

Uporaba komercialnega sledilnika točki maksimalne moči za sončne module na primeru brezpilotnega letalnika Bramor

Dejan Hrovatin¹, Andrej Žemva²

¹ C-Astral d.o.o., Tovarniška cesta 26, 5270 Ajdovščina, Slovenija

² Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: dejan.hrovatin@c-astral.com, andrej.zemva@fe.uni-lj.si

Povzetek. Pri letalniku, ki uporablja baterije kot primarni vir napajanja, je avtonomija povezana s količino shranjene energije v baterijah in električno porabo letalnika. Kot eden izmed najbolj smotrnih načinov povečanja avtonomije se pri takih sistemih kaže uporaba sončnih modulov. Tokovno-napetostna karakteristika sončnega modula odraža potrebo po uporabi sledilnika točki maksimalne moči, če želimo iz sončnega modula pridobiti kar največ električne energije v danem trenutku. Učinkovitost takega sistema je pogojena z izvedbo sledilnika ter načina sledenja točki maksimalne moči. Danes se v ta namen največ uporabljajo stikalni pretvorniki, katerih delovanje nadzoruje izbran namenski algoritem. Komercialno so najbolj razširjeni algoritma Perturb & Observe in Incremental Conductance ter njune izvedenke. V članku je predstavljena izgradnja sledilnika, ki temelji na uporabi algoritma Perturb & Observe, vgrajenega v komercialno dostopno integrirano vezje. Preizkus delovanja je bil izveden na brezpilotnem letalniku Bramor podjetja C-Astral d. o. o. (Ajdovščina, Slovenija).

Ključne besede: brezpilotni letalnik, sledilnik točki maksimalne moči, algoritem, povečanje avtonomije

Using of a commercial maximum-power point tracker for solar modules of unmanned aircraft Bramor

We know that for an unmanned aerial vehicle which uses only batteries as the primary power source, the autonomy is related to the amount of the energy stored in batteries and the aircraft electricity consumption. One of the most appropriate ways to increase the autonomy is to use solar modules. The current-voltage characteristic of the solar module shows that a maximum power-point tracker should be used to obtain as maximum amount of electricity from a solar module at any time. The effectiveness of this system depends on the hardware implementation of the tracker and also on the algorithm which is used for tracking the maximum power point. Nowadays, the switching converters (or controllers) are the most used in this segment. Their operation is controlled by a specific algorithm. The most widely commercially used algorithms are Perturb & Observe and Incremental conductance algorithms. This paper introduces a tracker designed with a commercially available integrated switching controller with an integrated Perturb & Observe algorithm. The performance was tested on a Bramor unmanned aerial vehicle produced by C-Astral d.o.o (Ajdovscina, Slovenia).

Keywords: unmanned aerial vehicle, maximum-power point tracker, algorithm, autonomy increase

1 UVOD

Brepilotni letalniki se danes nepogrešljivo pojavljajo v številnih aplikacijah, predvsem pa so zelo dobrodošli tam, kjer bi bilo za človeka prenevarno. Velika

uporabnost takih sistemov narekuje njihovo čim večjo avtonomijo. Če se kot primarni vir napajanja letalnika uporablja baterija, lahko z gotovostjo trdimo, da bo njegova avtonomija odvisna od količine razpoložljive energije v bateriji ter električne porabe takega letalnika. Hitro tako sledi, da je povečanje avtonomije mogoče doseči z zmanjšanjem električne porabe sistema ali z zamenjavo baterije s tako, ki zagotavlja višjo kapaciteto hranjenja energije pri enaki masi, kar pomeni višjo gravimetrično kapaciteto.

Pri zmanjšanju električne porabe sistema je največkrat na voljo le malo manevrskega prostora. Elektronika letala porabi le manjši del električne energije, največ je porabi pogonski sklop. Poraba zadnjega je v zelo veliki meri odvisna tudi od vremenskih razmer.

Pregled trga masovno proizvedenih baterij pokaže, da bi bilo za sisteme, ki so zgolj baterijsko napajani, trenutno mogoče doseči najvišjo avtonomijo z uporabo litij-ionskih cilindričnih celic (tudi li-ion), saj ta tip omogoča najvišjo gravimetrično kapaciteto. Njihovo testiranje [1] na letalniku Bramor v primerjavi s trenutno uporabljenimi litij-polimerskimi baterijami (tudi li-po) pokaže okrog 10-odstotno povečanje avtonomije. Na trgu se sicer pojavljajo že baterijske celice, ki zagotavljajo še večjo gravimetrično kapaciteto, vendar so trenutno še v razvojni fazi [2–4].

Na trgu je mogoče najti še več rešitev za povečanje avtonomije, pri čemer je najbolj ugodna seveda tista, ki

ponuja najvišji doprinos. V aerodinamiki velja, da večanje mase letala največkrat privede do večje električne porabe, zato moramo zelo paziti tudi na maso sistema za povečanje avtonomije.

