



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

**SAULĖS SPINDULIŲ KRITIMO KAMPO Į
FOTOELEKTRINĮ MODULĮ ĮTAKOS NAŠUMUI
VALDYMO GALIMYBIŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vaidotas Kazickas
Projekto autorius

Doc. dr. Jonas Valickas
Vadovas

Panevėžys, 2018



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

**SAULĖS SPINDULIŲ KRITIMO KAMPO Į
FOTOELEKTRINĮ MODULĮ ĮTAKOS NAŠUMUI
VALDYMO GALIMYBIŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Valdymo technologijos (621H66001)

Vaidotas Kazickas
Projekto autorius

Doc. dr. Jonas Valickas
Vadovas / Vadovė

Lekt.
Recenzentas

Panevėžys, 2018



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas
Vaidotas Kazickas

Saulės spindulių kritimo kampo į fotoelektrinį modulį įtakos našumui valdymo galimybių tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Vaidoto Kazicko, baigiamasis projektas tema „Saulės spindulių kritimo kampo į fotoelektrinį modulį įtakos našumui valdymo galimybių tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETO
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETO
TECHNOLOGIJŲ IR VERSLUMO KOMPETENCIJŲ CENTRAS**

TVIRTINU
TVKC vadovė
Nida Kvedaraitė

Diplomantui **Vaidotui Kazickui**

Baigiamojo projekto tema Saulės spindulių kritimo kampo į fotoelektrinį modulį įtakos
(lietuvių kalba)

našumui valdymo galimybių tyrimas

Baigiamojo projekto tema

(anglų kalba)

to Photovoltaic Panel Influence

Feasibility Study on Control Effectiveness of Solar Radiation Angle

Patvirtinta _____ m. _____ mėn. _____ d. dekanu potvarkiu Nr. _____.

Irišto baigiamojo projekto pateikimo į TVKC terminas iki 2018 m. gegužės 31 d.

Duomenys, reikalavimai ir sąlygos baigiamajam projektui

Baigiamojo projekto turinys / struktūra (išvardinti pagrindines BP dalis / uždavinius / klausimus, kurie turi būti atskleisti baigiamajame projekte)

1. Išsiaiškinti atsinaujinančių energijos išteklių panaudojimo aktualumą.
2. Išnagrinėti saulės judėjimo ypatybes.
3. Atlikti fotoelektrinio modulio literatūrinę analizę.
4. Ištirti saulės spindulių kritimo kampo ir modulio našumo priklausomybes (gauti valdymo charakteristikas).
5. Ištirti valdomų optinių įtaisų spindulių koncentravimo galimybes fotoelektrinio modulio našumui didinti.
6. Apskaičiuoti saulės judėjimo trajektorijas pasirinktoje valdymo sistemos vietoje.
7. Sukurti matematinį fotoelektrinio modulio modelį, modeliavimu patikrinti fizinių tyrimų duomenis, nustatyti sistemų koreliacijos koeficientą.
8. Pasiūlyti automatinės valdymo sistemos valdymo principus, sudaryti valdymo sistemos algoritmą.

Vadovas

Doc. dr. Jonas Valickas

(parašas, pareigos, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

Vaidotas Kazickas

(studento parašas, vardas, pavardė)

2018 m.

d.

Kazickas, Vaidotas. Saulės spindulių kritimo kampo į fotoelektrinį modulį įtakos našumui valdymo galimybių tyrimas. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Jonas Valickas; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas, technologijų katedra. Lietuvių kalba, 63 puslapiai, 46 paveikslėliai, 6 lentelės, 31 formulė.

Studijų kryptis ir sritis: elektronikos ir elektros inžinerija, technologijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: fotoelektrinis modulis, optiniai koncentravimo įtaisai, valdymo sistema, modeliavimas, algoritmas.

Panevėžys, 2018. 63 p.

SANTRAUKA

Šiandieninės klimato kaitos problemos vis labiau išryškina poreikį didinti atsinaujinančios energijos elementų našumą. Fotoelektrinių modulių efektyvumo didinimas yra svarbus veiksnys, siekiant didinti jų gaminamos energijos kiekį ir trumpinti pačių modulių ekonominio atsipirkimo laiką. Kintant saulės padėčiai dangaus skliaute, dėl saulės spinduliuotės kampo kitimo fotoelektrinio modulio atžvilgiu, prarandama nemaža dalis energijos, kuri galėtų būti paversta elektros energija. Viena iš priemonių, galinčių padidinti fotoelektrinių modulių efektyvumą – valdomi optiniai saulės spindulių koncentratoriai.

Šiame darbe išnagrinėta fotoelektrinių modulių efektyvumo problematika bei naudojant valdymo priemones bandymais nustatytos jų efektyvumo didinimo galimybės. Ištyrus saulės spindulių kritimo kampus į fotoelektrinio modulio paviršių be koncentratorių ir su jais - gaunamos koncentratorių erdvinio valdymo charakteristikos ir, taikant jas jų valdymui, ženkliai padidinamas pagaminamos elektros energijos kiekis.

Kazickas, Vaidotas. *Master's thesis in Feasibility Study on Control Effectiveness of Solar Radiation Angle to Photovoltaic Panel Influence* / supervisor assoc. prof. Jonas Valickas. Kaunas Technology University, Panevėžio technology and business faculty, Department of Technology. Lithuanian language, 63 pages, 46 images, 6 tables, 31 formulas.

Study field and area: Electronic and Electric Engineering, Technology Sciences.

Key words: photovoltaic module, optic concentration appliance, control system, simulation, algorithm.

Panevėžys, 2018. 63 p.

SUMMARY

Increasing the efficiency of photovoltaic modules is an important factor in increasing their energy production and shortening the time of economic returns of the modules themselves. As the sun changes to the cavity wall, due to the variation of the solar radiation angle in the photovoltaic module, a significant part of the energy that could be converted into electricity is lost. This work analyzed the efficiency of photovoltaic modules and the use of management tools for testing the efficiency of their effectiveness. One of the tools that can increase the efficiency of photovoltaic modules is controlled optical sunlight concentrators.

After examining the angle of incidence of sunlight on the surface of the photovoltaic module without a concentrator and with them - the characteristics of the spatial control of the concentrators are obtained. The results of physical tests are confirmed by simulation. The simulation was done by Matlab / Simulink software, the correlation coefficient of the obtained results corresponds to 91.41 percent. To maximize the efficiency of the photovoltaic module, the structure of the control system and its management algorithm are made.

TURINYS

IŽANGA	8
1. ŠIANDIENINĖ KLIMATO KAITOS PROBLEMA	10
2. SAULĖS JUDĖJIMO SEKIMAS	12
2.1. Saulės energijos potencialas	12
2.1. Saulės spinduliuotės sezoniskumas	14
2.3. Saulės padėties skaičiavimas	16
3. FOTOELEKTRINIŲ MODULIŲ ANALIZĖ	19
3.1. Fotoelektrinių elementų veikimo principas	19
3.2. Fotoelektrinių modulių tipai	21
3.3. Fotoelektrinio modulio efektyvumą lemiantys veiksniai	23
3.4. Fotoelektrinio modulio savybės ir panaudojimas	25
4. FOTOELEKTRINIO MODULIO ELEKTRINIAI PARAMETRAI	26
4.1. Fotoelektrinio modulio pagrindiniai elektriniai parametrai	26
4.2. Fotoelektrinio modulio matematinio modelio parametrai	30
5. TIRIAMOJI DALIS	34
5.1. Fotoelektrinio modulio našumo priklausomybė nuo į jo paviršių krentančių saulės spindulių kampo tyrimas	34
5.2. Optinių koncentratorių įtakos tyrimas	38
5.3. Fotoelektrinio modelio matematinis modeliavimas	42
5.4. Saulės judėjimo nustatymas.....	50
6. VALDYMO SISTEMOS PRINCIPAI	56
6.1. Fotoelektrinio modulio valdymo sistemos struktūra	56
6.2. Sistemos valdymo algoritmas	58
IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS	60
LITERATŪRA	61
PRIEDAI	64

IŽANGA

Šiomis dienomis, pasaulyje didėjant elektros energijos suvartojimui, kasmet stiprėjant klimato kaitai, labai svarbūs tampa alternatyvieji atsinaujinantys energijos šaltiniai. Šie šaltiniai gali pakeisti iškastinio kuro elektrines, kurios yra viena iš pagrindinių ekologijos užteršimo priežasčių. Šių šaltinių ir technologijų vystymosi sparta pasaulyje rodo vis didėjantį žmonių supratimą, kad laikas keisti elektros energijos gamybos technologijas.

Yra daugybę argumentų, kodėl privalome skatinti įvairių atsinaujinančių energijos išteklių naudojimą, bet pirmiausia didžiausią dėmesį reiktų atkreipti į aplinkos taršą ir klimato kaitą, kurias sukelia šiltnamio efektą sukeliančios dujos. Anglis, dėl kurios į atmosferą patenka daugiausia anglies dvideginio, visų pirma naudojama kaip kietas kuras elektros energijai gaminti. Ne mažiau kaip 40 procentų pasaulio elektros energijos išgaunama anglimi kūrenamose elektros elektrinėse [1]. Visame energetikos sektoriuje, kuriame sunaudojama daugiausiai viso pasaulio iškasamos akmens anglies, tarša aplinkai anglies dvideginiu yra didžiausia [1].

Žinant didžiulį saulės energijos potencialą, viena greičiausiai pasaulyje besivystančių energetikos sričių yra fotoelektrotechnika. Saulės energijai paversti į elektros energija naudojami fotoelektriniai moduliai. Fotoelektrinių modulių efektyvumo didinimas yra svarbus veiksnys, siekiant didinti jų gaminamos energijos kiekį ir trumpinti pačių modulių ekonominio atsipirkimo laiką. Kintant saulės padėčiai dangaus skliaute, dėl saulės spinduliuotės kampo kitimo fotoelektrinio modulio atžvilgiu, prarandama nemaža dalis energijos, kuri galėtų būti paversta elektros energija. Viena iš priemonių, galinčių padidinti fotoelektrinių modulių efektyvumą – valdomi optiniai saulės spindulių koncentatoriai.

Šiame darbe išnagrinėta fotoelektrinių modulių efektyvumo problematika bei naudojant valdymo priemones bandymais nustatytos jų efektyvumo didinimo galimybės. Ištyrus saulės spindulių kritimo kampus į fotoelektrinio modulio paviršių be koncentratorių ir su jais - gaunamos koncentratorių erdvinio valdymo charakteristikos ir, taikant jas jų valdymui, ženkliai padidinamas pagaminamos elektros energijos kiekis. Optinių koncentratorių taikymas fotoelektrinio modulio sistemoje efektyvumą padidina net iki 36 procentų.

Fotoelektrinis modulis buvo tyrinėjamas laboratorinėmis sąlygomis, naudojant galingus 500 vatų galingumo halogeninius šviesos šaltinius, kurių fiziniai parametrai šiek tiek skiriasi nuo natūralių. Fizinių bandymų rezultatai patvirtinti modeliavimu. Modeliuojant fotoelektrinį modelį gautų rezultatų koreliacijos koeficientas atitinka 91,41 procento.

Darbo objektas: fotoelektrinis modulis

Darbo tikslas: išsiaiškinti saulės spindulių kritimo ir fotoelektrinio modulio efektyvumo priklausomybes, naudojant papildomus optinius įtaisus ištirti spindulių koncentravimo galimybes, remiantis gautomis valdymo charakteristikomis sudaryti automatinės valdymo sistemos modelį didžiausiam modulio našumui pasiekti.

Darbo uždaviniai

1. Ištirti saulės spindulių kritimo kampo ir fotoelektrinio modulio efektyvumo priklausomybes.
2. Ištirti optinių įtaisų spindulių koncentravimo galimybės fotoelektrinio modulio našumui didinti.
3. Sudaryti fotoelektrinio modulio matematinį modelį. Atlikti modeliavimą.
4. Nustatyti saulės judėjimo trajektorijas pasirinktoje valdymo sistemos vietoje.
5. Parinkti saulės sekimo sistemos valdymo principus, sudaryti valdymo algoritmą.

Darbo metodai: literatūros analizė, modeliavimas ir eksperimentiniai tyrimai.

Darbą sudaro įžanga, 6 skyriai, išvados ir rekomendacijos, naudotos literatūros sąrašas, 4 priedai, 46 paveikslėliai, 6 lentelės. Darbo apimtis – 63 puslapiai. Literatūros sąrašą sudaro 33 šaltiniai.

1. ŠIANDIENINĖ KLIMATO KAITOS PROBLEMA

Tarša žemės atmosferoje dėl šiltnamio dujų yra viena iš pagrindinių problemų ir priežasčių, naikinančių mūsų planetos ekosistemą, klimatą ir visą infrastruktūrą. Yra daugybę argumentų, kodėl privalome skatinti įvairių atsinaujinančių energijos išteklių naudojimą, bet pirmiausia didžiausią dėmesį reiktų atkreipti į aplinkos taršą ir klimato kaitą, kurias sukelia šiltnamio efektą sukeliančios dujos.

Šiltnamio efektas susidaro saulės spinduliams šildant žemės paviršiu ir kylant temperatūrai šiluma, infraraudonųjų spindulių pavidalu, išspinduliuojama atgal į atmosferą, o dujos sulaiko šiuos spindulius grąžindamos atgal į žemę. Šis efektas planetoje dėl natūralių procesų vyksta nuo neatmenamų laikų, tačiau dėl žmogaus vykdomos veiklos, šį efektą sukeliančių dujų, ypač anglies dvideginio, metano ir azoto, į atmosferą išmetama tūkstančius kartų daugiau nei dėl natūralių procesų. Tai įtakoja šio efekto didėjimą ir pasaulinės temperatūros kylimą.

