

MATEMATINIS SAULĖS ENERGIJOS SRAUTO MODELIS DIDŽIAUSIOS
GALIOS TAŠKO SAULĖS ELEMENTUOSE SEKIMO ALGORITMAMS TIRTIDominykas Vasarevičius¹, Modestas Pikutis²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹dominykas.vasarevicius@vgtu.lt; ²modestas.pikutis@vgtu.lt

Santrauka. Saulės elementai didžiausią galią sukuria tik tada, kai apkrova yra parinkta pagal elementą veikiantį saulės energijos srautą ir modulio temperatūrą. Apkrovai parinkti naudojamos didžiausios galios sekimo (DGTS) sistemos. Kintant oro sąlygoms šios sistemos nespėja prisitaikyti prie saulės elemento parametrų. Kuriant ir tiriant DGTS algoritmus tikslinga sudaryti matematinį modelį, imituojantį skirtingomis oro sąlygomis veikiančius saulės elementus. Pateikiami sudaryti saulės energijos srauto (SES), debesų dangos imitavimo ir saulės modulio matematiniai modeliai *Matlab/Simulink* terpėje. Lyginant modeliuoto debesuotą dieną SES kitimo dėsnius su realiais piranometru pamatuotais rezultatais nustatyta, kad modeliui imituojamas SES atitinka realųjį. Modelyje generuojamos SES vertės realiajame laike yra naudingos prognozuojant saulės jėgaines pagamintos elektros energijos kiekį. Modelyje numatyta galimybė išsaugoti SES signalą, todėl juo galima atlikti tikslų skirtingų DGTS algoritmų veikimo palyginimą.

Reikšminiai žodžiai: saulės energija, saulės elementai, didžiausios galios taško sekimas.

Įvadas

Europos Sąjungoje energija iš atsinaujinančios energijos šaltinių pagal bendrą energetinį balansą sudaro apie 13 %. Europos Sąjunga iki 2020 metų užsibrėžė iš šių šaltinių gaunamos energijos kiekį padidinti iki 20 %.

Per metus pasaulyje sunaudojama 12 TWh energijos. Saulės energija joje sudaro 0,4 %. Nepaisant to, tai yra viena iš sparčiausiai besivystančių atsinaujinančios energetikos sričių, kadangi į žemės paviršių per tris valandas patenka tiek saulės energijos, kiek žmonija suvartoja per visus metus. Saulės energijos naudojimas yra ekologiškas procesas, nes neiškraipo atmosferoje susidariusios energetinės pusiausvyros.

Saulės energijai paversti elektros energija dažniausiai naudojami silicio elementai, nes jų fizikinės ir technologinės savybės yra gerai ištirtos. Šių elementų trūkumai: nedidelis iki 20 % naudingumo koeficientas ir didelė kaina.

Todėl didžiausio efektyvumo siekiama ne tik gaminant pačius saulės elementus, bet ir projektuojant elektronines sistemas, valdančias energijos priėmimą iš elementų.

Saulės elementai dėl fizikinių savybių didžiausią galią sukuria tik tada, kai apkrova yra parinkta pagal elementą veikiantį saulės energijos srautą ir elemento temperatūrą. Tokią funkciją vykdo didžiausios galios taško sekimo (DGTS) sistemos.

Valdikliu, valdomu DGTS algoritmu, siekiama didžiausios galios įvertinant išorinius veiksnius: debesuo-

tumo kitimą, lietu, temperatūrą. Valdiklis sparčiai reaguoja į šiuos veiksnius. Juos įvertinus pakeičiama saulės elemento apkrova. Nuo apkrovos pakeitimo trukmės priklauso sistemos našumas (Sridhar *et al.* 2010).