Ena izmed možnosti za povečanje avtonomije je tudi uporaba gorivnih celic, a se pri manjših letalnikih to izkaže za precej neprimerno že zaradi precejšnje velikosti in mase rezervoarja. Še bolj ugodna možnost bi bila uporaba motorja z notranjim izgorevanjem. Če namreč primerjamo energiji, shranjeni v gorivu in v bateriji, je v gorivu z enako maso shranjeno za približno 50-krat več energije kot v izbrani bateriji [5]. Poleg tega s porabljanjem goriva masa letala pada, kar še dodatno pozitivno vpliva na avtonomijo. Žal pa sta tudi pri tem veliki težavi velikost in masa osnovnega sistema za povečanje avtonomije, zato ta način prav tako ni primeren za manjše letalnike, kot je Bramor, saj bi implementacija enega ali drugega sistema pomenila ogromen poseg v platformo letalnika.

Bramor je ime linije brezpilotnih letalnikov (slika 1), ki jih proizvaja podjetje C-Astral d. o. o [6] iz Ajdovščine (Slovenija). Gre za letala z maso okrog 4,8 kg in razponom kril 2,3 m. Linijo sestavlja več letalnikov, ki so opremljeni z različnimi tipi senzorjev in drugimi merilnimi napravami. Avtonomija letalnika je tako odvisna od tipa letala, a znaša tudi več kot 3 ure, kar jih uvršča v svetovni vrh letalnikov z maso do 5 kg.



Slika 1: Brezpilotni letalnik Bramor.

2 ŠIRŠE ZNANSTVENO PODROČJE

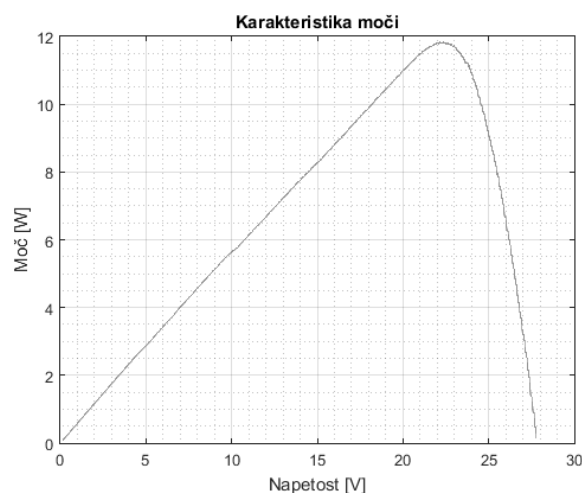
2.1 Širše znanstveno področje

Na trgu je danes dostopnih veliko materialov, ki gradijo sončne celice, še vedno pa prevladujejo celice na osnovi silicija [7]. Upoštevajoč zahtevo po čim manjši masi, sledi, da je pri izbiri materiala, ki gradi sončno celico, zelo pomemben faktor razmerja med proizvedeno električno energijo celice in maso celice. V tem segmentu v ospredje stopajo predvsem tankoplastne sončne celice, med katerimi je treba omeniti produkte proizvajalca Alta Devices [23]. Njihov tip enospojnih celic ponuja izkoristek več kot 28 %, kar je zelo veliko, saj je teoretična meja, ki jo za enospojne sončne celice podaja Shockley-Queisser limita, 33,7 % [24].

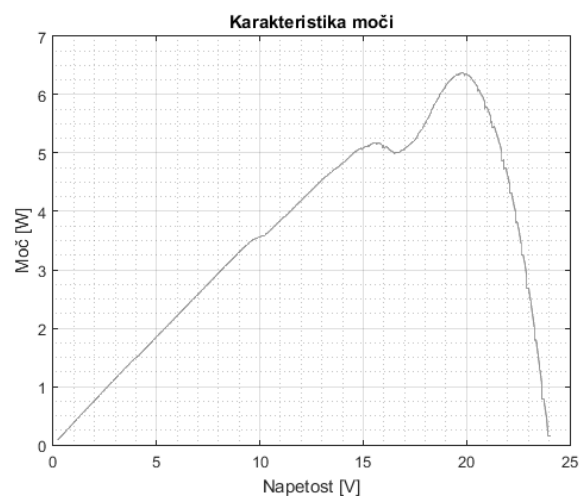
Oblika tokovno-napetostne karakteristike sončne celice zelo spominja na karakteristiko tokovnega vira, s pomočjo katerega tudi predstavimo delovanje sončne celice. Predstavitev matematično sicer opišemo z eno-ali dvodiodnim modelom [10].

Sončna celica kot samostojni gradnik je v praksi v glavnem precej »neuporabna«, zato se jih največkrat veže zaporedno (za doseganje višje napetosti) in/ali vzporedno (za doseganje višjih tokov) v solarne module.