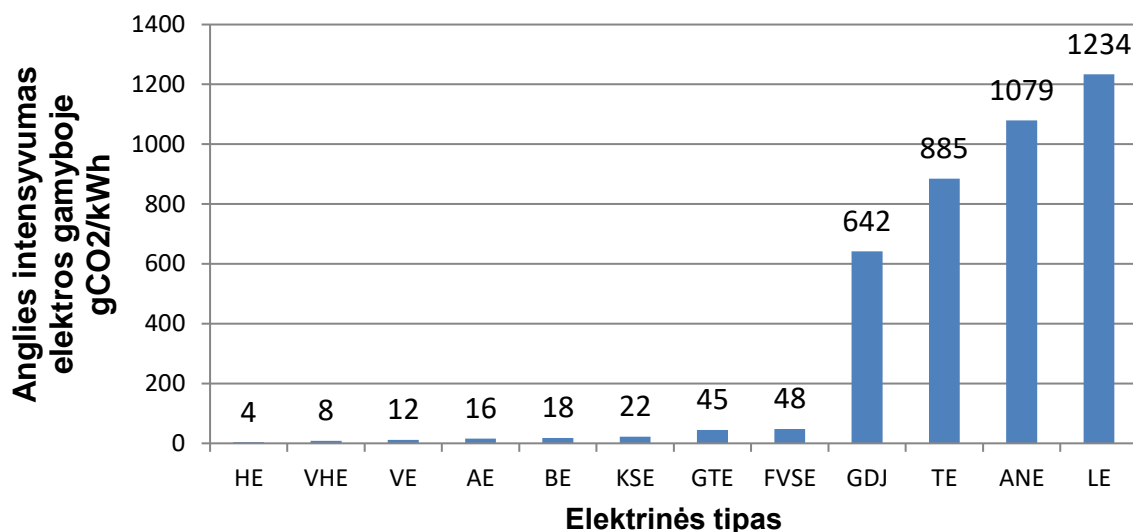
Didėjanti anglies dvideginio koncentracija taip pat žalinga ir žmonėms. Didžiuosiuose, labiausiai apgyvendintuose pasaulio miestuose, kuriuose pramonės industrija ir transportas dėl masinio vartojimo išmeta didžiausius kiekius anglies dvideginio, žmonės kenčia nuo kvėpavimo takų ligų. Fiksuojama, kad per metus užterštas oras šiose miestuose nusineša apie 4 000 žmonių gyvybių [2]. Remiantis Jungtinių Amerikos Valstijų nacionaline vandenynų ir atmosferos tyrimų administracija (NOAA), jau pasiekta gresminga 400 milijonų tonų anglies dvideginio emisijos atmosferoje riba, dėl kurios mūsų planetoje prasidėjo negrįžtami procesai [3].

Anglis, dėl kurios į atmosferą patenka daugiausia anglies dvideginio, naudojama kaip kietas kuras elektros energijai gaminti. Pasaulio anglies suvartojimas dabar yra apie 7,50 milijardų tonų per metus ir prognozuojama, kad iki 2030 metų jos suvartojimas turėtų pasiekti apie 9,05 milijardų tonų [1].

Gausybe dokumentų, pateiktų Paryžiuje vykusioje tarptautinėje klimato kaitos konferencijoje COP21, kurioje dalyvavo 195 pasaulio šalys, patvirtina, kad privaloma mažinti iškastinio kuro naudojimą elektros energijos gavyboje ir kitose energetikos sektoriuose. Taip pat, kuo įmanoma greičiau, pereiti prie atsinaujinančių energijos šaltinių [4]. Šie šaltiniai turi didžiulį pranašumą prieš anglį ir kitą iškastinį kurą, lyginant santykinį medžiagų sunaudojimą gramais vienai kilovatvalandžiai pagaminti.

Kaip pavaizduota pirmame paveikslėlyje (žr. 1 pav.), matomas didžiulis skirtumas tarp atsinaujinančios energijos hidroelektrinių (HE), vandens hidroelektrinių (VHE), vėjo elektrinių (VE), biokuro elektrinių (BE), koncentruotos saulės elektrinių (KSE), geoterminių elektrinių (GTE) fotovoltinių saulės elektrinių (FVSE) ir iškastinio kuro gamtinių dujų jėgainių (GDJ),

termofikacinių elektrinių (TE), anglies elektrinių (ANE), lignito elektrinių (LE) į atmosferą išmetamo anglies dvideginio kiekio [2].



1 pav. Elektros energijos gamybos technologijų palyginimas su CO₂ intensyvumu [2 p. 18]

Pripažįstama, kad atsinaujinantys išteklių yra kone vienintelė reali ilgalaikė perspektyva pakeičiant organinį iškastinį kurą. Sparčiam šio energetikos sektoriaus plėtojimui įtakos turi tokie veiksniai kaip iškastinio kuro kainos kylimas, valstybių energetinio saugumo ir nepriklausomybės siekiai, globalinė klimato kaita, ekonomikos vystymasis bei aplinkos taršos mažinimo būtinybė. Šio sektoriaus plėtrai susidaro vis palankesnės sąlygos, kurias lemia daugybę anksčiau minėtų veiksnių.

Pastaraisiais metais smarkiai krito saulės elektrinių gaminamos energijos įkainiai. Saulės spindulių pagalba gaminama elektra priartėjo prie ribos, kai galės konkuruoti su visomis kitomis elektrinėmis be jokios paramos. Vienas svarbiausių veiksnių atsinaujinančiu energijos ištekliu pagrindu elektros energijos gamybos plėtrai yra ekonomiškumas. Išlaidos saulės elektrinių elementams, baterijoms, naudojamoms kaupti saulės pagamintai elektros energijai, sparčiai krenta. Fotelektrinių plėtros mastai atspindi saulės energijos potencialą. Auga žmonių sąmoningumas apie destruktivų iškastinio kuro poveikį biosferai, žmonių sveikatai ir klimato kaitai [2].

2. SAULĖS JUDĖJIMO SEKIMAS

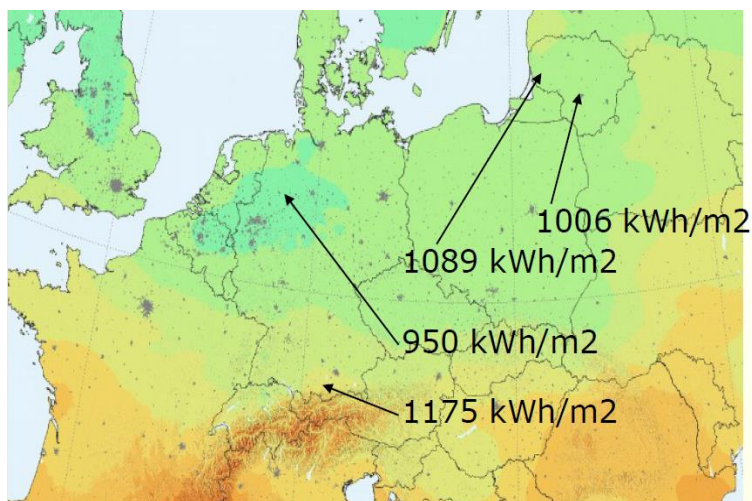
2.1. Saulės energijos potencialas

Saulės energijos iš visų atsinaujinančių energijos išteklių yra daugiausia. Nors iš saulės išspinduliuota energija patenka į žemę ne visa, dalį jos atspindi atmosfera, o dalis jos susigeria į atmosferą, žemę ir vandens telkinius. Tačiau žemei tenkanti dalis yra daugybę kartų didesnė už daugiausia potencialo iš atsinaujinančių šaltinių turinčio vėjo ar bet kokios kitos rūšies iškastinio kuro pagrindu gaunamos energijos [7].

Saulės energijos yra švari, neišsenkanti, neteršianti aplinkos. Ši energija pasiekama visame pasaulyje, todėl technologijų plėtra fotoelektros energetikos sektoriuje turi ilgalaikės naudos. Saulės energijos technologijų naudojimas skatina šalių energetinį saugumą ir nepriklausomybę, tai neišsenkantis ir didžiausias išteklius nepriklausomas nuo jokių išgaunamų bet kokios kitos rūšies išteklių. Visos saulės energijos, absorbuojamos žemėje per vieną valandą, yra daugiau nei pasaulyje sunaudojama elektros energijos per vienerius metus [8].

Sugertos ir atspindėtos saulės energijos kiekis priklauso nuo spindulių nueito kelio per atmosferą iki žemės paviršiaus. Oro masės indeksas (AM) aprašo šį spindulių nueitą kelią nuo viršutinio atmosferos sluoksnio iki jūros lygio. Oro masės indeksas keičiasi nuo temperatūros ir drėgmės santykio ir skirtingose vietovėse yra nevienodo tankio. Tai lemia spindulių nueinamą kelią ir apšvitą žemės paviršiuje. Oro masės indekso atskaitos taškas yra vienetas ir jis nurodo statmenai į žemės paviršių krentančius saulės spindulius. Indeksas tampa didesnis už vienetą, kai spinduliai krenta kampu. Nuo oro masės pradinės reikšmės nulio iki atskaitos taško vertės vieneto saulės intensyvumas dėl atmosferos spindulių sugertiems sumažėja apie 30 procentų. Taip pat oro masė proporcinga zenito kampui. Šis kampas nurodo kampą tarp saulės spindulių krentančių į objektą ir vertikalės ir žymimas simboliu θ_z . Žinant, kad į fotoelektrinį modulį krentantys spinduliai visada sudarys kampą, jo parametrai pateikiami standartinėmis testavimo sąlygomis, kuriomis oro masės indeksas lygus 1,5 (AM1,5) [9].

Geografija taip pat veikia saulės energijos potencialą. Sritys, kurios yra arčiau pusiaujo, turi didesnius kiekius saulės spinduliuotės. Fotoelektrinių modulių valdymo sistemų naudojimas, kurios seka saulės poziciją danguje, ženkliai padidina saulės energijos potencialo išnaudojimą ir tuose regionuose, kurie yra nutolę toliau nuo pusiaujo. Saulės spinduliuotė Europos Sąjungos žemyne pasiskirsčiusi netolygiai ir skirtingose valstybėse gaunama apšvita yra nevienoda (žr. 2 pav.).



2 pav. Saulės energijos potencialas Europos šalyse [9]

Pagal šį žemėlapi Lietuvai tenka toks pat kiekis saulės energijos kaip ir Vokietijai ir daugumai kitų vakarų Europos valstybių.

Saulės apšvita nuolat kinta priklausomai nuo meteorologinių sąlygų, dienos ir metų laiko. Energijos kiekis, gautas per tam tikrą laiką iš spindulių, vadinamas saulės ekspozicija, kuri matuojama kilovatvalandėmis kvadriniame metre (kWh/m^2) [12]. Lietuvoje hidrometeorologijos stotyse matuojama saulės spindėjimo trukmė. Naudojantis daugiamečiais saulės spindėjimo trukmės duomenimis gana tiksliai nustatoma tos vietovės saulės energijos išteklių. Vidutiniai metiniai Lietuvos saulės energijos išteklių pagal vietovę pateikiami pirmoje lentelėje (žr. 1 lent.).

1 lentelė

Saulės spinduliuotė įvairiose hidrometeorologijos stotyse Lietuvoje [10]

Eil. Nr.	Vietovė	Saulės spinduliuotė per metus, kWh/m^2
1.	Vilnius	939
2.	Kaunas	976
3.	Klaipėda	1013
4.	Telšiai	1018
5.	Biržai	926

Pagal duomenis pateiktus pirmoje lentelėje galima teigti, kad Lietuvai per metus tenka apie $1\ 000\ \text{kWh/m}^2$ saulės energijos. Lyginant su Vokietija, kuri saulės energijos virsmo į elektrą technologijose yra pirmaujanti ne tik Europoje, bet ir visame pasaulyje, Lietuvai tenka ne ką mažesni saulės energijos resursai. Taigi šios energijos išteklių Lietuvoje yra pakankami plėtoti saulės energetiką.

Saulės apšvita – tai matavimo vienetas, apibūdinantis kintantį šviesos srautą į paviršių ir matuojamas vatais tenkančiais vienam kvadratiniam metrui (W/m^2). Plėtojant saulės energijos sistemas svarbu žinoti, kaip kinta saulės spinduliuotė visais metų laikais atsižvelgiant į sezoniškumą. Remiantis Saulės spinduliuotės atlaso, sudaryto Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos, duomenimis, antroje lentelėje pateiktas vidutinis kiekvieno mėnesio saulės spinduliuotės kiekis 1991 - 2014 metų laikotarpiu Panevėžio mieste (žr. 2 lent.).

