar čipa, gde je realizovana povratna sprega i gde se nalaze low side i high side drajveri za upravljanje prekidačkim tranzistorima, a delom izvan čipa, gde se dodaje kalem i četiri tranzistora (sl. 4). Kontrolom napona na gejtu tranzistora, efektivno se mogu dobiti tri režima rada (koji odgovaraju tri tipa osnovnih prekidačkih konvertora): buck, boost i buck-boost. Ulazni napon može biti veći, manji ili jednak izlaznom naponu (naponu baterije). Spoljašnjim otpornicima je podešeno da je učestanost prekidanja 250 kHz. Period prekidanja je podeljen na dva intervala: za vreme prvog intervala u kalem se smešta energija dobijena iz solarnog panela, a za vreme drugog se ta energija prosleđuje ka bateriji. Zahvaljujući izrazito velikoj efikasnosti (oko 95%), najveći deo snage panela se prosleđuje do baterije.

B. Punjenje baterije metodom CC/CV

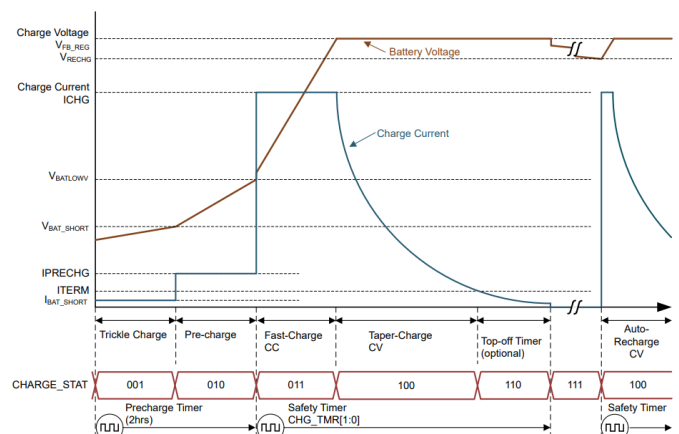
Na sl. 5 su prikazane faze punjenja baterije i oblici struja i napona baterije tokom svake faze. Sa leve strane grafika su označeni limiti struja i napona za koje punjenje prelazi iz jedne u drugu fazu. Dve glavne faze su CC (Constant Current) ili Fast-Charge faza i CV (Constant Voltage) ili Taper-Charge faza, za vreme kojih se dešava praktično celokupan proces punjenja baterije. Postoje i faze Trickle Charge i Pre-charge,

koje su početne faze punjenja, i u kojima se kroz bateriju propušta struja male jačine, dok napon baterije ne poraste do određene vrednosti.



Sl. 4. Energetski deo buck-boost DC-DC konvertora sa kolom kontrolne elektronika za punjenje litijum-jonske baterije.

Kako neke faze punjenja ne bi trajale predugo usled različitih neispravnosti, koriste se Charging Safety Timer, Precharge Timer i CV Timer. Po isteku intervala definisanog sadržajem ovih tajmera, mogu se preuzeti odgovarajuće akcije. Struja punjenja baterije u Fast-Charge fazi i napon punjenja u Taper-Charge fazi mogu se konfigurisati hardverski - povezivanjem otpornika odgovarajuće vrednosti na pinove čipa i softverski - upisom odgovarajućih bita u interne registre čipa preko I2C interfejsa. Pored ove dve glavne, i neke druge veličine koje se odnose na prelazak između faza punjenja se mogu konfigurisati hardverskim i softverskim putem.

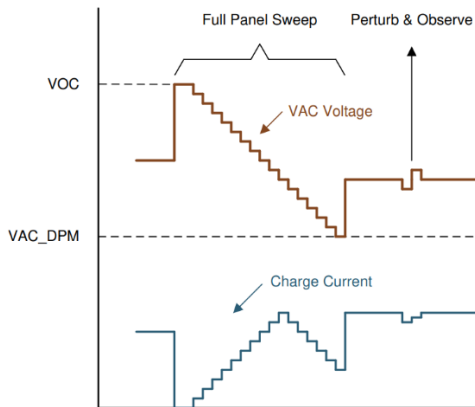


Sl. 5. Profil punjenja litijum-jonske baterije [7].