Če predpostavimo enakomerno razporeditev osvetlitve čez sončni modul, potem pogled na karakteristiko proizvedene električne moči v odvisnosti od napetosti (slika 2) pokaže, da je optimum proizvedene moči dosežen le v eni točki na karakteristiki, ki jo imenujemo tudi točka maksimalne moči (TMM) oz. MPP (angl. Maximum Power Point). Položaj te točke ni fiksen in je odvisen od spremembe temperature in osvetlitve.



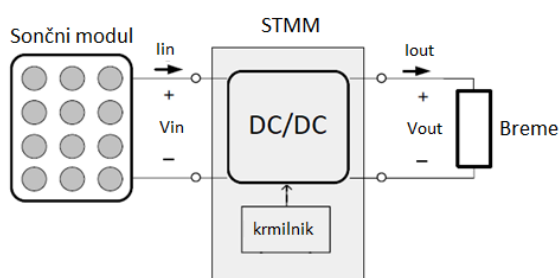
Slika 2: Primer karakteristike moči sončnega modula, ki je osvetljen enakomerno po celotni površini modula.



Slika 3: Karakteristika moči senčenega sončnega modula z vgrajenimi obvodnimi diodami.

Če osvetlitev čez površino sončnega modula ni enakomerna ter ima sončni modul vgrajene tudi t. i. obvodne (angl. bypass) diode, se pojavi več lokalnih maksimumov moči (slika 3), pri čemer je najvišji vrh teoretično najbolj »donosen«. Tak vrh vsebuje tudi globalno točko maksimalne moči (GTMM) oz. GMPP (angl. Global Maximum Power Point).

Sledenje točki maksimalne moči opravljajo t. i. sledilniki točki maksimalne moči (STMM) oz. MPPT (angl. Maximum Power Point Tracker), ki se pojavljajo v popolnoma analogni, digitalni ali pa analogno-digitalni obliki. Zadnja izvedba je danes še najbolj pogosta. Kot jedro je tu največkrat uporabljen mikrokrmilnik, na katerem se izvaja izbran algoritem za sledenje točki maksimalne moči [8–9]. Mikrokrmilnik tako pod nadzorom algoritma krmili stikalni pretvornik, ki je nameščen med sončnim modulom na vhodni strani in bremenom (npr. baterija) na izhodni strani (slika 4). Učinkovitost takega sistema je pogojena z izkoristkom celotnega elektronskega dela sistema, vključujoč izkoristek algoritma pri sledenju.



Slika 4: Skica splošne ponazoritve implementacije STMM na primeru sistema sončnega modula in bremena.

Algoritmi se tako med seboj razlikujejo predvsem po kompleksnosti implementacije, hitrosti sledenja maksimalni točki moči in tipu senzorjev veličin, ki predstavljajo vhodni podatek v algoritem [10–14]. Algoritme nadalje delimo na neposredne in posredne [11, 15, 16]. Pri prvih se položaj točke maksimalne moči določa neposredno na podlagi meritve toka oz. napetosti. Ta pristop je neodvisen od neelektričnih veličin (sončno sevanje, temperatura). Pri posrednih algoritmih pa se položaj točke maksimalne moči določa s pomočjo merjenja neelektričnih veličin. Tak pristop je bolj kompleksen, manj zanesljiv, saj je podvržen številnim neželenim vplivom in je zaradi svoje kompleksnosti največkrat tudi dražji. Komercialno najbolj razširjena algoritma sta Perturb & Observe in Incremental Conductance [17–19], ki spadata med direktne algoritme.

3 TRG SLEDILNIKOV TOČKI MAKSYMALNE MOČI ZA LETALNIKE

Pregled trga pokaže, da na trgu ni mogoče najti primernih sledilnikov točki maksimalne moči, ki bi bili optimizirani po velikosti in masi ter tako primerni za manjše letalnike. Kot zelo zanimivi pa se v tem segmentu kažejo produkti proizvajalca Genasun [20]. Tako se izkaže, da je potrebna izdelava sledilnika v lastni režiji. Najbolj aktivni proizvajalci integriranih vezij s tega področja so Analog Devices, Texas Instruments, ST Microelectronics ter nekateri drugi. Njihove rešitve so običajno v obliki integriranih vezij, ki vsebujejo logiko stikalnega pretvornika, združeno z algoritmom za sledenje točki maksimalne moči za sončne module. Taka izvedba je vedno kompromis, saj glede na lastnosti pokriva zahteve širšega nabora aplikacij, kjer je mogoče tak sledilnik uporabiti.