2 lentelė

Vidutinis saulės spinduliuotės kiekis Panevėžio mieste skirtingais mėnesiais [10]

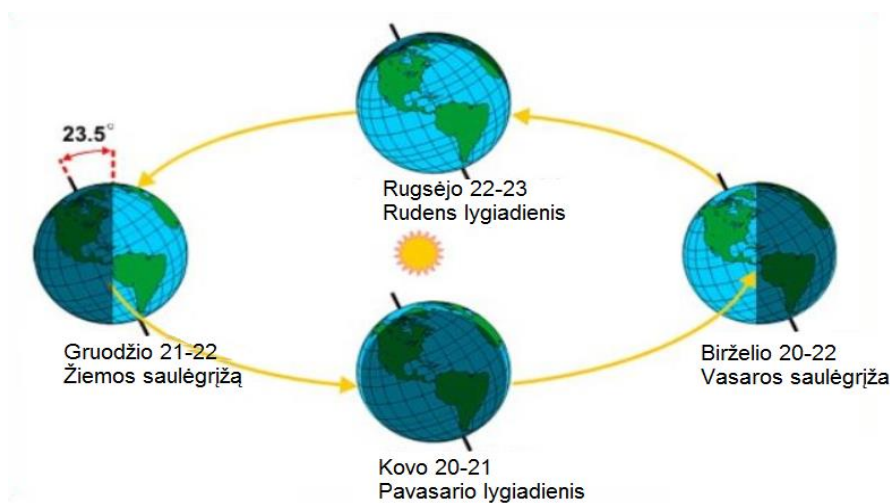
Eil. Nr.	Mėnuo	Vidutinis saulės spinduliuotės kiekis, W/m^2
1.	Sausis	11
2.	Vasaris	28
3.	Kovas	68
4.	Balandis	98
5.	Gegužė	157
6.	Birželis	176
7.	Liepa	184
8.	Rugpjūtis	132
9.	Rugsėjis	82
10.	Spalis	49
11.	Lapkritis	10
12.	Gruodis	5

Saulės apšvita apibūdina krentančia saulės šviesą į plokštumą, ir šie parametrai priklauso tik nuo oro sąlygų, metų laiko ir vietovės, nes šių parametrų vertės taip pat gali kisti atsižvelgiant į susidariusį šešėlį paviršiuje. Remiantis saulės apšvitos duomenimis ilguoju periodu galimas tikslesnis fotoelektrinių sistemų optimalus valdymas, tai leidžia pasiekti didesnę efektyvumą tinkamai surenkant šios rūšies energiją.

2.1. Saulės spinduliuotės sezoniškumas

Saulės spinduliuotės sezoniškumas žemėje priklauso nuo žemės judėjimo aplink saulę. Žemė aplink saulę juda elipse ir apsisuka aplink ją per vienerius metus. Taip pat žemė per vieną dieną apsisuka aplink savo ašį. Žemės sukimosi ašis, lyginant su jos judėjimo plokštuma, pasvirusi

23,45 laipsniu kampu, o tai lemia skirtingą saulės padėtį atsižvelgiant į metų sezoną, todėl vasarą saulę matome aukščiau nei žiemą (žr. 3 pav.). Priklausomai nuo metų laiko tai taip pat lemia skirtingą valandų skaičių per dieną, per kurią saulės apšvita krenta į žemės horizontalę.



3 pav. Žemės judėjimas aplink saulę, jos sezono laikai ir sukimosi ašies pokrypis [13]

Saulės nuokrypio kampas nuo pusiaujo vadinamas deklinacijos nuokrypiu kuris žymimas δ . Saulei esant šiaurinėje pusiaujo pusėje nuokrypis aprašomas teigiamai, saulei esant pietinėje dalyje – neigiamai. Šis parametras labai svarbus siekiant nustatyti saulės koordinates danguje bet kurioje žemės vietoje, bet kuriuo laikotarpiu ir bet kurią metų dieną. Nuokrypio kampas bet kurią metų dieną (n) randamas pagal lygtį:

$$\delta = 23,45^{\circ} \sin \left[\frac{360(n - 80)}{365} \right]; \quad (1)$$

čia δ – saulės nuokrypio kampas;

n – pasirinkta metų diena.

Žinant geografinę platumą randamas laikas, per kurį saulės padėtis vidudienį bus aukščiausia. Para turi 24 valandas, per kurias žemę apsisuka aplink savo ašį 360 laipsniu kampu. Iš šios informacijos galima teigti, kad saulė per vieną valandą pasisuka 15 laipsniu. Pagal laiko matavimo metodiką, geografinėje ilgumoje ties 0 laipsniu saulės vidurdienis sutampa su laikrodžio vidurdieniu. Žinant, kad saulė pasisuka kas 15 laipsniu, galima apskaičiuoti saulės padėtį tarpinėse žemės geografinėse ilgumose. Lietuva yra antroje laiko juostoje (GMT+2), tai reiškia, kad jos geografinė ilguma atitinka 30 E laipsnių ilgumą. Žinant tikslią objekto ilgumos padėtį, laikas, per kurį saulė bus aukščiausiame taške, randamas pagal šia formulę [14]:

$$t = \frac{30 - E_0}{15^{\circ}} 60; \quad (2)$$

čia t – laikas, per kurį saulė pasiekia aukščiausią tašką dienoje, min;

E_0 – pasirinktos vietos ilgumos koordinatės, laipsniais.

Žinant nuokrypio kampą ir platumos reikšmes randamas zenito kampas pagal lygtį:

$$\theta_z = \phi - \delta; \quad (3)$$

čia θ_z – zenito kampas;

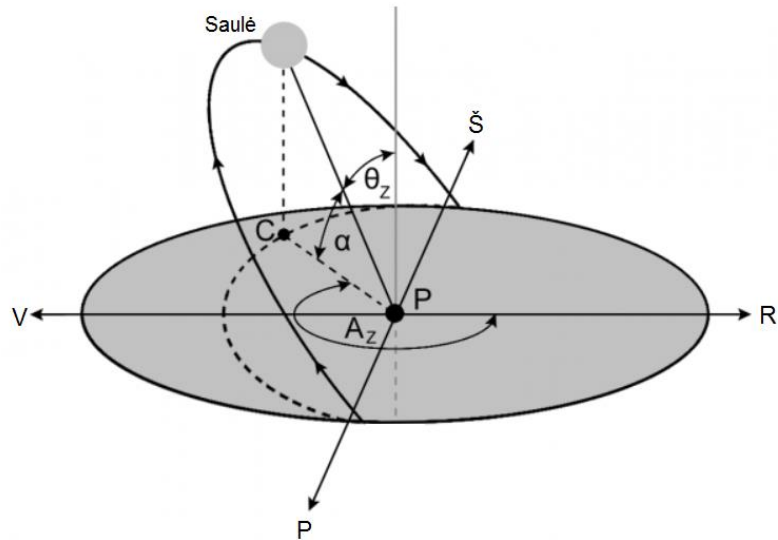
ϕ – kampas nuo pusiaujo.

Ši lygtis naudojama norint nustatyti aukščiausią saulės padėtį vidurdienį bet kurią metų dieną. Kai saulės nuokrypio kampas ir platumos vertės sutampa, zenito kampas tampa lygus nuliui. Tik tokiu atveju ši lygtis galima, nes visais kitais atvejais, kai saulė nuo vidurdienio pasisuka nebesudarydama stataus kampo su vertikale, zenito kampas įgauna reikšmę.

Taip pat žinant žemės ašies pakrypimą iš 3 lygties galima nustatyti aukščiausią saulės pasiektą padėtį danguje kai zenito kampas $\theta_z = \phi - 23,45^{\circ}$. Tuomet žemiausia vidurdienio saulės padėtis analogiškai bus, kai zenito kampas $\theta_z = \phi + 23,45^{\circ}$ ir tenkinant sąlyga $\phi > 23,45^{\circ}$. Tuomet, kai kampas nuo pusiaujo $\phi < 23,45^{\circ}$, zenito kampas vasaros sezonu gali įgyti neigiamas reikšmes. Tai reiškia, kad saulė vidurdienį pasirodys kairėje nuo pusiaujo [14].

2.3. Saulės padėties skaičiavimas

Saulės pozicija danguje nustatoma žinant atstumą nuo žemės iki saulės ir surandant saulės aukštį nuo horizonto ir azimutą. Azimutas - tai kampas tarp objekto ir šiaurės krypties horizontalės. Kampas tarp horizonto ir krintančių saulės spindulių į stebimą objektą, apibūdinamas kaip saulės aukštis ir žymimas α . Taip pat saulės padėti nustatyti naudojamas ankščiau aprašytas zenito kampas (žr. 4 pav.) [15].



4 pav. Saulės padėtį nusakantys kampai: Saulės aukštis α ; azimutas A_z ; zenitas θ_z ; P stebimo objekto padėtis.

Saulės aukščio kampas randamas iš lygties:

$$\alpha = \sin^{-1}[\sin\delta\sin\varphi + \cos\delta\cos\varphi\cos h]; \quad (4)$$

čia α – saulės aukštis;

h – vidurdienio padėties skirtumo kampas.

Saulės patekėjimo kampą randame pagal šią lygtį:

$$h = \cos^{-1} - \tan\phi \tan\delta ; \quad (5)$$

Vidurdienio padėties skirtumo kampas išreiškiamas:

$$h = \frac{12 - T}{24} 360^\circ = 15(12 - T)^\circ ; \quad (6)$$

čia T – dienos laikas valandomis.

Iš 4, 5, 6 lygčių žinant gautus reikiamus parametrus, randamas azimuto kampas:

$$\gamma = \cos^{-1} \left[\frac{\sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \sin \varphi \cosh}{\cos \alpha} \right]; \quad (7)$$

Azimuto kampą pagal laiką nuo šiaurės rekomenduoja ISO 19115 standartas. Skaičiavimai nurodo saulės poziciją danguje laipsniais. Dauguma kompiuterinių sistemų ir programinių kalbų priima ir supranta kampus radianais, ir dauguma trigonometrijos skaičiavimo funkcijų supranta kampus tik radianais. Taigi parametų keitimas iš laipsnių į radianus reikalingas visiems kampų skaičiavimams įskaitant saulės valandos kampą, saulės nusileidimo kampo ir platumos. Saulės aukščio kampas keičiamas į radianus:

$$\alpha = \frac{\sin \delta^{-1} [\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cosh] \pi}{180}; \quad (8)$$

Azimuto kampas keičiamas į radianus:

$$\gamma = \cos^{-1} \frac{[\sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \sin \varphi \cosh] \pi}{\cos \alpha \cdot 180}; \quad (9)$$

Taip pat optimaliam saulės spindulių surinkimui į plokštumą reikia žinoti dienos šviesiojo periodo pradžia ir pabaigą. Saulės patekėjimo lygtis aprašoma [29]:

$$S_{patekejimo} = 12 - \frac{1}{15} \cos^{-1} \left(\frac{-\sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \sigma} \right); \quad (10)$$

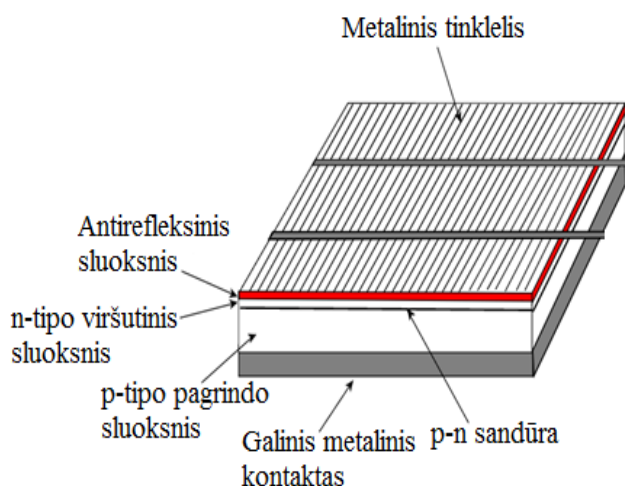
Taip pat saulės nusileidimo už horizonto laiką randame iš lygties:

$$S_{nusileidimo} = 12 + \frac{1}{15} \cos^{-1} \left(\frac{-\sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \sigma} \right); \quad (11)$$

3. FOTOELEKTRINIŲ MODULIŲ ANALIZĖ

3.1. Fotoelektrinių elementų veikimo principas

Saulės išspinduliuotos elektromagnetinės bangos sukelia fotoelektrinį efektą. Fotovoltinio elemento silicio plokštelė sugeria saulės išspinduliuotas bangas ir saulės energiją paverčia į nuolatinės srovės elektros energiją. Šį prietaisą sudaro du puslaidininkiu sluoksniai, kurie sudaro p-n sandūrą, du metaliniai elektrodai ir sluoksnis, mažinantis spindulių atsispindėjimą nuo fotoelemento (žr. 6 pav.). Puslaidininkiniuose sluoksniuose, dėl didžiausio efektyvumo, paprastai naudojamas silicis, bet pasitaiko ir kitų cheminių elementų. Siekiant palaikyti tokį efektyvumą ir sumažinti krūvininkų rekombinaciją, kontaktai papildomai legiruojami. P – tipo puslaidininkiniame silicije legiravimui dažniausiai naudojamas boras ir aliuminis, o n - tipo puslaidininkiniame silicije dažniausiai naudojamas fosforas ar arsenas [16].



6 pav. Fotovoltinio elemento sandara [17 p. 518]

Fotoelemento viršutinėje dalyje suformuotas metalinis tinklelis, pro kurį šviesa patenka į puslaidininkį, apačioje metalinis kontaktas. Saulei apšvietus puslaidininkio sluoksnio p - n sandūrą, šviesos fotonai išmusa silicio plokštelėje esančius elektronus iš atomų. Fotonų energija apskaičiuojama:

$$E_{\lambda} = \frac{hc}{\lambda}; \quad (12)$$

čia E_{λ} – fotonų energija, J;

h – planko konstanta, $6,62 \cdot 10^{-34}$ J·s;

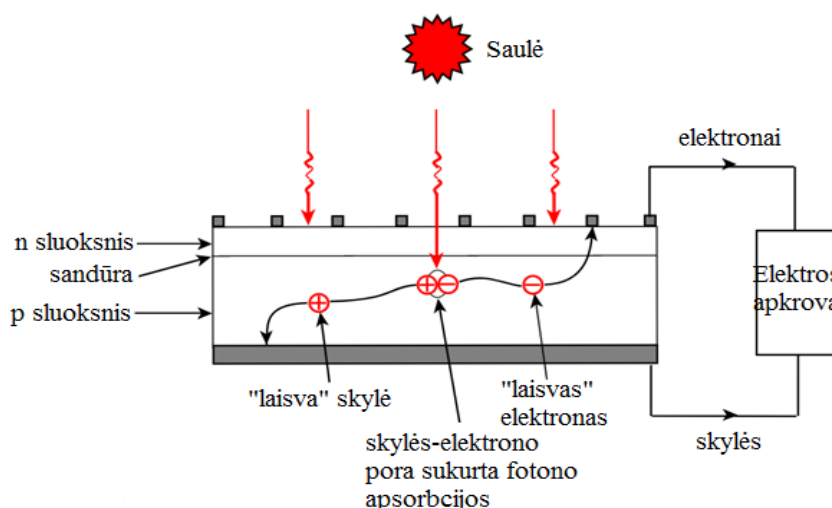
c – šviesos greitis, $3 \cdot 10^8$ m/s;

λ – fotono bangos ilgis, m.