C. MPPT algoritam

Maximum Power Point Tracking (MPPT) algoritam se koristi kada je na ulaz čipa povezan solarni panel. Pošto se napon i struja solarnog panela menjaju tokom vremena, ovaj algoritam služi za njihovo podešavanje, tako da njihov proizvod bude maksimalan, tj. da se u svakom trenutku dobije maksimalna snaga iz panela. Aktiviranjem MPPT algoritma, prethodna funkcionalnost se automatski izvršava bez učešća korisnika.

Praćenje tačke maksimalne snage je bazirano na Perturb and Observe metodu, gde se radna tačka solarnog panela periodično pomera i izračunava se izmerena snaga, sve dok se ne dobije maksimalna snaga. Pored toga se vrši pomeranje radne tačke po čitavoj radnoj krivoj, sa većim periodom (Full Panel Sweep). Ova dva perioda su konfigurabilna. Na sl. 6 su dati grafici koji oslikavaju rad MPPT algoritma.



Sl. 6. MPPT algoritam [7].

D. I2C serijski interfejs

Integrirano kolo sadrži I2C interfejs koji omogućava softversko konfigurisanje parametara punjenja i očitavanje podataka o trenutnom statusu. I2C komunikacija podrazumeva postojanje kontrolnog uređaja - mikrokontrolera ili digitalnog procesora signala, preko kojeg se vrše konfiguracija i očitavanje.

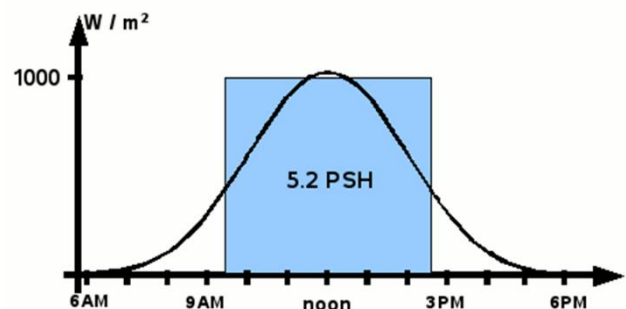
Postoje dva moda rada integriranog kola: default mod i host mod. U default modu, kolo vrši automatsko punjenje baterije, bez učešća host uređaja. U host modu, mikontroler šalje signale do integriranog kola i vrši konfiguraciju željenih parametara. Uređaj se prebacuje iz default moda u host mod upisom preko I2C magistrale i pritom se aktivira watchdog tajmer. Preko host uređaja može da se vrši konfiguracija čipa sve do isteka intervala definisanog watchdog tajmerom. Kako bi host uređaj zadržao kontrolu, mora redovno da šalje signal kojim se watchdog tajmer resetuje, inače će se opet uspostaviti default mod.

V. PROCENA DOBITKA ENERGIJE U STATIČKOM I DINAMIČKOM REŽIMU

Srednja dnevna insolacija na površini solarnog kolektora u kWh/m² predstavlja ekvivalentan broj sati iradijance od 1 kWh/m² ("jedno sunce"), slika 7 [8]. Srednja dnevna insolacija od 5.2 kWh/m² može se smatrati da je postignuta pri iradijansi od 1 kW/m² u toku određenog broja sati, ovde 5.2 sata. Dakle, solarni panel predaje nominalnu snagu bateriji u trajanju od 5.2 sata. Budući da je baterija sa kapacitetom od 222Wh i da je efikasnost DC-DC konverzije pri punjenju baterije oko 95%, ukupno vreme punjenja baterije iznosi 222Wh/(55W*0.95)=4.25h.