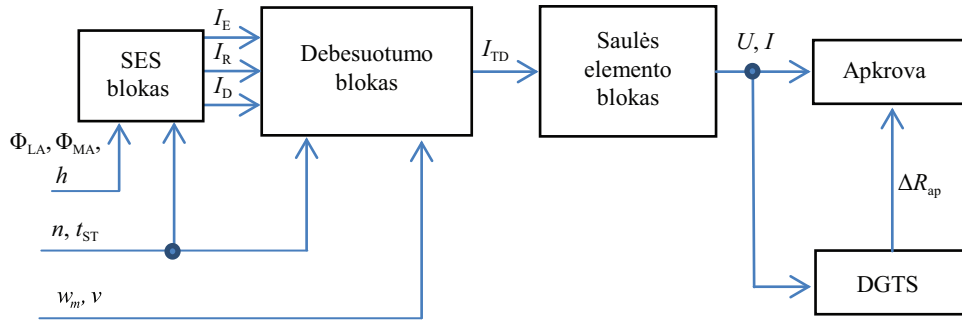
DGTS valdikliai iki 30 % padidina saulės elementų sistemos našumą. Dauguma šiuo metu naudojamų algoritmų turi trūkumą: sparčiai kintant oro sąlygoms algoritmai yra labai nestabilūs. Taigi DGTS algoritmų tobulinimas yra aktuali tolesnių tyrimų sritis.

DGTS algoritmų tyrimus apsunkina tai, kad jų trūkumai pasireiškia tik esant tam tikroms oro sąlygoms, kurių neįmanoma prognozuoti. Todėl eksperimentavimas su realiais maketais gali užtrukti labai ilgai. Eksperimentus galima paspartinti sudarant matematinius modelius, leidžiančius imituoti saulės elementus, DGTS algoritmus ir įvairias oro sąlygas.

Darbe pateikiamas matematinis saulės energijos srauto modelis didžiausios galios taško saulės elementuose sekimo algoritams tirti. Modelis leidžia imituoti debesų dangos poveikį SES signalui.

Modelio struktūrinė schema

Modelio struktūrinė schema pateikta 1 pav. Saulės energijos srautas (SES) modeliuojamas atitinkamame bloke. SES bloko išėjimo signalas I_T yra saulės energijos srautas,



1 pav. Matematinio modelio, skirto DGTS algoritams tirti, struktūrinė schema

Fig. 1. Structural diagram of a mathematical model for developing MPPT algorithms

krentantis į horizontalų žemės paviršių esant giedram dangui (Vasarevičius, Martavičius 2011). Dangaus debesuotumas imituojamas debesuotumo bloke slopinant signalą I_T . Debesuotumo bloko išėjimo signalas I_{TD} siunčiamas į saulės elemento bloką. I_{TD} signalas valdomas saulės elemento vietovės geografinės ilgumos ir platumos koordinatėmis Φ_{LA} , Φ_{MA} , elemento aukščiu virš jūros lygio h , metų dienos eilės numeriu n , paros laiku valandomis t_{ST} ir debesų slinkimo greičiu v_m . Imituojant saulės apšviesto elemento veikimą, saulės elemento bloko išėjime gaunama nuolatinė įtampa U ir per apkrovą tekanti srovė I , kurios priklauso nuo SES. Siekiant išlaikyti didžiausią galią, kurią saulės elementas atiduoda į apkrovą, DGTS algoritmas keičia apkrovos varžos dydį laipsniškai artėdamas prie didžiausios galios taško (Jiang *et al.* 2005).

Modelio aprašymas

SES blokas. Tiesioginis saulės energijos srautas modeliuojamas išraiška (Vasarevičius, Martavičius 2011):

$$I_E(n, t_{ST}) = I_S(n) \cdot \alpha(n, t_{ST}), \quad (1)$$

čia $I_S(n)$ – saulės energijos srautas virš atmosferos n -ąją metų dieną; $\alpha(n, t_{ST})$ – slopinimo atmosferoje koeficientas, įvertinantis aukštį virš jūros lygio; t_{ST} – saulės (vietos), laikas, $t_{ST} \in [0, 24]$, h.