Komercialno dostopna integrirana vezja z vgrajeno podporo sledilnika točki maksimalne moči največkrat uporabljajo sledenje, ki deluje po načelu vzdrževanja izbrane konstantne napetosti oz. CV (angl. Constant Voltage). To napetost je treba nastaviti, in sicer največkrat prek zunanega uporabnega delilnika. Pri tem je najbolje, da nastavimo tako napetost, da smo na tokovno-napetostni karakteristiki sončnega modula nekoliko levo od vrha moči, saj v primeru, da se pomaknemo na desno stran tega vrha, generirana moč hitro pade (kot je razvidno z grafa na sliki 2). CV-način sledenja poskrbi, da bo na sončnem modulu ne glede na potrebe bremena vedno taka napetost, kot smo jo nastavili (spreminja se torej le vrednost generiranega električnega toka). Ta način sledenja temelji na dejstvu, da se z osvetlitvijo položaj vrha maksimalne moči (v odvisnosti od napetosti) le malo spremeni. Tak algoritem je izjemno neprimeren za uporabo pri nehomogeni osvetlitvi sončnega modula z integriranimi obvodnimi diodami, saj detekcija premika vrha z globalno točko maksimalne moči tako sploh ni mogoča. Tudi sicer pa je odporen proti premikom točke maksimalne moči zaradi drugih vplivnih faktorjev (temperatura, staranje modula ...).

Za testiranje na letalniku Bramor je bil že lani zgrajen in preizkušen sledilnik [25], ki temelji na integriranem vezju z vgrajenim CV-načinom sledenja. Pri tem smo za osnovo izbrali integrirano vezje LT3652HV proizvajalca Analog Devices [21].

Na trgu je skromna izbira integriranih vezij, ki podpirajo namenski algoritem sledenja točki maksimalne moči. Sem tako spadajo vezja, ki vsebujejo enega od namenskih algoritmov. Eno izmed takih integriranih vezij ponuja proizvajalec Analog Devices pod oznako LT8490 [22], ki za sledenje uporablja komercialno zelo razširjen algoritem Perturb & Observe. To vezje smo tudi uporabili kot osnovo pri izgradnji sledilnika točke maksimalne moči.

4 RAZVOJ SLEDILNIKA TOČKE MAKSIMALNE MOČI NA OSNOVI INTEGRIRANEGA VEZJA LT8490

4.1 Integrirano vezje LT8490 stikalnega pretvornika z vgrajenim algoritmom *Perturb & Observe* za sledenje točki maksimalne moči

LT8490 je integrirano vezje proizvajalca Analog Devices. V osnovi združuje sinhronski stikalni pretvornik tipa navzdol-navzgor (angl. buck-boost) istega proizvajalca, ki obstaja pod oznako LT8705. Dodatno ima vgrajeno še sledenje točki maksimalne moči za sončne module, pri čemer sledenje temelji na algoritmu *Perturb & Observe*. Sam algoritem v osnovi omogoča aktivno krmiljenje stikalnega pretvornika, na približno vsake tri minute pa se izvede tudi globalni pregled karakteristike z namenom iskanja vrha (v primeru več vrhov), pri katerem je globalna točka maksimalne moči.

Integrirano vezje omogoča tudi priklop navadnega napetostnega vira. V tem primeru deluje kot običajen stikalni pretvornik navzdol-navzgor brez aktiviranega načina za sledenje točki maksimalne moči, a ta način delovanja v našem primeru ni aktualen.

Pretvornik deluje v območju vhodne napetosti od 6 do 80 V, na izhodu pa je lahko baterija z napetostjo od 1,3 do 80 V.

Integrirano vezje LT8490 podpira štiri načine regulacije: regulacijo vhodnega in izhodnega toka ter vhodne in izhodne napetosti. Vse te spremenljivke so nastavljive z izbiro ustreznih uporov in kondenzatorjev. Regulacija vhodnega toka se uporablja za omejitev maksimalnega toka, ki ga zahtevamo iz vira. Regulacija vhodne napetosti se uporablja za detekcijo točke maksimalne moči. Na izhodni strani se regulacija izhodne napetosti uporablja v povezavi z napetostjo, do katere lahko polnimo baterijo, t. i. plavajoča napetost (angl. floating voltage), regulacija izhodnega toka pa se uporablja z namenom omejitve toka, ki lahko teče v baterijo oz. v sistem porabnika, vezanega vzporedno z baterijo. Priključitev zgolj porabnika (brez baterije) na izhod vezja namreč ni mogoča zaradi periodičnega izvajanja pregleda karakteristike, med katerim porabnik ne bi bil zadostno napajan. Vezje podpira priklop različnih tipov baterij, pri čemer je polnilni tok odvisen tudi od trenutne napetosti priključene baterije. Ker kot breme v vsakem primeru nastopa tudi baterija, je nujna uporaba algoritma za polnjenje. Uporabili smo splošno razširjen algoritem CC/CV (angl. Constant Current/Constant Voltage). Podprta je tudi opsijska priključitev temperaturnega senzorja, ki meri temperaturo baterije med delovanjem vezja in pomaga pri temperaturni kompenzaciji ter deaktivaciji polnjenja na primeru delovanja pri neustrezni temperaturi.

Status delovanja vezja je vizualiziran prek dveh LED-diod (angl. Light-Emitting Diode), opsijsko pa je mogoče stanje prebirati tudi prek serijske komunikacije.

4.2 Postopek izgradnje sledilnika

Da lahko določimo vse komponente, potrebne za pravilno delovanje sledilnika (na konkretnem primeru sončnega modula oz. modulov), je treba poznati dva parametra: tok kratkega stika in napetost odprtih sponk sončnega modula. Pri tem velja, da sta oba parametra odvisna od temperature in osvetlitve.