Elektronai išmušami iš atomu tik tuo atveju, jeigu fotono energija lygi arba didesnė už silicio puslaidininkio draustiniosios energijos juostos plotį. Šis draustiniosios energijos juostos plotis kristaliniame silicije lygus 1,12 eV (elektrovolto) ir šį plotį atitinka fotonas, kurio bangos ilgis ne mažesnis nei 1100 nanometrų.

„Išmuštų elektronų vietose susidaro taip vadinamos skylės. Elektronai p - n sandūroje pernešami į n - tipo silicio sluoksnį, o skylės pernešamos į p - tipo sluoksnį (žr. 7 pav.). Išmušti elektronai įelektrinti neigiamai, o skylės tampa teigiamais krūvininkais. Šie krūvininkai, iš metalinių kontaktų silicio plokštelėje, veikiami susidariusio elektrinio lauko, kuris verčia elektronus ir skylės judėti, juda chaotiškai į skirtingas puses. Taip sandūros srityje susitikus elektronams su priešinga kryptimi judančiomis skylėmis susidūrus rekombinuoja. Aukšta rekombinacija pasiekama atviroje modulyje grandinėje. Sujungus viršutinį ir apatinį fotovoltinio elemento metalinį kontaktą į uždara grandinę, kol elementas yra apšviečiamas saulės šviesa, išgaunama nuolatinė elektros srovė“ [18].

Dalį spindulių fotovoltinis elementas atspindi taip prarasdamas nemažai efektyvumo. Šio reiškinio problemai išspręsti jo viršutinis paviršius padengiamas plona, skaidria, antirefleksine danga. Kylančios temperatūros įtakai mažinti fotoelektrinio elemento paviršius gaminamas grublėtas ir netolygus, taip elementas kaista lėčiau išlaikydamas aukštesnį efektyvumą.



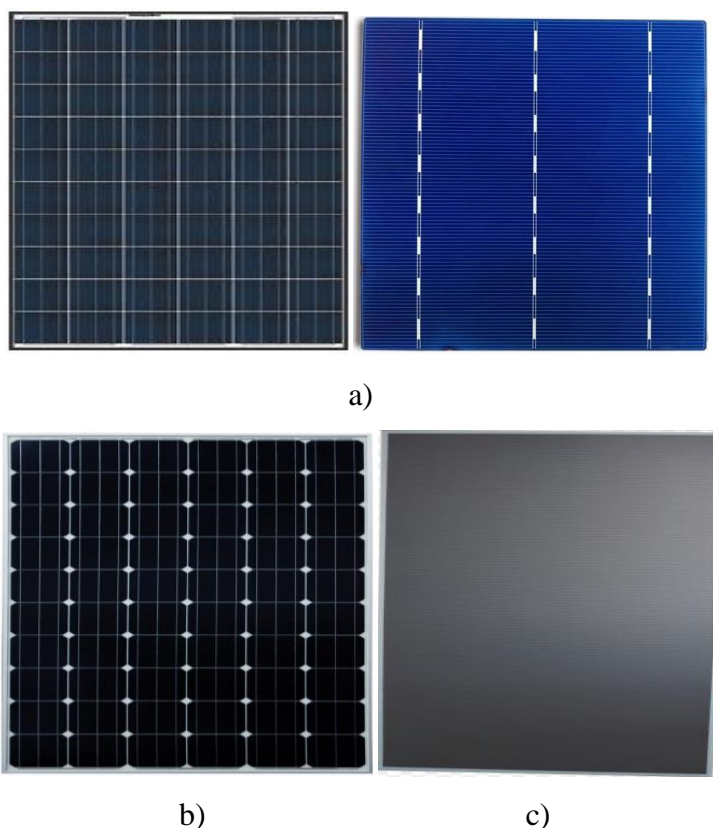
7 pav. Saulės energijos generacija ir virsmas į elektros energija fotovoltiniame elemente [17 p. 520]

Standartiniai rinkoje esantys saulės moduliai paprastai yra 1600 milimetrų ilgio, 990 milimetrų pločio ir 40 - 45 milimetrų aukščio. Juos sudaro nuosekliai sujungti elementai, kurių viename modulyje gali būti nuo 16 iki 60. Visas saulės modulyje karkasas sveria nuo 2,5 iki 25

kilogramų. Lietuvos klimato sąlygoms skirti saulės moduliai turi pastorintą, 4 milimetrų grūdintą stiklą. Šis grūdinto stiklo karkasas naudojamas siekiant išvengti krušos ir kitų mechaninių pavojų, taip pat ypatingai gerai hermetizuotas celių laminatas, pritaikytas drėgnam Lietuvos klimatui [19].

3.2. Fotoelektrinių modulių tipai

Fotoelektrinių modulių yra įvairiausių dydžių, formų ir medžiagų sandarų. Nuo šių išvardintų savybių priklauso modulio generuojamos galios efektyvumas. Dėl didžiausio galimo efektyvumo, pagrindinės medžiagos naudojamos elementams gaminti yra silicio kristalas, bet pasitaiko ir kitų, plonasluoksniais vadinamų, neorganinių ir organinių medžiagų. Silicio kristalo pagrindu gaminami monokristaliniai ir polikristaliniai elementai kurie užima 90 procentų visos pasaulyje pagaminamos fotoelektrinių modulių rinkos [11]. Lietuvoje šie elementai užima net 98 procentus visos rinkos ir tik nedidelė dalis tenka likusiems plonasluoksniams fotoelektriniam moduliams.



8 pav. Pagrindiniai silicio fotoelektriniai moduliai: a) polikristaliniai; b) monokristaliniai; c) amorfiniai [19]

Monokristaliniai saulės elementai laikomi pačiais efektyviausiais (žr. 8 pav. b.). Šių elementų didžiausias žinomas laboratorinis naudingumo faktorius siekia 24 procentus, o

komerciniai, pramoniniu būdu gaminami elementai turi 15 - 18 procentus efektyvumo. Dėl gamybos technologijos, monokristalinio silicio plokštelės gaminamos su labai užapvalintais kampais, 180 - 200 μ metrų storio ir 100 - 150 milimetrų skersmens. Dėl tokios plokštelių formos nepanaudojamas visas modulio plotas, todėl skaičiuojama saulės apšvita į plotą šie elementai nusileidžia polikristaliniams. Šių elementų garantinė tarnavimo trukmė siekia 25 metus ir ilgiau. Laikui bėgant efektyvumas krenta nežymiai. Palyginti su kitais elementais, šio tipo moduliai yra efektyviausi, bet ir santikiniai brangiausi.

Polikristalinės silicio plokštelės gaminamos 100 - 200 μ metrų storio ir yra per pus plonesnės už monokristalines (žr. 8 pav. a.). Šio tipo elementų efektyvumas laboratorinėmis sąlygomis siekia 21 procentą. Rinkoje galima įsigyti šio tipo elementų su 15 - 16 procentų naudingumo koeficientu. Garantinė šio tipo elementų gyvavimo trukmė siekia 10 metų, o efektyvumas po 12 - 13 metų krenta iki 90 procentų, po 25 metų efektyvumas krenta iki 80 procentų. Nors šių elementų efektyvumas mažesnis, dėl gamybos kaštų jie yra pigesni už monokristalinius.

Amorfiniai silicio fotoelektriniai elementai gaminami mikrometrų storio, todėl dėl mažai sunaudojamų medžiagų palyginti su kitais kristalinio silicio elementais yra labai pigūs (žr. 8 pav. c.). Amorfinio silicio tekstūra yra vientisa, todėl jie pasižymi plačia saulės spinduliuotės absorbcija. Ką tik pagaminto amorfino elemento efektyvumas siekia 12 procentų ir per pirmąjį jo naudojimo mėnesį nukrenta iki 7 - 8 procentų ir išlieka stabilus likusį laiką. Šio elemento garantinė gyvavimo trukmė palyginti su kristaliniu siliciu per pus mažesnė ir tesiekia 3 - 5 metus.

„*Plonasluoksniai* neorganiniai fotoelektros elementai gaminami iš cheminių elementų junginių, tokių kaip arsenido (GaAs), indžo fosfido (InP), kadmio telūrido (CdTe), vario indžio diselenido (CIS) ir vario indžio galio selenido (CIGS). Nors šie elementai santikiniai ploni ir turi plačias pritaikymo galimybes, jų efektyvumas palyginti su kitais elementais nėra didelis ir jie pagrindė testuojami laboratorijose ar naudojami eksperimentinėse sistemose“ [11].

Organiniai fotoelektriniai elementai bene sparčiausiai besivystanti technologijų kryptis besivejanti neorganinius analogus. Šie elementai pasižymi labai aukšta saulės šviesos absorbcija ir skirtingai nei silicio pagrindu veikiantys įrenginiai, gali generuoti energiją esant silpnam apšvietimui patalpų viduje. „Paprastai gaminami iš anglies pagrindo dažų ir konjuguotų polimerų. Šių įrenginių gamybos technologija vyksta elektroninio spausdinimo rėmuose. Polimerų pagrindu sukurtos puslaidininkinės molekulės ištirpinamos tirpiklyje ir spausdinamos kaip rašalas. Taip ant lankščių plėvelių gaunamos organinės kilmės medžiagų grandinės. Dėl šios gamybos technologijos šio tipo elementai turi plačiausias pritaikymo galimybes, nes yra lankstūs ir labai ploni. Butent dėl plono sluoksnio šio tipo elementams sunaudojama santikiniai mažai medžiagų ir leidžia stipriai sumažinti pagaminimo išlaidas“ [11]. 2016 metų vasario mėnesį Vokietijos kompanija „Heliatek“

pasiekė naują organinių fotoelektrinių įrenginių rekordinį konversijos efektyvumą, kuris yra 13,2 procento. Šie elementai apima visą matomą šviesos spektrą ir net infraraudonųjų spindulių regioną ir naujai pagaminti įrenginiai atitinka įprastinius saulės elementus, kurių efektyvumas yra 16 - 17 procentų. Pati kompanija nušviečia begalo plačias šio tipo įrenginių panaudojimo galimybes šiais moduliais dengiant pastatų sienas, transporto kelius ar net automobilių stogus [22].

3 lentelė

Saulės elementų efektyvumas pagal tipą [11]

Saulės elemento tipas	Labaratorinis efektyvumas	Pramoninis efektyvumas
Kristaliniai		
Monokristalinio silicio	24	15 - 18
Polikristalinio silicio	21	15 - 16
Plonasluoksniai		
Amorfinio silicio	12 - 16	8 - 10
Arsenido (GaAs)	23,3	-
Indžo fosfido (InP)	21,9	-
Kedmio telūrido (CdTe)	15,8	-
Vario indžio diselendo (CIS)	16,2	-
Selenido (CIGS)	16,4	-
Organiniai	13,2	-

3.3. Fotoelektrinio modulio efektyvumą lemiantys veiksniai

Viso pasaulio šalių energetikoje didelis dėmesys skiriamas atsinaujinančių energijos išteklių efektyvioms panaudojimo problemoms spręsti. Eksploatuojant fotoelektrinius modulius atsiranda tam tikrų specifinių problemų, kurias, norint padidinti fotoelektrinio modulio funkcionavimo efektyvumą, reikia išspręsti.

Beveik visi fotoelektrinio modulio galios nuostoliai priklauso nuo aplinkos sąlygų. Pagrindiniai šiuos nuostolius lemiantys veiksniai suskirstomi į šias grupes:

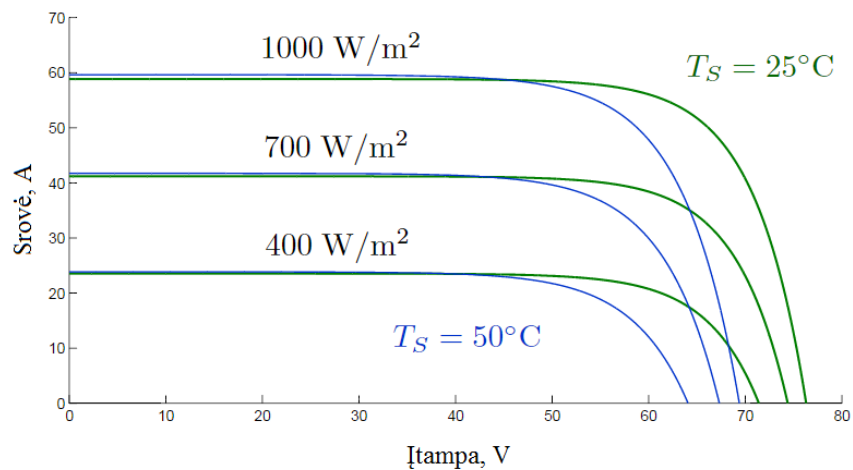
- *Saulės spindulių kritimo kampas į fotoelektrinio modulio plokštumą.* Dėl kintančios saulės pozicijos danguje, spinduliai į modulį krenta sudarydami ne optimalų kampą. Dėl šio natūralaus reiškinio mažėja spindulių absorbcijos kiekis elemente, tai lemia mažesnę generuojamos energijos kiekį.
- *Saulės šviesos spektrinė sudėtis.* Saulės šviesos spektras pasiekdamas žemės paviršių susiduria su įvairiausiomis kliūtimis. Šviesos spektrą įtakoja įvairios

meteorologinės klimato sąlygos (debesuotumas, lietus, dulkėtumas), aplinkos užterštumo tankumas bei saulės judėjimas danguje. Dėl šių veiksnių fotoelektrinio modulio generuojamos galios vertė mažėja.