(1) išraiška taikoma tiesioginiam SES, krentančiam į saulės elemento paviršių, pasvirusį φ laipsnių kampui ir pasuktą φ_p laipsnių nuo pietų krypties, apskaičiuoti. Saulės elementas taip pat generuoja elektrą iš atmosferoje išsklaidytos SES komponentės I_D ir atspindėtos nuo žemės paviršiaus komponentės I_R , kurios apskaičiuojamos pagal šias išraiškas (Masters 2004):

$$I_D(n, t_{ST}) = S \cdot I_E(n, t_{ST}) \cdot \left(\frac{1 + \cos \varphi}{2} \right), \quad (2)$$

$$I_R(n, t_{ST}) = \rho \cdot I_E(n, t_{ST}) \cdot (\sin \theta_z + S) \cdot \frac{1 - \cos \varphi}{2}, \quad (3)$$

čia S – difuzijos atmosferoje koeficientas; ρ – atspindžio nuo žemės paviršiaus (albedo) koeficientas; θ_z – saulės zenito kampas.

Visas SES, veikiantis saulės elemento paviršių visiškai giedrą dieną, apskaičiuojamas remiantis (1)–(3) išraiškomis taip:

$$I_T(n, t_{ST}) = I_E(n, t_{ST}) \cos \theta + I_D(n, t_{ST}) + I_R(n, t_{ST}), \quad (4)$$

čia θ – kampas tarp statmens į saulės modulio paviršių ir tiesiogiai krentančių saulės spindulių.

Debesuotumo blokas. Šis modelio blokas skirtas:

- įvairioms aplinkos sąlygoms imituoti;
- suteikti modeliui tikrovės, kai skaičiuojami mėnesio ir metų energijos, gautos iš saulės, kiekiai.

Debesuotumo imitacinis modelis sudarytas remiantis Lietuvos hidrometeorologijos centro duomenimis. Centro pateiktais duomenimis vidutinis metinis debesuotumas Lietuvoje yra 7,3 balo 11 balų skalėje. Tai reiškia, kad vidutiniškai 73 % dangaus skliauto yra padengta įprasto slopinimo debesimis. Giedriausia būna gegužės ir birželio mėnesiais (~4 balai), labiausiai apsiniaukę – spalio ir lapkričio mėnesiais (~8 balai).

Sudarant modelį remtasi beta skirstinių funkcijomis, pagal kurias generuojami atsitiktiniai skaičiai, atitinkantys pragiedrulių ir debesuotumo trukmę ir debesų slopinimo koeficientą. Remiantis minėtais debesuotumo rodikliais, sudarytas duomenų masyvas, kuris yra dvyliktos eilės vieno stulpelio matrica w_m . Čia $m = 1, 2, \dots, 12$ žymi mėnesio eilės numerį, kai $m = 1$ yra sausio mėnuo. Kiekvienas matricos w_m elementas yra skirstinio vidurkis m -ąjį mėnesį. Beta skirstinio formos koeficientai A ir B parenkami pagal vidurkio padėtį esant atitinkamai 1 ir 11 balų debesuotumui (Zekai 2008).

Tiriant DGTS algoritmus labai svarbu žinoti SES kitimo greitį ties debesų kraštais. Jam imituoti naudojamas Gauso filtras, kurio impulsinė charakteristika yra tokia:

$$h(t) = \frac{e^{-\frac{t^2}{2\delta^2}}}{\sqrt{2\pi} \cdot \delta}, \quad (5)$$

$$\delta = \frac{\sqrt{\ln(2)}}{2\pi \cdot B(v) \cdot T_s}, \quad (6)$$

čia $B(v)$ – filtro praleidžiamųjų dažnių juostos plotis, priklausantis nuo vėjo greičio v ; T_s – įėjimo signalo diskretizacijos periodas.

Vėjo greitis v apskaičiuojamas remiantis vidutinio vėjo greičiu v_m nagrinėjamą mėnesį ir statistiniu koeficientu $k(t)$ taip:

$$v = v_m k(t). \quad (7)$$

Keičiant praleidžiamųjų dažnių juostos plotį $B(v)$ imituojamas vėjo greičio poveikis debesuotumui. Imituojant mažą vėjo greitį, nustatoma siaura filtro praleidžiamųjų dažnių juosta. Tada saulės energijos srautas kinta lėtai. Dideliam vėjo greičiui imituoti praleidžiamųjų dažnių juosta turi būti plati. Šiuo atveju gaunamas staigus SES kitimas.