Na primeru letalnika Bramor imamo na obeh krilih letalnika (slika 5) po dva sončna modula, sestavljena iz 2 vzporednih linij s 16 sončnimi celicami, vezanimi zaporedno. Istočasno imamo na vsakem krilu še po en sončni modul, sestavljen iz 3 vzporednih verig iz 16 sončnih celic, vezanih zaporedno. Tako se odločimo zgraditi dva sledilnika, pri čemer na en sledilnik priključimo sončne module velikosti 16 x 2, na drugi sledilnik pa module velikosti 16 x 3. Da zmanjšamo električne izgube, povežemo po 2 modula enake velikosti na vsakem krilu zaporedno, zaporedno pa vežemo tudi modula konfiguracije 16 x 3, ki sta vsak na enem krilu.



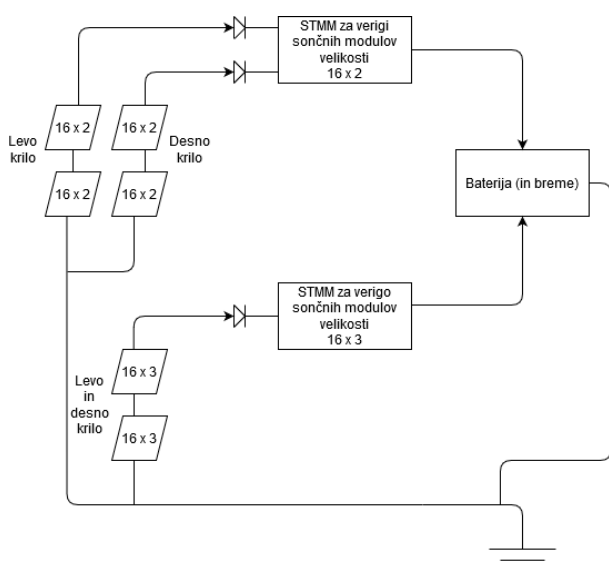
Slika 5: Postavitev sončnih modulov na brezpilotnem letalniku Bramor.

V tabeli 1 so predstavljene meritve napetosti odprtih sponk in toka kratkega stika za posamezno konfiguracijo modulov.

Tabela 1: Napetost odprtih sponk in tok kratkega stika na primeru sončnih modulov, integriranih v letalnik Bramor.

Konfiguracija modulov	Napetost odprtih sponk (V)	Tok kratkega stika (mA)
16 x 2 levo krilo	25,5	445
16 x 2 desno krilo	28,4	450
16 x 3	29,9	680

Kombinaciji, sestavljeni iz sončnih modulov 16 x 2, vežemo vzporedno na vhod istega sledilnika. Vsako verigo pripeljemo ločeno na sledilnik in na vsaki verigi uporabimo zaščito, ki prepreči, da bi tok iz ene verige sončnih modulov tekkel v drugo ali celo iz sledilnika v eno ali drugo verigo sončnih modulov. Iz istega razloga tudi pri priključitvi večje verige sončnih modulov (16 x 3) na sicer ločen sledilnik uporabimo zaščito. Shema priklopa je prikazana na sliki 6.



Slika 6: Postavitev sončnih modulov na brezpilotnem letalniku Bramor.

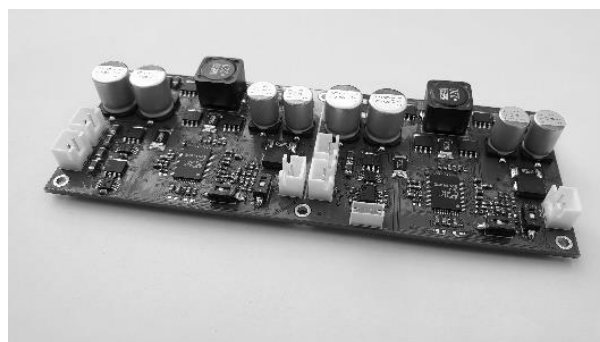
V našem primeru smo za zaščito uporabili n-kanalni MOSFET (angl. Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) z ustreznim krmilnikom, ki je za ta tip kanala tranzistorja potreben. Obstaja pod oznako LM74610, proizvajalec pa je Texas Instruments.