- *Apšvitos intensyvumas.* Dėl pasikeitusio apšvitos intensyvumo, fotoelektriniam moduliui dirbam pastoviu režimu, jo našumas krenta. Nuostoliai atsiranda dėl modulio tiesioginės priklausomybės nuo grandinės įtampos ir foto srovės.

- *Aplinkos dulkėtumas.* Dulkės nusėdusios ant fotoelektrinio modulio paviršiaus mažina saulės spindulių absorbcija elemente, taip jo pagaminamos elektros energijos kiekis mažėja stipriai mažėja.

- *Fotoelektrinio modulio darbinė temperatūra.* Modulio darbinė temperatūra yra vienas svarbiausių veiksnių, įtakojančių pagrindinius parametrus (įtampą, srovę ir galią) ir lemiantis efektyvumo praradimus (žr. 9 pav.). Reikia pabrėžti, kad dėl kylančios modulio darbinės temperatūros ir krentančio efektyvumo, neišnaudojamos didžiausią potencialą saulės energijos turinčios dienos.



9 pav. Srovės ir įtampos charakteristikos keičiantis modulio darbinei temperatūrai [26 p. 616]

Tinkamiausios sąlygos fotoelektriniam moduliui yra $T_S = 20 - 25$ laipsnių Celsijaus darbinės temperatūros ir 1 - 2 m/s vėjo greičiui.

- *Meteorologinės stichijos.* Daugiausiai žalos fotoelektriniam moduliui padaro vėjas, kruša ar audra, juos pažeidžiant mechaniškai. Stiprus vėjas, kurio greitis siekia 15 m/s, gali deformuoti modulių konstrukcijas. Audros metu vėjo nešamas pavojingas materialus objektas gali atsitrekti į modulį taip pažeidžiant jo konstrukciją.

3.4. Fotoelektrinio modulio savybės ir panaudojimas

Vieno elemento galios charakteristikos mažos, tad siekiant išgauti didesnes sroves ir įtampas jie jungiami nuosekliai arba lygiaigrečiai į grandines. Nuosekliai sujungtų elementų skaičius lemia fotoelektrinio modulio įtampą. Lygiaigrečiai sujungtų elementų skaičius lemia fotoelektrinio modulio srovę. Taip pat šie elementai turi būti apsaugoti nuo mechaninių pažeidimų aplinkoje, kurioje jie veikia. Sujungti elementai kartu patalpinami į konstrukcinę rėmą apsaugai nuo aplinkos daromos žalos. Visa fotoelektrinio elemento komponentų visuma vadinama fotoelektriniu moduliu. Jie paprastai būna paruošti tvirtinimui prie įvairių paviršių ar specialių konstrukcijų. Tarp įprastinių kristalinių ir plonasluoknių elementų, dėl gamybos technologijos skirtumų, skiriasi tik modulių konstrukcija ir dizainas, bet kalbant apie elektros jungtis ir aplinkos apsaugą, turi tuos pačius principus. Moduliai saulės šviesos energiją keičia į nuolatinę, nedidelės srovės, nuo 2 iki 48 voltų, elektros energiją.

Beveik visą rinkos dalį užima silicio kristalo pagrindu pagaminti fotoelektriniai moduliai, kurių vienas elementas gaminamas 100 - 150 milimetro skersmens. Šis elementas esant 1000 W/m^2 saulės apšvitai generuoja 0,5 vatų įtampą ir 2 - 3 amperų srovę. Šie parametrai leidžia elementui pasiekti 4 – 6 vatų galią. Norint išgauti didesnius galingumus šie elementai jungiami tarpusavyje. Rinkoje esantys fotoelektriniai moduliai skirti vietiniam tinklui maitinti ar nedidelėse saulės sistemose naudoti. Dėl savo lankstumo ir dizaino paprastai būna sudaryti iš 32 - 72 elementų ir yra 30 - 310 vatų galingumo. 72 elementų modulis sudarytas iš dviejų grandinių po 36 elementus. Jungti šių modulių į didesnes grandines nenaudinga, nes per didelis modulio plotis ir svoris kelia nepatogumų montuojant ar transportuojant. Taip pat stipriai išauga rizika, kad vienos modulio pusės keliems fotoelementams patekus į šešėlio zoną, visas modulis dirbs šešėlyje generuojamos srovės efektyvumu [24]. Didesni moduliai naudojami stambesnėse sistemose montuojamose ant lygaus konstrukcinio paviršiaus.

Norint pasiekti didesnę modulio efektyvumą, reikia gerai žinoti ir suprasti fotoelektrinių modulių elektrines charakteristikas.

4. FOTOELEKTRINIO MODULIO ELEKTRINIAI PARAMETRAI

4.1. Fotoelektrinio modulio pagrindiniai elektriniai parametrai

Fotoelektrinio elemento, modulio ar viso modulyno masyvo voltamperinės ir galios charakteristikos yra panašios. Jos aprašomos tomis pačiomis lygtimis, kurių parametrai yra: atviros grandinės įtampa, trumpojo jungimo srovė, užpildymo faktorius, maksimalios galios taškas, atvirkštinės soties srovės, diodo faktorius, jungimo ir šuntinės varžos ir tai priklauso nuo elementų tipo, skaičiaus ir elektros jungties metodo. Fotoelektrinio elemento modelis sudarytas iš paprasčiausių kelių elementų (žr. 10 pav.) (energijos šaltinio ir lygiagrečiai pajungto diodo) aprašomas lygtimi [25]:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right]; \quad (13)$$

čia I – srovė, tekanti per diodą, A;

I_s – diodo atgalinė soties srovė, kuri esant pastoviai temperatūrai nekinta, A;

q – elektrono krūvis, $1,381 \cdot 10^{-19}$ C;

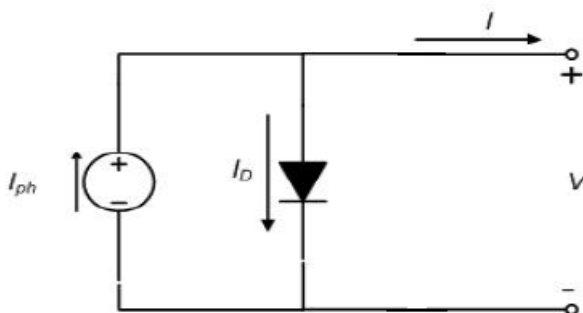
U – diode krentanti įtampa, V;

k – Boltzmano konstanta, $1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K;

T – sandūros temperatūra, K;

n – diodo idealumo faktorius, apibūdinantis nukrypimą nuo idealios diodo charakteristikos.

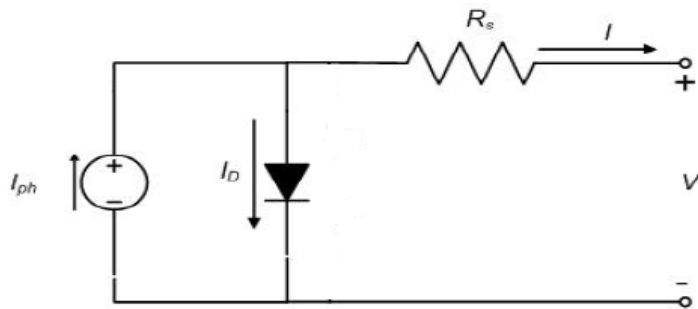
Diodo idealumo faktoriaus vertė, priklausomai nuo elemento medžiagos, skiriasi nuo 0,8 iki 2, bet kalbant apie monokristalinį silicio elementą, diodo idealumo faktorius lygus 1,2 reikšmei. Apšviestas elementas generuoja srovę, lygią trumpojo jungimo srovei, kuri apskaičiuojama užtrumpinus grandinės teigiamą ir neigiamą kontaktus. Įtampos vertė po trumpojo jungimo tampa lygi nuliui.



10 pav. Paprasčiausio fotoelektrinio elemento principinė schema [30 p. 48]

Šis 10 paveikslėlyje parodytas modelis neapibudina visų veiksnių, lemiančių fotoelektrinio modulio efektyvumą. Tikslesniems efektyvumo parametrams gauti naudojami modeliai su vienu arba dvejais diodais į grandinę prijungiant apkrovą. Vieno diodo modelis neretai naudojamas kristaliniuose silicio modeliuose. Šis modelis išskiriamas į dvi grupes, kurios skiriasi aprašomais parametrais. 11 paveikslėlyje pateikiamas vieno diodo modelis su lygiagrečiąją varžą.

Pirmąją grupę galime laikyti tuomet, kai modulio lygiagrečioji varža laikoma begaline, tuomet modulis turi keturis parametrus sudarytus iš foto srovės, diodo atgalinės soties srovės, nuoseklios varžos ir diodo idealumo faktoriaus.



11 pav. Vieno diodo modelis su lygiagrečiąją varža [30 p. 48]

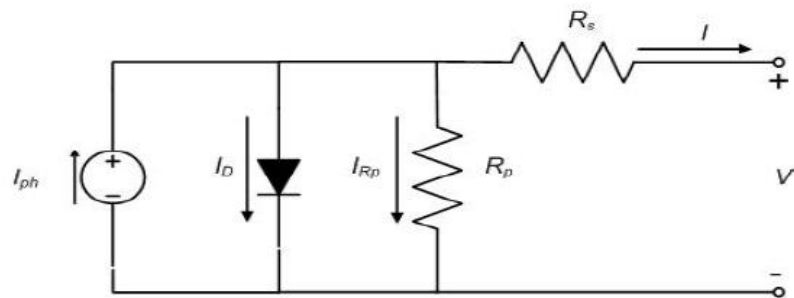
Matematinė šio modelio išraiška aprašoma formule:

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right]; \quad (14)$$

Čia I_{ph} – šviesos sugeneruota srovė, A;

I_D – diodu tekanti srovė, A.

Šis modelis dėl lygiagrečiosios varžos nepaisymo grandinėje netinkamas realioms voltamperinėms ir voltvatinėms charakteristikoms atvaizduoti, todėl norint gauti tikslius parametru grafikus, naudojamas vieno diodo modelis papildomai į grandinę įvedant nuosekliją varžą.



12 pav. Vieno diodo modelis su lygiagrečiąją ir nuosekliją varžą [30 p. 48]

Lygiagrečioji varža mažina atviros grandinės įtampa ir dar kitaip vadinama šunto varža. Šios varžos reikšmė priklauso nuo silicio plokštelės paviršiaus netolygumų. Nuoseklioji varža mažina trumpojo jungimo srovę, todėl modulis veikiamas abiejų varžų gauna netiesines charakteristikas taip patirdamas galios nuostolius, todėl gaunamos tikslios pagrindinių charakteristikų kreivės. Šio modelio matematinė lygtis:

$$I = I_{ph} - I_D = I_{SC} - I_s \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}}; \quad (15)$$

čia I_{sc} – trumpojo jungimo srovė, lygi fotonų sugeneruotai elektros srovei, A;

U – elemento įtampa, V;

R_s - Nuoseklioji varža, Ω ;

R_{sh} – šunto lygiagrečioji varža, Ω .

Fotoelektrinio vieno elemento įtampos ir srovės priklausomybė aprašoma formule:

$$I = I_{ph} - I_s = I_{SC} - I_s \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right]; \quad (16)$$

Pagal šią formulę galima aprašyti pagrindinius fotoelektrinį modulį nusakančius parametrus. Trumpojo jungimo srovė iš 16 lygties tuomet apskaičiuojama:

$$I_{SC} = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right]; \quad (17)$$

Trumpojo jungimo srovę įtakoja apšvitos intensyvumas, modulio paviršiaus plotas, krentančių spindulių bangos ilgis ir silicio medžiagos tankis. Atjungus modulio kontaktus ir pamatavus įtampą tarp jų, gaunama atviros grandinės įtampa, kai srovė lygi nuliui. Atviros grandinės įtampa tokiomis sąlygomis apskaičiuojama:

$$V_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right); \quad (18)$$

čia V_{oc} – atviros grandinės įtampa, V.

Atvirosios grandinės įtampos reikšmė priklauso nuo diodo atgalinės srovės, fotoefekto sukkelto srovės generavimo ir medžiagos draudžiamosios energijos juostos pločio. Reiktų paminėti, kad kylant modulio darbinei temperatūrai, įtampa po truputi krenta. Darbinės temperatūros kylimą lemia ne visų į modulio paviršių krentančių spindulių sugertis, nes dalis spindulių dėl per trumpo elektromagnetinės bangos ilgio nekombinuoja ir virsta šilumos nuostoliais. Galia tuomet priklausys nuo atviros grandinės įtampos ir trumpojo jungimo srovės ir elemento užpildymo faktoriaus:

$$P = I_{SC}V_{OC}FF ; \quad (19)$$

čia P – saulės elemento galia, W;

FF – užpildymo faktorius, %.

Užpildymo faktorius išreiškia, kokią procentinę dalį modulio paviršiaus veikia saulės apšvitos intensyvumas ir apibūdina maksimalią generuojamą galią. Šis parametras randamas pagal lygtį:

$$FF = \frac{I_{MPP}U_{MPP}}{I_{SC}V_{OC}} ; \quad (20)$$

Čia I_{MPP} – srovė maksimalios galios taške, A;

U_{MPP} – įtampa maksimalios galios taške, V.