Debesuotumo bloke apskaičiuojamas SES dangaus skaidrumo koeficientas γ , kuris yra 1, kai dangus visiškai

skaidrus, ir 0, kai SES nepatenka tiesiogiai ant saulės elemento paviršiaus.

Debesų poveikis SES, veikiančiam saulės elemento paviršių, apskaičiuojamas taip:

$$I_{TD}(n, t_{ST}) = \gamma(I_E(n, t_{ST}) \cos \theta + I_R(n, t_{ST})) + e^{\gamma-1} I_D(n, t_{ST}). \quad (8)$$

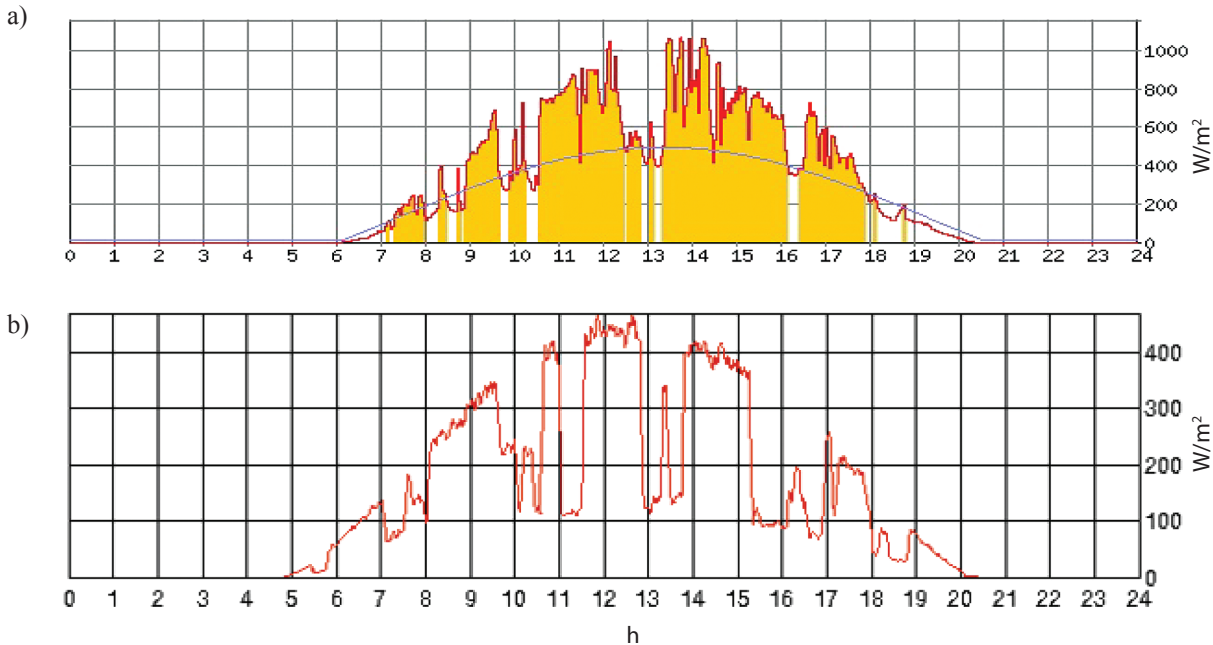
Iš (8) išraiškos matome, kad esant storam debesų sluoksniui ($\gamma = 0$) tiesioginis $I_E(n, t_{ST})$ ir atspindėtas SES nuo žemės paviršiaus $I_R(n, t_{ST})$ visiškai nuslopunami. Saulės elemento paviršių pasiekia tik apie 37 % išsklaidyto atmosferoje saulės energijos srauto.

Modelio patikros metu buvo palygintas debesuotą dieną piranometru išmatuotas SES ir apskaičiuotas pagal sukurtą modelį SES. Palyginimo rezultatai pateikti 2 pav. Iš paveikslo matyti, kad modeliavimo metu imituotas SES yra labai panašus realijai. Taigi modelis yra tinkamas DGTS algoritms tirti.