Na podlagi meritev določimo maksimalno vhodno napetost obeh sledilnikov 40 V, vhodni tok pa omejimo na 2 A. Na osnovi enačb v podatkovnem listu LT8490 izračunamo potrebne upore in kondenzatorje za vhodno regulacijo napetosti. Sledi še izračun uporov in kondenzatorjev za regulacijsko zanko izhodne napetosti. Ta je povezana z napetostjo polne baterije. Na letalniku Bramor je trenutno v uporabi štiricelična baterija li-po, kar pomeni, da lahko najvišja napetost napolnjene baterije znaša 16,8 V. Pri sledilniku uporabimo varnostni faktor in pri izračunu uporov in kondenzatorjev upoštevamo napetost polne baterije 16,6 V. Na osnovi enačb v podatkovnem listu izračunamo tudi upora za omejitev vhodnega toka in izhodnega toka. Merjenja temperature ne implementiramo in prav tako izklopimo tudi vse morebitne časovnike. Zadnji bi namreč v primeru, da je poraba na baterijo vezanega porabnika (celotna elektronika letala, vključno z motornim pogonom) večja od električne energije, ki jo lahko proizvedemo s sončnimi moduli, povzročil izklop sledilnika.

Preklopne tranzistorje izberemo tako, da se ob nazivnem toku in izbrani delovni frekvenci stikalnega pretvornika (202 kHz) ne grejejo preveč. Pravilno je treba določiti tuljavo in tudi vhodne in izhodne kondenzatorje ter vse preostale elemente. Izdelani sledilnik je prikazan na sliki 7.

Delovanje sledilnika bomo lažje spoznali, če na vhod in izhod dodamo merilnik napetosti in toka. To izvedemo pri obeh sledilnikih, pri čemer v ta namen

uporabimo namensko integrirano vezje LTC2946 proizvajalca Analog Devices.



Slika 7: Slika dvojnega sledilnika na osnovi LT8490.

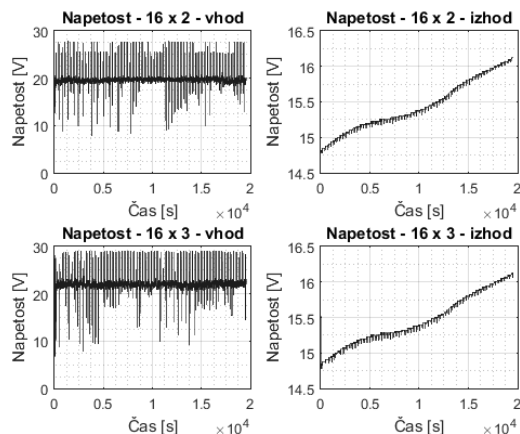
5 TESTIRANJE IZDELANEGA SLEDILNIKA

5.1 Stacionarno testiranje

Testiranje je bilo izvedeno na strehi podjetja na sončen dan, 9. 8. 2019, med 10.30 in 16.00, pri temperaturi zraka okrog 31 °C. Kot breme je bila priklopljena le baterija. Med testiranjem sta bili krili z moduli položeni na tla.

Na sliki 8 vidimo žagast potek merjene vhodne napetosti, ki je posledica periodičnega iskanja globalne točke maksimalne moči.

V času testiranja, trajajočega 5 ur in pol, je v baterijo preteklo za pribl. 115 Wh električne energije.



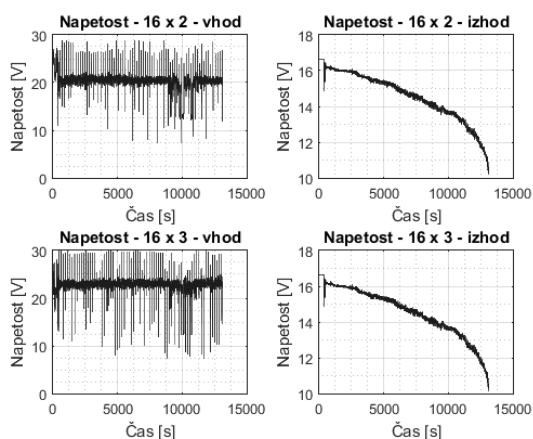
Slika 8: Vhodna in izhodna napetost med stacionarnim testiranjem.

5.2 Dinamično testiranje (med letom)

Testiranje je bilo izvedeno med poletom na razmeroma sončen dan, 12. 8. 2019, na lokaciji testnega letališča v Vipavi, med 11.00 in 14.40. Temperatura med testiranjem je znašala okrog 33 °C na višini letenja 150 m nad tlemi in pri hitrosti letenja 16 m/s. Med

testiranjem so za 30 minut sonce zakrili oblaki, kar je razvidno iz grafa poteka vhodnih napetosti na sliki 9.

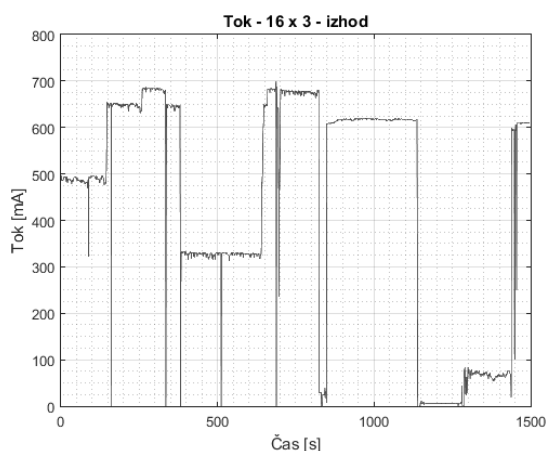
Med poletom se je v sistem letalnika preneslo 374 Wh električne energije. Od tega je sistem sončnih modulov 16 x 2 prispeval 40,3 Wh, modula 16 x 3 pa sta prispevala 33,1 Wh. Skupno je bilo torej s pomočjo sončne energije v sistem letalnika prenesene 73,4 Wh električne energije, kar znaša 19,6 % celotne energije. Avtonomija letalnika se je povečala za 43 minut.