Didžiausi veiksniai, nusakantys fotoelektrinio modulio našumą, yra jo darbinė temperatūra ir jo elemento paviršiaus plotui tenkanti šviesos energija. Fotoelektrinio elemento efektyvumo koeficientas apskaičiuojamas [25]:

$$\eta = \frac{P}{P_0} ; \quad (21)$$

čia η – elemento efektyvumo koeficientas, %;

P_0 – fotoelektrinio elemento paviršiaus plotui tenkanti šviesos energija, W.

4.2. Fotoelektrinio modulio matematinio modelio parametrai

Tyrinėjant fotoelektrinių modulių savybės, veikimą ir parametrų kitimą skirtingomis aplinkos sąlygomis, reiktų rinktis tokį matematinį modeliavimą, kurio pagalba būtų galima nustatyti pagrindines elektrines vertes, siekiant gauti įtampos, srovės ir galios priklausomybių kreives. Principinė elektrinė schema, kuri gali būti naudojama bet kokiame fotoelektriniame elemente arba modulyje, išvedama pagal matematinio modelio lygtį [30]:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{qU}{nkTN_s}\right) - 1 \right]; \quad (22)$$

čia N_s – nuosekliai sujungtų elementų skaičius modulyje.

Pritaikant principinę schemą iš 22 lygties aprašoma matematinio modelio lygtis fotoelektriniam moduliui:

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[\exp\left(\frac{\frac{V}{N_s} + I \times \frac{R_s}{N_p}}{n \times V_t}\right) - 1 \right] - I_{sh}; \quad (23)$$

čia N_p – nuosekliai tarpusavyje sujungtų modulių skaičius;

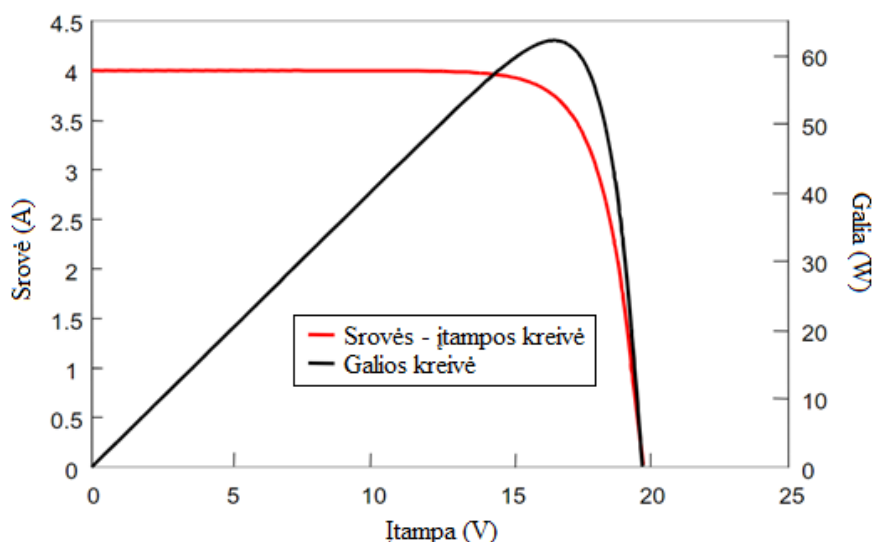
V_t – diodo šiluminė įtampa, V;

I_{sh} – modulio šunto srovė, A.

Iš 23 lygties aprašoma diodo šiluminė įtampa:

$$V_t = \frac{kT}{q}; \quad (24)$$

Taikant matematinį modeliavimą gaunamos tiek elemento, tiek viso fotoelektrinio modulio galios, srovės ir įtampos charakteristikos (žr. 13 pav.).



13 pav. Kristalinio silicio modulio voltamperinė ir voltvatinė charakteristika [17]

Pateiktame paveikslėlyje pavaizduota grafikas, kuriame atvaizduota modulio atviros grandinės įtampa, trumpojo jungimo srovė ir maksimali galia. Penki pagrindiniai parametrai šioms charakteristikos gauti yra foto srovė, trumpojo jungimo srovė, diodo atgalinės soties srovė, šunto lygiagrečioji ir nuosekioji varža ir diodo idealumo faktorius.

Visi kiti likę modeliui reikalingi parametrai pateikiami gamintojo techninėje modeliuojamo fotoelektrinio modulio specifikacijoje, kurio vertės gaunamos testuojant fotoelektrinį modulį standartinėmis testavimo sąlygomis.

Modulio paviršiuje generuojama foto srovė surandama lygtimi:

$$I_{ph} = \frac{I_r}{I_{rSTS}} (I_{SC} + Ki(T - T_{STS})); \quad (25)$$

čia I – saulės apšvita, W/m^2 ;

I_{rSTS} – saulės apšvita standartinėmis testavimo sąlygomis, $1000 W/m^2$;

T – darbinė modulio temperatūra, K;

T_{STS} – Temperatūros koeficientas standartinėmis testavimo sąlygomis, 298,15 K;

Ki – trumpojo jungimo srovės koeficientas standartinėmis testavimo sąlygomis, 0,06.

Modulio atvirkštinės soties srovė randama:

$$I_{rs} = \frac{I_{SC}}{\left[\exp\left(\frac{qV_{OC}}{N_s k n T}\right) - 1 \right]}; \quad (26)$$

Nuo fotoelektrinio modulio darbinės temperatūros vertės taip pat priklauso ir diodo atbulinės soties srovė, kuri randama:

$$I_s = I_{rs} \left[\frac{T}{T_{STS}} \right]^3 \exp \left[\frac{qE_g}{nk} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{STS}} \right) \right]; \quad (27)$$

čia I_{rs} – modulio atvirkštinės soties srovė, A;

E_g – medžiagos draudžiamosios juostos plotis (kristalinio silicio saulės elemento 1,2 eV).

Modulio trumpojo jungimo srovė tiesiogiai priklausoma nuo saulės apšvitos ir nežymiai kintama didėjant fotoelektrinio modulio paviršiaus temperatūrai. Šie du pagrindiniai aplinkos įtakos parametrai apibudina trumpojo jungimo srovės pokytį. Trumpojo jungimo srovės dydis apskaičiuojamas:

$$I_{SC} = I_{SC(STS)} \frac{G}{1kWm^{-2}} [1 + Ki(T - T_{STS})]; \quad (28)$$

čia $I_{SC(STS)}$ – trumpojo jungimo srovė standartinėmis testavimo sąlygomis, A;

Srovės nuotėkis lygiagrečioje varžoje randamas:

$$I_{sh} = I_{SC(STS)} \frac{VN_p}{N_s + I \times R_s}; \quad (29)$$

Fotoelektrinio modulio įtampos ir srovės charakteristikoms nemažą įtaką turi nuosekioji varža R_s . Kadangi paprastai modulyje elementai būna sujungti nuosekliai, šios varžos vertė priklauso nuo elementų ir pagrindinių fotoelektrinių modulį veikiančių klimatinių sąlygų – nuo darbinės temperatūros ir apšvitos. Didėjant modulio darbinei temperatūrai, didėja ir nuosekioji varža. Varža mažėja silpstant saulės spinduliavimo intensyvumui.

Lygiagrečiosios varžos įtaka fotoelektriniam moduliui ne tokia pastebima, bet turi įtakos įtampos ir srovės charakteristikoms trumpojo jungimo taške. Varžos įtaka nedidelė, nes lygiagrečiai sujungtų elementų skaičius modulio karkase būna nedidelis, o jos poveikis priklauso nuo darbinės temperatūros. Ši varža aprašo srovės nuotėkį ir didėja tuomet, kai apšvita mažėja.

Vienas iš pagrindinių fotoelektrinio modulio charakteristikas įtakojančių veiksnių yra jo paviršiaus temperatūra, kuri priklauso nuo darbinės temperatūros, aplinkos temperatūros, spindulių intensyvumo ir elemento temperatūros. Modulio paviršiaus temperatūros priklausomybė nuo visų išvardintų parametrų išreiškiama formule:

$$T_c = T_m + \frac{I_r}{I_{rSTS}} \Delta T ; \quad (30)$$

čia T_c – saulės elemento darbinė temperatūra, K;

T_m – modulio paviršiaus temperatūra, K;

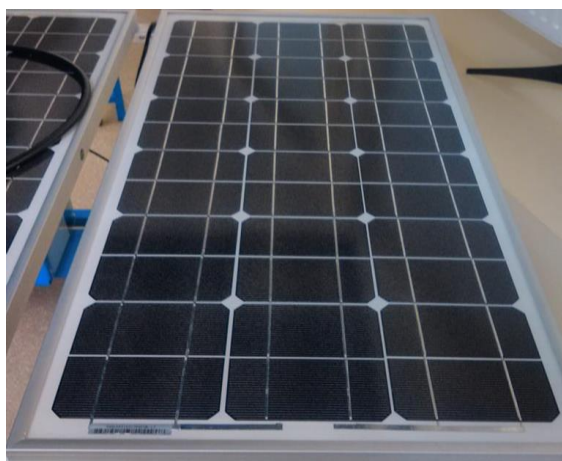
ΔT – pastovus temperatūros skirtumas tarp elemento ir modulio paviršiaus, 3 °C;

Modulio darbinę temperatūrą įtakoja šilumos mainai tarp modulio ir aplinkos. Aplinkoje didžiausią įtaką turi vėjas ir jo greitis, nežymią įtaką turi oro temperatūros. Šiluminius mainus su moduliu ir aplinka taip pat įtakoja papildomi veiksniai priklausantys nuo modulyje sumontuotų medžiagų. Tai gali būti spindulių atspindžiai priklausomai nuo antirefleksinės dangos ir elemento medžiagos, stiklo storio ir jo skaidrumo bei elementų sugertiems koeficiento [31].

5. TIRIAMOJI DALIS

5.1. Fotoelektrinio modulio našumo priklausomybė nuo jo paviršių krentančių saulės spindulių kampo tyrimas

Norint išsiaiškinti, kaip efektyviausiai naudojant valdymo sistemą, padidinti fotoelektrinio modulio našumą, reikia ištirti saulės spindulių kritimo kampo į fotoelektrinio modulio paviršiaus priklausomybę nuo jo pagaminamos elektros energijos kiekio. Tyrimams dėl savo santykinai didelio naudingumo koeficiento naudojamas Towards Excellence ET-M53645 firmos 45 vatų galingumo monokristalinis silicio modulis (žr. 14 pav.). Tyrimai atliekami laboratorinėmis sąlygomis specialiaame fotoelektrinių modulių tyrimų stende (žr. 15 pav.).



14 pav. Tyrimo metu naudojamas monokristalinis silicio fotoelektrinis modulis

Dėl saulės spindulių sklaidos ir meteorologinių dienos nestabilumų, tikslesniems duomenims gauti, tyrimai atliekami laboratorinėmis sąlygomis naudojant dirbtinį, keturių halogeninių 500 vatų galingumo, lempučių šviesos šaltinį. Naudojant dirbtinį apšvietimą sukuriama idealios spindulių kritimo į modulį charakteristikos, kurios leidžia pasiekti tikslesnius tyrimo rezultatus, lyginant su natūralioje aplinkoje pasiekiamais rezultatais. Ketvirtoje lentelėje pateikiami tiriamo fotoelektrinio modulio elektriniai parametrai.

4 lentelė

ET-M53645 fotoelektrinio modulio elektrinės charakteristikos

Pavadinimas	Parametrai
Maksimali galia (V_{mp})	45 W
Maksimali įtampa (V_{max})	17,9 V

4 lentelės tęsinys kitame puslapyje

Maksimali srovė (I_{max})	2,51 A
Atviros grandinės įtampa (V_{oc})	21,96 V
Užtrumpintos grandinės srovė (I_{sc})	2,73 A
Naudingumo koeficientas	16,5 %
Galios matavimo tolerancija	0+3 %
Elementų skaičius sujungtų nuosekliai (N_s)	18
Elementų skaičius sujungtų lygiagrečiai (N_p)	1
Darbinė temperatūra	-40...+85 °C

Šioje lentelėje pateikti elektriniai parametrai yra gauti standartinėmis testavimo sąlygomis, kurios prilyginamos 1000 W/m² apšvitai, 25 laipsnių Celsijaus modulio darbinei temperatūrai ir AM 1,5 oro masės spektrui. Įvertinant saulės judėjimą danguje, modulis tiriamas keičiant jo ašis pagal horizontaliąją ir vertikaliosią plokštumas.



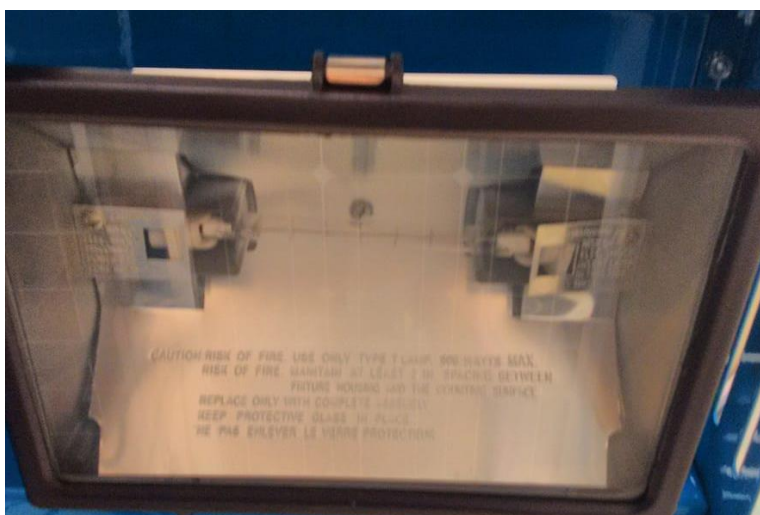
15 pav. Tyrimo metu naudojamas fotoelektrinių modulių tyrimų stendas

Šis stendas turi fotoelektrinio modulio grandinės išėjimo teigiamą ir neigiamą kontaktus, kurių pagalba išmatuojame atviros grandinės įtampą. Užtrumpinus šią grandinę išmatuojama trumpojo jungimo srovė. Matavimams atlikti naudojami du UNI-T firmos skaitmeniniai matuokliai (žr. 16 pav.).