Saulės elemento blokas. Viename saulės elemente sukurta srovė I_{se} apskaičiuojama taip (Sridhar *et al.* 2010):

$$I_{se} = I_{tr} \left[1 - K_1 \left(e^{K_2 U_{se}^p} - 1 \right) \right], \quad (9)$$

čia I_{tr} – saulės elemento trumpojo jungimo srovė; U_{se} – įtampa saulės elemento išėjime.



2 pav. SES kitimas paroje debesuotą dieną: a) išmatuotas piranometru ir b) gautas modelio išėjime

Fig. 2. Solar insolation during a cloudy day: a) measured with a pyrometer; b) calculated using the model

Koeficientai K_1 , K_2 , ir p aprašomi tokiomis lygtimis:

$$K_1 = 0,01175, \quad (10)$$

$$p = \frac{\ln\left(\frac{K_3}{K_4}\right)}{\ln\left(\frac{U_{DGT}}{U_{tv}}\right)}, \quad (11)$$

$$K_2 = \frac{K_4}{U_{tv}^p}, \quad (12)$$

čia U_{tv} – saulės elemento tuščiosios veikos įtampa;

U_{DGT} – saulės elemento įtampa didžiausios galios taške.

$$K_3 = \ln\left(\frac{I_{tr}(1+K_1) - I_{DGT}}{K_1 \cdot I_{tr}}\right), \quad (13)$$

čia I_{DGT} – saulės elemento srovė didžiausios galios taške,

$$K_4 = \ln\left(\frac{1+K_1}{K_1}\right). \quad (14)$$

Remiantis (9) išraiška gaunama tipinė saulės elemento charakteristika, nepriklausanti nei nuo saulės energijos srauto, krintančio į elementą, nei nuo aplinkos temperatūros T_s . Kad saulės elemento modelyje būtų įvertinti šie veiksniai, apskaičiuotosios I_{se} ir U_{se} vertės koreguojamos taip:

$$I = I_{se} + \Delta I_{se}, \quad (15)$$

$$U = U_{se} + \Delta U_{se}, \quad (16)$$

čia I ir U – saulės elemento išėjimo srovė ir įtampa,

$$\Delta I_{se} = \alpha_{tr} \left(\frac{I_{TD}}{I_0}\right) \Delta T_s + \left(\left(\frac{I_{TD}}{I_0}\right) - 1\right) I_{tr}, \quad (17)$$