Slika 9: Vhodna in izhodna napetost med dinamičnim testiranjem.

5.3 Primerjava obnašanja STMM pri senčenju enega izmed modulov

Na strehi podjetja je bila na sončen dan, 13. 8. 2019, med 13.40 in 14.10, pri temperaturi okrog 28 °C, izvedena primerjava med sledilnikom, izdelanim na osnovi vezja LT3652HV, in aktualnim sledilnikom. Pri testu je bil namen spoznati obnašanje sledilnikov pri senčenju (pokritju) enega izmed solarnih modulov, ki imajo integrirane tudi obvodne diode. V ta namen je bil pokrit eden izmed modulov verige 16 x 3.



Slika 10: Vhodni in izhodni tok med dinamičnim testiranjem.

V 850. sekundi (slika 10) je bil pri testiranju uporabljen aktualni sledilnik. Med 400. in 650. sekundo testiranja je bil eden izmed obeh modulov popolnoma prekrit z belim papirjem, tako da svetloba do modula ni imela dostopa. Iz grafa je razviden upad toka na izhodu sledilnika na približno polovico normalne vrednosti. To ustreza dejstvu, da je bila točka maksimalne moči na približno polovični napetosti, saj je bil en modul tako rekoč neaktiven.

V drugem delu testa je bil uporabljen že v letu 2018 izdelan sledilnik, katerega sledenje deluje po načelu algoritma CV. Pokritje sončnega panela z belimi papirji je bilo izvedeno pri 1150. sekundi testa, izvajalo pa se je do 1450. sekunde. Ker smo na polovici testa opazili, da je tok iz sledilnika tako rekoč 0 mA, smo modul pokrili le čez polovico njegove površine. Posledično je napetost celotne vezave nekoliko narasla, napetost v točki maksimalne moči pa se je le toliko dvignila, da se je to poznalo tudi na generiranem električnem toku iz sledilnika.

Že na sliki 10 je tako lepo opaziti, da je sledilnik, ki deluje po načelu CV, popolnoma neprimeren za aplikacije, kjer lahko pride do senčenja modulov.

6 ZAKLJUČEK

V pričujočem prispevku sta predstavljena razvoj in testiranje sledilnika točki maksimalne moči za sončne panele na primeru komercialno dostopnega integriranega vezja, ki sledenje izvaja na osnovi splošno razširjenega algoritma Perturb & Observe. Izdelek prinaša ogromno izkušenj in idej, uporabnih pri izgradnji bolj optimiziranega sledilnika za uporabo pri brezpilotnih letalnikih.

ZAHVALA

Delo je bilo opravljeno v okviru doktorskega študija na Fakulteti za elektrotehniko, ki ga sofinancira Univerza v Ljubljani v okviru programa Javni razpis za sofinanciranje doktorskih študentov – generacija 2016.

LITERATURA

- [1] D. Hrovatin in A. Žemva, »Primerjava lastnosti baterij za podaljšanje avtonomije brezpilotnega letalnika Bramor«, Zbornik šestindvajsete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2017, 25.–26. september 2017, Portorož, Slovenija, A. Žemva, ur., A. Trost, ur. Ljubljana: IEEE Region 8, Slovenska sekcija IEEE, 2017, str. 15–18.
- [2] Sion Power [Online]. Dosegljivo: <https://sionpower.com>. [Dostopano: 27. 8. 2019].
- [3] Amicell [Online]. Dosegljivo: <https://www.amicell.co.il>. [Dostopano: 27. 8. 2019].
- [4] Kokam [Online]. Dosegljivo: <http://kokam.com>. [Dostopano: 27. 8. 2019].
- [5] Energy Density Of Gasoline [Online]. Dosegljivo: <https://hypertextbook.com/facts/2003/ArthurGolnik.shtml>. [Dostopano: 27. 8. 2019].