16 pav. UNI-T UT58B skaitmeninis matuoklis

Vienas matavimo prietaisas matuoja atviros grandinės įtampa, kitu matavimo prietaisu, užtrumpinus grandinę, matuojama trumpojo jungimo srovė. Gaunami pagrindiniai įtampos ir srovės parametrai, kuriuos sudauginus gaunama fotoelektrinio modulio generuojamą galią. Tyrimai atliekami uždaroje patalpoje aplinkos temperatūrai siekiant 20 laipsnių Celsijaus. Stende įmontuotas dirbtinio apšvietimo šaltinis (žr. 17 pav.). Dirbtiniam apšvietimui naudojamos galingos, keturios 500 vatų galingumo halogeninės lemputės. Siekiama gauti kiek įmanoma panašesnę apšvitą, atitinkančią realias modulio darbo sąlygas.



17 pav. 500 vatų galios dirbtinio apšvietimo šaltinis

Dirbtinis šviesos šaltinis spinduliuoja šviesos srautą statmenai į modulio paviršių. Jis tvirtinamas taip, kad būtų išlaikomas pastovus atstumas tarp šviesos šaltinio ir fotoelektrinio modulio. Taip užtikrinama, kad spindulių kelias krentančių į modulio plokštumą nesikeistu.

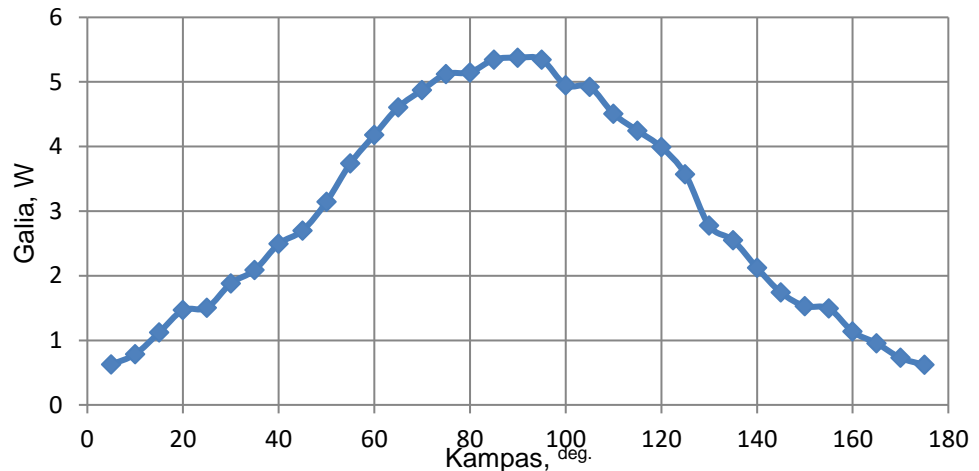
Atstumas tarp šviesos šaltinio ir modulio paviršiaus parenkamas toks, kad šviesos šaltinis apšviestų visą modulio paviršių ir būtų išvengta skirtingai apšviestų paviršiaus plotų, kas įtakotų mažesnę generuojamos energijos kiekį.

Tyrimo metu keičiama fotoelektrinio modulio horizontalioji ašis ir matuojama modulio išėjimo įtampa ir srovė. Taip pat atliekamas ir vertikaliosios ašies įtakos fotoelektrinio modulio našumui tyrimas siekiant išsiaiškinti, kiek papildomai galima padidinti generuojamos galios kiekį orientuojant modulį į saulės spindulius abejomis ašimis. Atlikus šviesos spindulių kritimo kampo į fotoelektrinio modulio plokštumą tyrimus gauti tokie rezultatai:

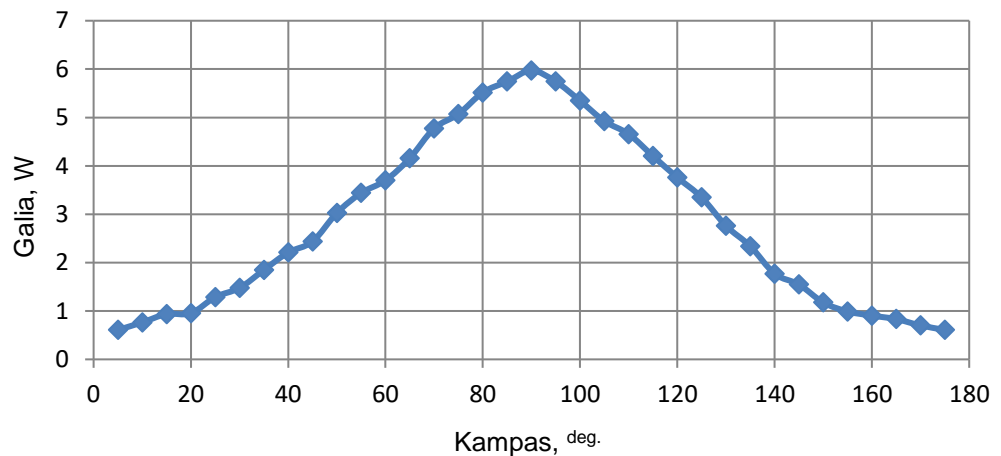
Iš priede pateiktų pirmos ir antros lentelės tyrimo duomenų sudaromi ašių grafikai:

18 paveikslėlyje pavaizduota krentančių spindulių į modulio plokštumą kampo ir jo generuojamos galios priklausomybė pagal horizontaliąją ašį.

19 paveikslėlyje pavaizduota krentančių spindulių į modulio plokštumą kampo ir jo generuojamos galios priklausomybė pagal vertikaliąją ašį.



18 pav. Krentančių spindulių į modulio plokštumą kampo ir jo generuojamos galios priklausomybė pagal horizontaliąją ašį



19 pav. Krentančių spindulių į modulio plokštumą kampo ir jo generuojamos galios priklausomybė pagal vertikaliąją ašį

Iš pateiktų grafikų matyti, kad abiejų ašių charakteristikos įgauna varpo formą ir tai parodo, kad keičiantis spindulių kampui krentančiam į fotoelektrinio modulio plokštumą, keičiasi ir jo generuojamos galios vertė. Modulis didžiausią našumą pasiekia, kai jo plokštuma su šviesos spinduliais sudaro 90 laipsnių statųjį kampą. Keičiantis kampui į abi ašies puses nuo stataus kampo, generuojamos galios kiekis proporcingai mažėja. Taip pat pastebimas nežymus iki 4 procentų siekiantis efektyvumo kritimas, spinduliams krentant į modulį 85 ir 95 laipsnių kampais.

Orientuojant modulį į šviesos šaltinį pagal horizontaliąją ašį buvo pasiektas didžiausias 5,376 vatų galingumas efektyvumas, o papildomai orientuojant modulį vertikaliają ašimi, jo našumas padidėja iki 5,97 vatų. Tai reiškia, kad papildomai orientuojant modulį pagal vertikaliają ašį, sistemos našumą galima padidinti 11 procentų.

Reikia įvertinti, kad šie gauti rezultatai realioje sistemoje truputi skirtusi, bet charakteristikų forma išliktu tokia pat. Taip nutinka, nes dirbtinio šviesos šaltinio spinduliavimo spektras neatitinka saulės sukuriamo spektro. Taip pat fizinė sistema, dirbanti lauko sąlygomis, nuolatos yra veikiamą temperatūros ir kitų atmosferinių reiškinių, kurie įtakoje efektyvumo parametrus.

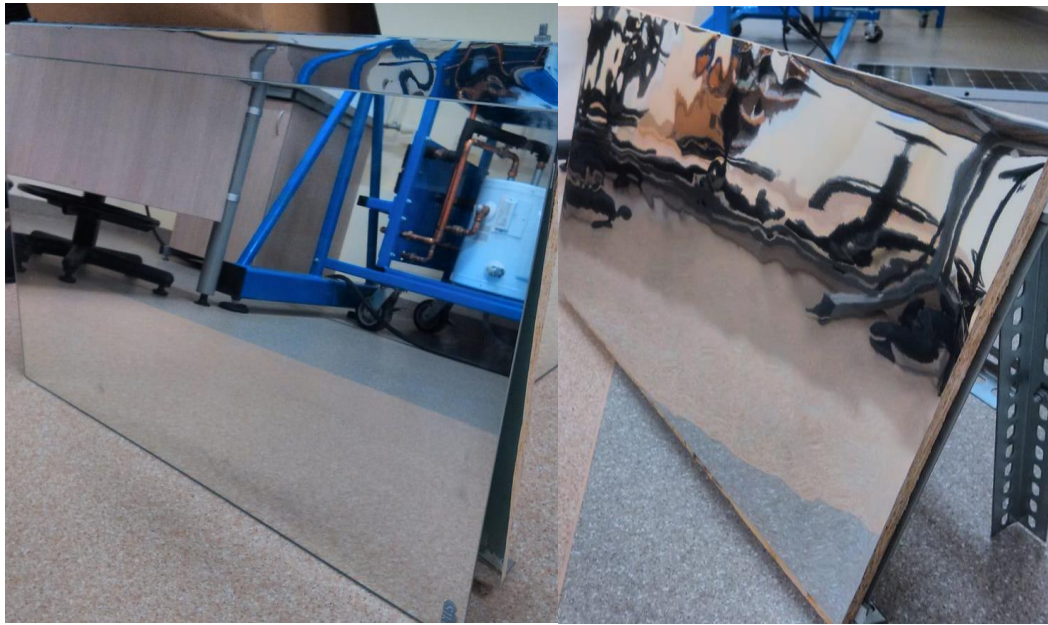
5.2. Optinių koncentratorių įtakos tyrimas

Dar labiau modulio našumą padidinti galima prie jo papildomai pritačius optinius spindulių koncentravimo įtaisus. Naudojant spindulių koncentravimo priemones padidinamas fotoelektriniam moduliui tenkantis apšvitos kiekis. Saulės spindulių koncentravimui naudojami koncentratoriai. Koncentratoriai tai yra optiniai elementai, kurie nukreipia saulės spindulius į fotoelektrinio modulio plokštumą. Optinius elementus pagrinde sudaro veidrodiniai arba lęšiniai įtaisai. Šie įtaisai maksimaliai padidinti fotoelektrinio modulio efektyvumui dažniausiai naudojami kartu su saulės sekimo sistemomis. Fotoelektriniai moduliai su koncentratoriais dėl užimamo ploto netinkami montuoti į vietas su ribota vieta ar pastatus į kuriuos nėra galimybės integruoti valdymo sistemos, sekančios saulę. Bet jų naudojimas saulės elektrinėse, padidinus fotoelektrinių modulių našumą bent kelias procentais, galima išgauti didžiulius pagaminamos elektros energijos kiekius.

Šių įtaisų valdymas gali ženkliai padidinti fotoelektrinio modulio efektyvumą ir kompensuoti energijos nuostolių praradimus esant netinkamam modulio ir saulės spindulių kampui. Norint išsiaiškinti optinių koncentravimo įtaisų valdymo charakteristikas, reikia ištirti spindulių koncentravimo efektyvumo ir optinių įtaisų padėties priklausomybes.

Šiuo tyrimu siekiama išsiaiškinti, kokį kampą papildomas optinis įtaisais turi sudaryti su modulių, kad būtų pasiektas didžiausias koncentravimo efektyvumas. Ankstesniuose tyrimuose

išsiaiškinta, kad norint pasiekti didžiausią efektyvumą, fotoelektrinis modulis su į jo plokštumą krentančiais saulės spinduliais turi sudaryti statųjį kampą. Tyrimo metu optiniai įtaisai yra statmenai atremti į modulio korpuso šoną. Modulis į šviesos šaltinį orientuotas stacionariai, sudarant reikiamą kampą didžiausiam efektyvumui pasiekti.