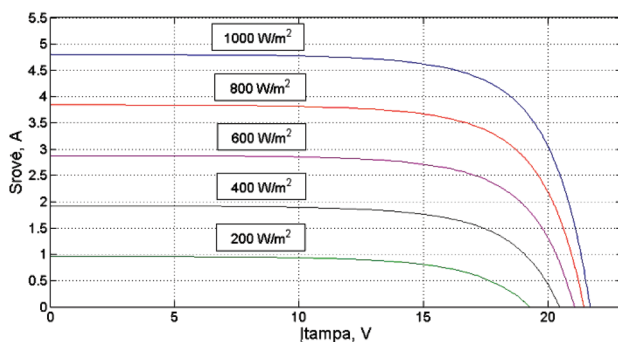
$$\Delta T_s = T_s - T_0, \quad (18)$$

$$U_{se} = R_{ap} I_{se}, \quad (19)$$

$$\Delta U_{se} = -\beta_{aj} \Delta T_s - R_s \Delta I_{se}. \quad (20)$$

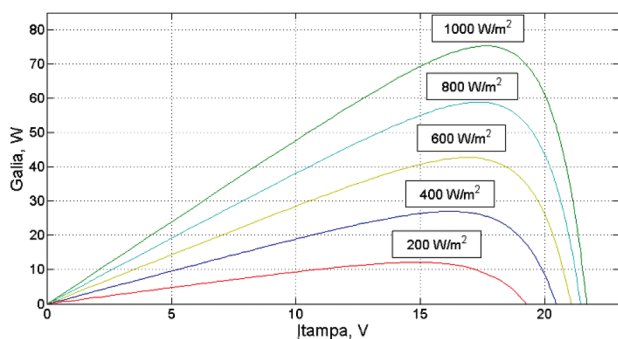
(17)–(20) išraiškose α_{tr} – trumpojo jungimo srovės temperatūros koeficientas; β_{tv} – tuščiosios veikos įtampos temperatūros koeficientas; R_s – nuoseklieji saulės elemento varža ir R_{ap} – saulės elemento apkrovos varža. $I_0 = 1000 \text{ W/m}^2$ ir $T_0 = 25^\circ \text{C}$ žymi saulės energijos srautą ir elemento temperatūrą standartinėmis bandymo sąlygomis. Skaičiavimams reikalingi duomenys randami beveik kiekviename gamintojo pateiktame saulės modulio apraše.

Modelių apskaičiuotos saulės elemento voltamperinės ir galios charakteristikos pateiktos 3 ir 4 pav. Paveiksluose



3 pav. Modeliuojamo saulės elemento voltamperinės charakteristikos esant skirtingiems SES

Fig. 3. Voltage-current characteristics of the modelled PV cell at different insolation levels



4 pav. Modeliuojamo saulės elemento galios charakteristikos esant skirtingiems SES

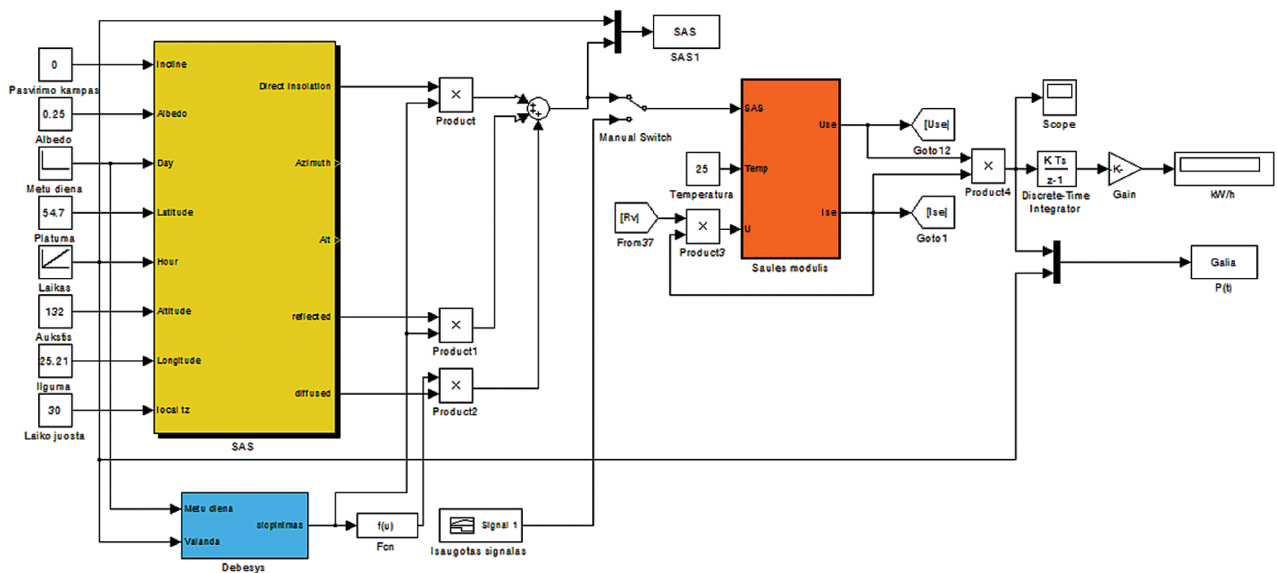
Fig. 4. Power characteristics of the modelled PV cell at different insolation levels

matyti, kad modelis atkartoja realiųjų saulės elementų charakteristikas (Markvart, Castaner 2003). Taigi modelis yra tinkamas saulės elementams tirti.