U tabeli III je prikazana srednja dnevna insolacija na površini solarnog kolektora u Beogradu. Iz ove tabele se da

uočiti da se potpuno punjenje baterije skutera pomoću solarnog panela od 55W može obaviti u toku jednog prosečnog sunčanog dana od aprila do septembra. U ostalim mesecima, za potpuno punjenje baterije je potrebno više od jednog sunčanog dana sa ovim solarnim panelom na datoj lokaciji. Na drugim, južnijim i toplijim lokacijama situacija je znatno povoljnija. Na primer u Trebinju je, sa insolacijom na horizontalnu površinu, srednja dnevna insolacija na godišnjem nivou 4.2 kWh/m². Za optimalno nagnuti panel ova vrednost je 4.8 kWh/m², što znači da se prosečno u svakom mesecu punjenje baterije skutera može obaviti u toku jednog dana.



Slika 7. Ekvivalentni broj sati "1-sunce" u toku dana.

TABELA III
PROSEČNA GUSTINA SOLARNE ENERGIJE NA TERITORIJI BEOGRADA

Mesec	Očekivana vrednost srednje dnevne insolacije [kWh/m ²]
Januar	1.677
Februar	2.969
Mart	3.608
April	4.608
Maj	5.328
Jun	5.560
Jul	6.382
Avgust	5.506
Septembar	4.229
Oktobar	3.292
Novembar	2.199
Decembar	1.566

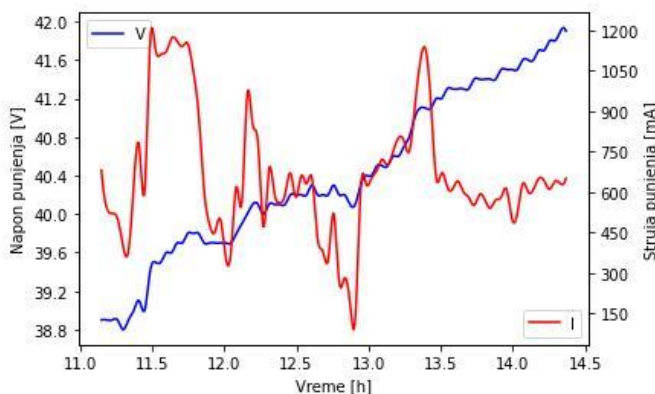
Kada je skuter u pokretu, odnosno u dinamičkom režimu punjenja baterije, upadni ugao Sunčevog zračenja na solarni panel nije optimalan, što znači da je smanjena proizvodnja snage iz panela. Za vreme vožnje skutera, taj ugao se neprekidno menja. Okolni objekti zaklanjaju panel od direktne izloženosti Suncu, povećava se broj reflektovanih talasa koji padaju na površinu solarnog panela, pa je teško izvesti analitičku procenu energije koju panel predaje bateriji. Pravi pokazatelji bi se mogli dobiti statističkim eksperimentima, tj. realnom upotrebom skutera u urbanom transportu i merenjem proizvedene energije, što će biti predmet daljih proučavanja. Ovde ćemo navesti relativan odnos iskorišćenja solarne

energije na skuteru kada je statičan i ima optimalni ugao solarnog panela pri punjenju baterija, i kada je pokretan sa praktično fiksnim uglom solarnog panela prema Suncu. Tada se samo deo energije može dobiti u odnosu na statički režim. Optimalan slučaj podrazumeva da je panel postavljen u istom pravcu kao u statičkom režimu, ali je uračunat veći upadni ugao Sunčevog zračenja. Rezultati za statički režim punjenja dobijeni su kada je solarni panel postavljen pod uglom od 34° u odnosu na podlogu. Budući da je prednji držač električnog skutera u odnosu na dasku za stajanje postavljen pod uglom od 80° , samim tim i u odnosu na podlogu, odnos snaga koje se mogu dobiti u dinamičkom režimu i optimalnom statičkom režimu iznosi