- [6] C-Astral d.o.o [Online]. Dosegljivo: <http://www.c-astral.com>. [Dostopano: 27. 8. 2019].
- [7] PV Portal, Sončne celice Companies [Online]. Dosegljivo: <http://pv.fe.uni-lj.si/Celice.aspx>. [Dostopano: 27. 8. 2019].
- [8] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis in N. C. Voulgaris. (2001). Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system. *IEEE Transactions on Power Electronics* [Online]. 16(1), str. 46–54. Dosegljivo: IEEE Xplore, <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.js>. [Dostopano: 9. 12. 2017].
- [9] Practical Guide to Implementing Solar Panel MPPT Algorithms [Online]. Dosegljivo: <http://www.microchip.com/wwwAppNotes/AppNotes.aspx?appnote=en561417>. [Dostopano: 1. 12. 2017].
- [10] R. Faraji, A. Rouholamini, H. R. Naji, R. Fadaeinedjad in M. R. Chavoshian. (2014). FPGA-based real time incremental conductance maximum power point tracking controller for photovoltaic systems. *IET Power Electronics* [Online]. 7(5), str. 1294–1304. Dosegljivo: IEEE Xplore, <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.js>. [Dostopano: 15. 1. 2018].
- [11] H. El-Khozondar, R. El-Khozondar, K. Matter in T. Suntio. (2016). A review study of photovoltaic array maximum tracking algorithms. *Renewables: Wind, Water, and Solar* [Online]. 3(1), str. 1–8. Dosegljivo: <http://www.jrenewables.com/content/3/1/3>. [Dostopano: 4. 3. 2018].
- [12] T. ESRAM in P. Chapman. (2007). Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion* [Online]. 22(2), str. 439–449. Dosegljivo: IEEE Xplore, <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.js>. [Dostopano: 9. 12. 2017].
- [13] A. Pallavee Bhatnagar in B. R. K. Nema. (2013). Conventional and global maximum power point tracking techniques in photovoltaic applications: A review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* [Online]. 5, str. 1–22. Dosegljivo: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4803524>. [Dostopano: 4. 3. 2018].
- [14] A. Jain, C. Jain, B. Singh, Kamal-Al-Haddad in A. Chandra. A dual tangent based algorithm for maximum power point tracking of solar PV systems. V 41st Annual Conference on the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 9–12 nov. 2015, Yokohama, Japan [Online]. Dosegljivo: IEEE Xplore, <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.js>. [Dostopano: 4. 3. 2018].
- [15] R. S. Sharma in P. K. Katti. Perturb & Observation MPPT algorithm for Solar Photovoltaic System. V International Conference on circuits Power and Computing Technologies (ICCPCT), 20–21 apr. 2017, Kollam, India [Online]. Dosegljivo: IEEE Xplore, <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.js>. [Dostopano: 29. 11. 2017].
- [16] Andrejašič, T. (2011). Analiza direktnih algoritmov za optimizacijo izrabe sončne energije v fotonapetostnih generatorjih. Doktorska disertacija, Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko.
- [17] A. Belkaid, I. Colak in O. Isik. (2016). Photovoltaic maximum power point tracking under fast varying of solar radiation. *Applied Energy* [Online]. 179(1), str. 523–530. Dosegljivo: ScienceDirect, <https://www.sciencedirect.com>. [Dostopano: 15. 1. 2018].
- [18] A. Al-Diab in C. Sourkounis. Improved Variable Step Size P&O MPPT Algorithm for PV Systems. V 51st Power Engineering Conference (UPEC), 6 - 9 Sept. 2016, Coimbra, Portugal [Online]. Dosegljivo: IEEE Xplore, <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.js>. [Dostopano: 21. 11. 2017].
- [19] L. Tang, W. Xu in C. Mu. (2017). Analysis for step-size optimisation on MPPT algorithm for photovoltaic systems. *IET Power Electronics* [Online]. 10(13), str. 1647–1654. Dosegljivo: IEEE Xplore, <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.js>. [Dostopano: 21. 11. 2017].
- [20] Genasun [Online]. Dosegljivo: <https://genasun.eu>. [Dostopano: 27. 8. 2019].
- [21] LT3652HV [Online]. Dosegljivo: <https://www.analog.com/en/products/lt3652hv.html>. [Dostopano: 27. 8. 2019].
- [22] LT8490 Data Sheet [Online]. Dosegljivo: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/8490fa.pdf>. [Dostopano: 27. 8. 2019].
- [23] Alta Devices [Online]. Dosegljivo: <https://www.altadevices.com>. [Dostopano: 27. 8. 2019].
- [24] Wikipedia, Shockley-Queisser limit [Online]. Dosegljivo: https://en.wikipedia.org/wiki/Shockley%E2%80%93Queisser_limit. [Dostopano: 27. 8. 2019].
- [25] Dejan Hrovatin in Andrej Žemva, Increasing the flying time of unmanned aerial vehicle with solar panels, *Proceedings Conference Midem*, str. 110–115, 2018.

Dejan Hrovatin je doktorski študent na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je v letih 2013 in 2016 diplomiral na magistriral. Njegova raziskovalna in razvojna dejavnost je usmerjena v načrtovanje in programiranje elektronskih vezij in sistemov, namenjenih za uporabo v brezpilotnih letalnikih.

Andrej Žemva je diplomiral, magistriral in doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani v letih 1989, 1993 in 1996. Njegova raziskovalna in razvojna dejavnost obsega načrtovanje digitalnih elektronskih vezij in sistemov, vgrajene sisteme ter sočasno načrtovanje strojne in programske opreme.