Aprašytas saulės elementų modelis ir pateikta jo struktūrinė schema (1 pav.). Modelis įgyvendintas *Matlab/Simulink* terpėje (5 pav.). *Matlab/Simulink* modelis sudarytas taip, kad tyrimams būtų galima naudoti realiuoju laiku generuojamą SES signalą ir išsaugotą SES signalą CSV failo pavidalu.

Generuojant SES signalą realiuoju laiku galima prognozuoti saulės jėgainėje pagamintos elektros energijos kiekį pasirinktoje vietoje per nustatytą laikotarpį.

Kadangi debesų slopinimo vertės generuojamos remiantis atsitiktinių skirstinių funkcijomis, kiekvieną kartą atliekant imitacinį skaičiavimą gaunamas kitoks rezultatas. Toks signalų kitimas yra neparankus, kai reikia palyginti kelių skirtingų DGTS algoritmų veikimą. Ši problema išsprendžiama išsaugant SES signalą CSV faile. Tai leidžia atkartoti visiškai tokias pačias sąlygas modeliuojant skirtingų DGTS algoritmų veikimą ir ištirti jų efektyvumą.



5 pav. Matlab/Simulink modelis, taikomas DGTS algoritmams tirti
 Fig. 5. Matlab/Simulink model for developing MPPT algorithms

Išvados

1. Dėl fizinių savybių saulės elementai didžiausią galią sukuria tik tada, kai apkrova yra parinkta pagal elementą veikiantį saulės energijos srautą ir jo temperatūrą. Tam naudojamos DGTS sistemos.
2. Tiriant DGTS algoritmus susiduriama su problema, kad jų trūkumai pasireiškia tik esant tam tikroms oro sąlygoms. Todėl tikslinga sudaryti matematinį modelį, leidžiantį imituoti skirtingomis oro sąlygomis veikiančius saulės elementus.
3. Sudaryti SES, debesų dangos imitavimo ir saulės elemento matematiniai modeliai *Matlab/Simulink* terpėje. Lyginant SES debesuotą dieną modeliavimo rezultatus su piranometru atliktais matavimais, nustatyta, kad modelio generuojamas signalas atitinka realius SES kitimo dėsnius.
4. Modelyje generuojamos SES vertės realiajame laike. Tai naudinga prognozuojant saulės jėgainės pagamintos elektros energijos kiekį. Naudojant išsaugotą SES signalą galima atlikti tikslų skirtingų DGTS algoritmų veikimo palyginimą.

Literatūra

Jiang, J., et al. 2005. Maximum power tracking for photovoltaic power systems, *Tamkang Journal of Science and Engineering* 2(8): 147–153.

Markvart, T.; Castaner, L. 2003. *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*. Elsevier Ltd. 1015 p.

Masters, G. M. 2004. *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. New Jersey: John Wiley & Sons. 676 p. <http://dx.doi.org/10.1002/0471668826>

Sridhar, R.; Jeevanathan, D. R., et al. 2010. Modeling of PV array and performance enhancement by MPPT algorithm, *International Journal of Computer Application* 7(5): 35–39.

Vasarevičius, D.; Martavičius, R. 2011. Solar irradiance model for solar electric panels and solar thermal collectors in Lithuania, *Electronics and Electrical Engineering* 2(108): 3–6.

Zekai, S. 2008. *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques: Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy*. London: Springer. 280 p.

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS FOR INVESTIGATING MAXIMAL POWER POINT TRACKING ALGORITHMS

D. Vasarevičius, M. Pikutis

Abstract

Solar cells generate maximum power only when the load is optimized according insolation and module temperature. This function is performed by MPPT systems. While developing MPPT, it is useful to create a mathematical model that allows the simulation of different weather conditions affecting solar modules. Solar insolation, cloud cover imitation and solar cell models have been created in Matlab/Simulink environment. Comparing the simulation of solar insolation on a cloudy day with the measurements made using a pyrometer show that the model generates signal changes according to the laws similar to those of a real life signal. The model can generate solar insolation values in real time, which is useful for predicting the amount of electrical energy produced from solar power. The model can operate with the help of using the stored signal, thus a comparison of different MPPT algorithms can be provided.

Keywords: solar power, solar cells, solar power, MPPT algorithms.