$$P_{din} / P_{stat} = \cos(80^\circ - 34^\circ) = 0.7 \quad (1)$$

VI. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Sistem za punjenje baterije pomoću panela instaliranog na frontalnom delu skutera je podešen na maksimalnu struju punjenja od 1A, početnu struju punjenja na 40% maksimalne struje i minimalnu struju u režimu sa konstantnim naponom od 0.25A. Punjenje je obavljeno u statičkom režimu sa maksimalnom snagom solarnog panela od 55W i uključenim MPPT algoritmom. Na slici 8 su prikazani karakteristični dijagrami napona i struje pri punjenju litijum-jonske baterije sa 10 ćelija i ograničenjem maksimalnog napona nešto ispod 42V. Snimanje karakteristike obavljeno je na teritoriji Beograda, tokom dela jednog tipičnog dana početkom marta. Usled povremene oblačnosti, algoritam za kontrolu punjenja baterije određivao je tačku maksimalne snage solarnog panela, periodičnim otvaranjem priključaka solarnog panela. To se manifestovalo testerastim ulaznim naponom od napona otvorene veze panela od 22V, do minimalnog ulaznog napona od 4V, periode približno 10s.



Slika 8. Grafici napona i struje punjenja baterije.

Usled konačno male snage solarnog panela i promenljive oblačnosti, karakteristični dijagram se razlikuje od tipičnih CC/CV dijagrama pri punjenju litijum-jonske baterije.

VII. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana inovativna primena solarnih panela ograničenih dimenzija i snage za napajanje standardnih skutera i dobijanje kvalitativno novog prevoznog sredstva, solarnog skutera. Pokazano je da se u realnim uslovima solarna energija može efikasno koristiti za povećanje autonomije i robusnosti skutera. Efikasnim upravljanjem energetskom elektronikom i dobrom sinhronizacijom, pokazano je da se može obaviti punjenje baterije skutera i u uslovima velikog poremećaja, odnosno česte oblačnosti. U nastavku istraživanja je potrebno proceniti parametre stohastičke prirode dinamičkog punjenja baterije, kako u brzo promenljivim urbanim, tako i sporo promenljivim ruralnim područjima.

LITERATURA

- [1] International Energy Agency. (2024). "Executive summary – Renewables 2023 – Analysis". <https://www.iea.org/reports/renewables-2023/executive-summary>
- [2] Ali O.M. Maka, Jamal M. Alabid, (2022). Solar energy technology and its roles in sustainable development, Clean Energy, Volume 6, Issue 3. pp. 476-483. <https://academic.oup.com/ce/article/6/3/476/6606003>
- [3] Max Roser, (2023). Learning curves: What does it mean for a technology to follow Wright's Law? <https://ourworldindata.org/learning-curve>
- [4] International Energy Agency. (2014). How solar energy could be the largest source of electricity by mid-century. <https://www.iea.org/news/how-solar-energy-could-be-the-largest-sourceof-electricity-by-mid-century>
- [5] IAAA Mobility. The E-scooter trend – A popular mobility alternative. <https://www.iaa-mobility.com/en/newsroom/news/urban-mobility/trend-t-scooter>
- [6] BQ 25756EVM User's Guide. <https://www.ti.com/tool/BQ25756EVM>
- [7] BQ 25756 Datasheet. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25756.pdf?ts=1709548220051&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FBQ25756
- [8] Jovan Mikulović, Željko Đurišić, Solarna energetika, Beograd: Akademska misao 2019.

ABSTRACT

This paper presents the concept of a solar scooter - an electric scooter with a solar panel installed on its front side. The energy obtained from the solar panel, using the BQ25756 control circuit, is utilized to charge the lithium-ion battery of the scooter. The charging controller has the role of adjusting the battery charging voltage and current, in accordance with the CC/CV charging profile, with an implemented MPPT algorithm for maximum utilization of the solar panel power. Solar energy is used in static mode, when the scooter is parked in one place, and in dynamic mode, while driving. The calculation of the charging time in static mode and the extension of the driving time of the electric scooter in dynamic mode was performed. Experimental results are also presented.

Conception and Realization of Scooter Power Supply Using Solar Eenergy

Vasilije Nosovic, Radivoje Djuric