(a)

(b)

20 pav. Tyrimams naudojami optiniai spindulių koncentravimo įtaisai: (a) veidrodis; (b) veidrodinė plėvelė



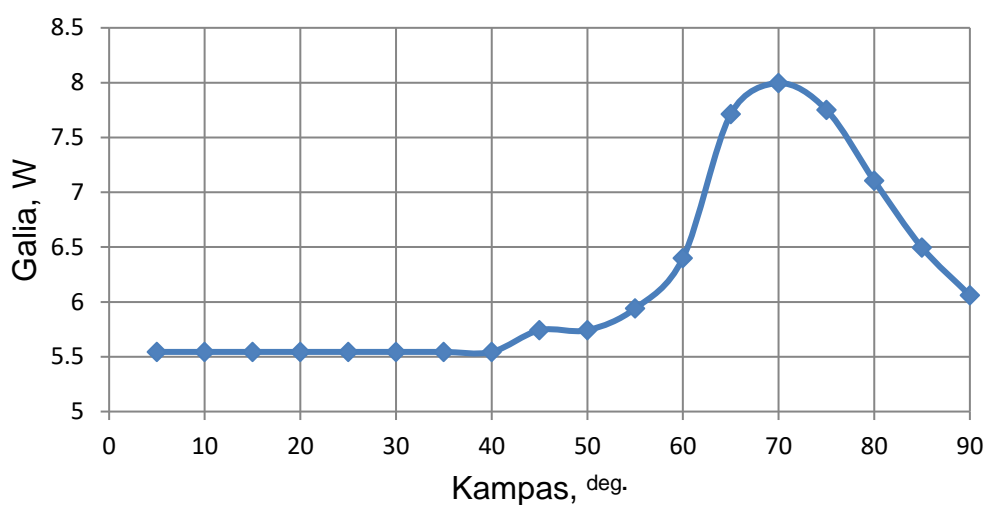
21 pav. Fotoelektrinis modulis su koncentravimo įtaisais

Kas 5 laipsnius horizontaliąją ašimi keičiamas optinių įtaisų kampas ir matuojama modulio išėjimo įtampa ir srovė. Atliekant tyrimus nustatant optinių įtaisų spindulių koncentravimo priklausomybę nuo orientacijos pagal modulio korpusą gauti tokie rezultatai:

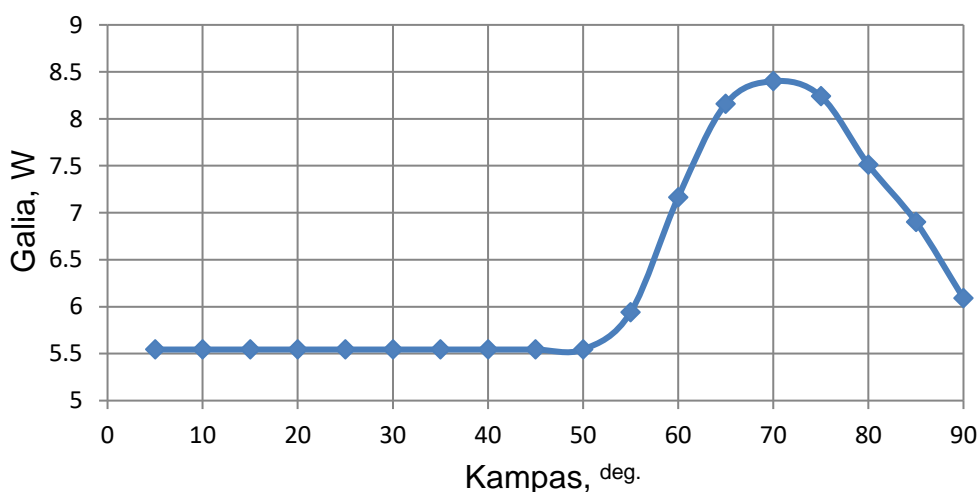
Pagal priede pateiktos trečios ir ketvirtos lentelės duomenis sudaromi galios ir kampo priklausomybės grafikai:

22 paveikslėlyje pateikta fotoelektrinio modulio generuojamos galios priklausomybė nuo veidrodžių kampo orientacijos

23 paveikslėlyje pateikta fotoelektrinio modulio generuojamos galios priklausomybė nuo veidrodinės plėvelės kampo orientacijos



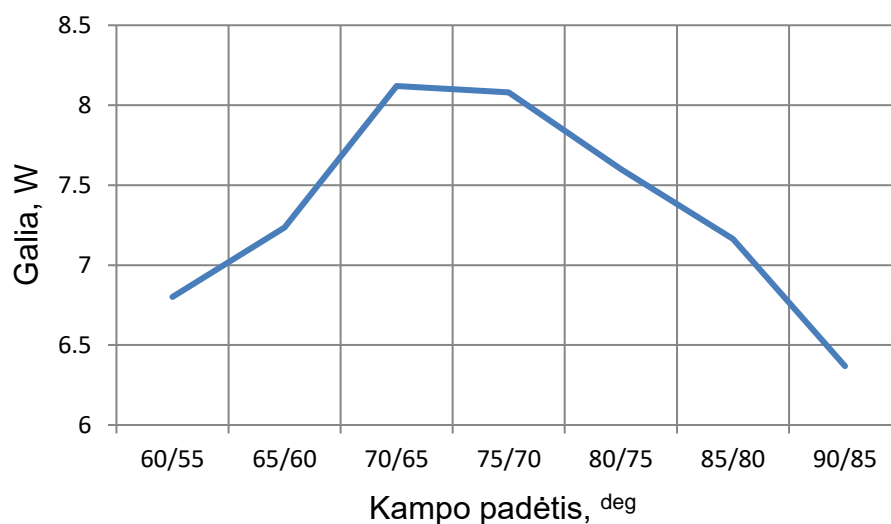
22 pav. Fotoelektrinio modulio generuojamos galios priklausomybė nuo veidrodžių kampo orientacijos



23 pav. Fotoelektrinio modulio generuojamos galios priklausomybė nuo veidrodinės plėvelės kampo orientacijos

Iš šių grafikų matyti, kad pagalbiniai optiniai įtaisai didžiausią koncentracijos koeficientą pasiekia su fotoelektrinio modulio korpusu sudarydami 70 laipsnių kampą. Taip pat pastebimas nedidelis iki 4 – 5 procentų siekiantis spindulių koncentravimo efektyvumo kritimas įtaisams sudarant 65 – 75 laipsnių kampus. Šiems įtaisams pasiekus 40 - 50 laipsnių kampą, jie nebeturi įtakos fotoelektrinio modulio našumui, jų nukreipiami spinduliai nebesiekia modulio aktyviosios plokštumos.

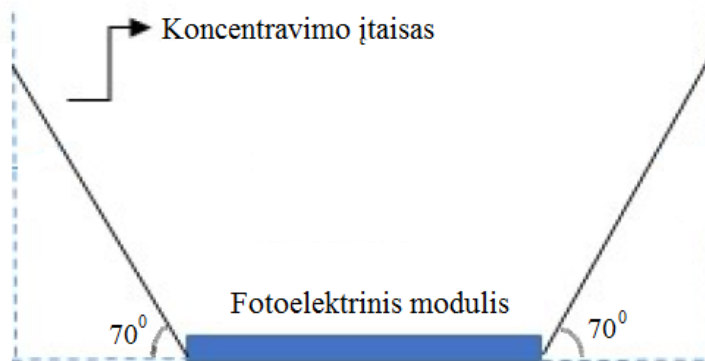
Pirmuoju tyrimu abiejų optinių įtaisų kampai keičiami vienodai. Norint išsiaiškinti tinkamiausius šių įtaisų padėtis jų valdymui, ištiriamas modulio efektyvumas, kai optiniai įtaisai sudaro skirtingus kampus modulio korpuso atžvilgiu. Kas penkis laipsnius keičiamas kairiojo ir dešiniojo įtaiso kampas ir matuojama modulio išėjimo įtampa ir srovė.



24 pav. Fotoelektrinio modulio generuojamos galios priklausomybė nuo optinių įtaisų orientacijos kampo padėties

Iš šio grafiko matyti, kad didžiausią spindulių koncentravimo efektyvumą fotoelektrinis modulis pasiekia, kai koncentravimo įtaisai orientuojami sudarant 70/65, 75/70 laipsnių kampus.

Naudojant veidrodžius, pasiektas didžiausias efektyvumas, kai modulis generuoja 7,995 vatų galią. Naudojant veidrodinę plėvelę spindulių koncentravimui modulis didžiausią našumą pasiekia generuodamas 8,4 vatų galią. Tyrimo metu modulis tvirtinamas stacionariai, sudarant sąlygas, kad į jį krentančios šviesos šaltinio spinduliai sudarytu statųjį kampą. Taip modulis dirbo didžiausiu efektyvumu ir jo generuojamos galios vertė siekia 5,97 vatų. Veidrodžių naudojimas fotoelektrinėje sistemoje našumą padidino 25,32 procento, o veidrodinės plėvelės naudojimas efektyvumą padidino net iki 28,92 procentų. Optinius įtaisus sukant skirtingais kampais pastebimas nedidelis iki 3 procentų siekiantis efektyvumo kritimas. Taip pat pastebimas nedidelis 1 – 2 procentų efektyvumo padidėjimas optinius įtaisus papildomai orientuojant vertikaliąją ašimi.



25 pav. Optinio koncentravimo įtaiso kampo orientacija pagal fotolektrinį modulį

Komponuojant šias galios padidinimo priemones į valdymo sistemą, kuri pozicionuoja modulį pagal saulės judėjimą, reikia pastoviai palaikyti 65 – 75 laipsnių kampą tarp koncentravimo įtaiso ir modulio korpuso kraštinės. Taip koncentracijos koeficientas pasiekia aukščiausią vertę, o sistema pasiekia didžiausią našumą.

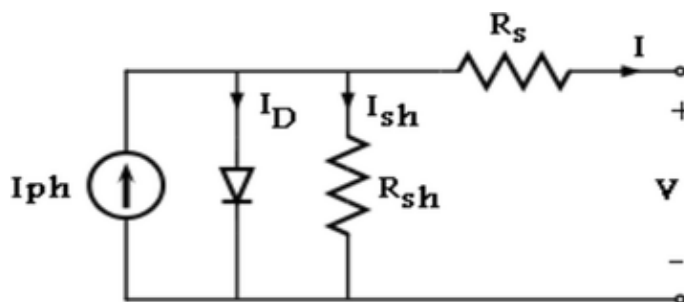
5.3. Fotolektrinio modelio matematinis modeliavimas

Fotolektriniai elementai, kurie sudaro modulį, yra pagrindiniai fotoelektros generavimo sistemos galios transformavimo blokai. Fotolektrinis modulis turi nelinejines charakteristikas ir yra gana brangus, todėl užtrunka nemažai laiko iki kol pasiekiamas modulio atsiperkamumas. Labiausiai atsiperkamumo laikotarpį įtakoja modulio darbinės aplinkos sąlygos. Siekiant išsiaiškinti jo charakteristikas ir patikrinti modulio efektyvumą prie įvairių aplinkos sąlygų, modulio parametru gerinimui įvairiausiose inžinierinėse programose kuriami matematiniai modeliai, įskaitant Matlab/Simulink aplikaciją. Tyrimo metu naudojamas ET-M53645 monokristalinis fotolektrinis modulis naudojamas kaip pamatinis modulis ir tiriamos jo veikimo charakteristikos prie įvairių darbo sąlygų bei fizinių parametru.

Matematinis modeliavimas užtikrina tikslų, patikimą ir lengvą fotolektrinio modelio parametru modelį. Be to jis taip pat labai naudingas tiriant modulio veikimą iš įvairių fizinių parametru (nuoseklios ir lygiagrečios varžos pokyčių įtakos, idealumo faktoriaus ir kitu parametru) ir darbo būklės (skirtingos temperatūros, apšvietimo įtakos ypač esant daliniam šešėlio efektui) aspektu. Todėl tyrimui naudojamas modelis, sukurtas Tag įrankiais Simulink aplinkoje. Šis modelis turi pranašumą tiriant visų parametru įtaka fotolektrinio modulio veikimui. Be to unikali laipsniško modeliavimo procedūra leidžia lengvai sekti ir atlikti norimus parametru modeliavimus [30].

Matematinė principinė ekvivalentinė grandinė fotolektriniam moduliui parodyta 26 paveikslėlyje. Srovės šaltinis I_{ph} – fotoelemento fotokuras. R_{sh} ir R_s nuosekloji ir lygiagrečioji

šunto varža. Paprastai lygiagrečios varžos vertė yra labai didelė, o nuosekioji varža yra labai maža, todėl ją galima ignoruoti, taip supaprastinant duomenų analizę.



26 pav. Matematinė ekvivalentinė fotoelektrinio modelio grandinė [30]

Modeliavimo metu naudojami ET-M53645 monokristalinio fotoelektrinio modulio parametrai (detalūs modulio parametrai pateikiami 4 lentelėje, 34 puslapyje). Fotoelektrinio modulio modeliavimas remiasi lygtimis, nurodytomis anksčiau pateiktame literatūros šaltinių nagrinėjamame skyriuje ir atliekamas sekančiose pakopose.

Iėjimo žinomi parametrai (žr. 27 pav.):

Temperatūra standartinėmis testavimo sąlygomis $T_s = 298,15$ K (Svarbu paminėti, kad temperatūra matematiniam modelyje apsiraso Kelvinais ir $298,15$ Kelvino temperatūros vertė yra lygi 25 laipsniams pagal Celsijų);

modulio idealumo faktorius $n = 1,2$;

elektronų įkrova $q = 1,6 \times 10^{-19}$;

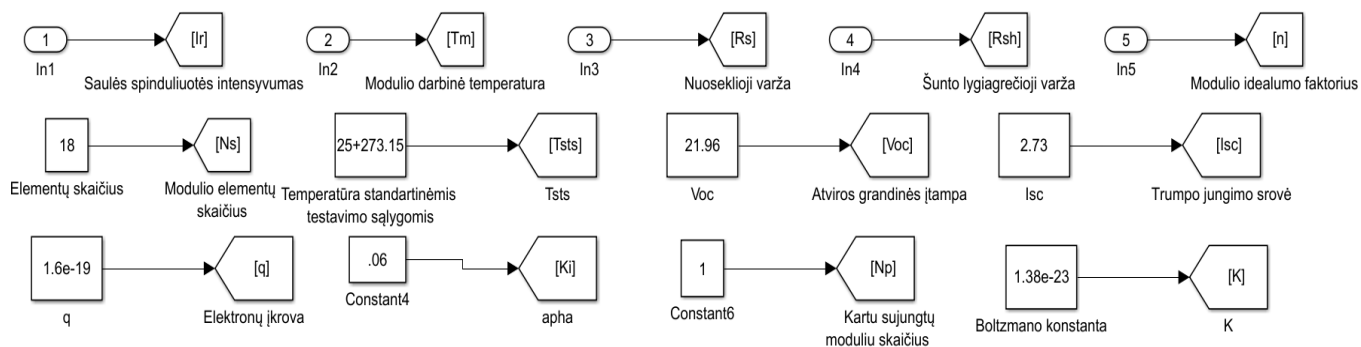
modulio trumpojo jungimo srovė standartinėmis testavimo sąlygomis $I_{sc} = 2,73$ A;

modulio atviros grandinės įtampa standartinėmis testavimo sąlygomis $V_{oc} = 21,96$ V;

draustinios juostos plotis monokristaliniame silicije $E_g = 1,2$ eV;

R_s nuoseklios varžos normali vertė yra labia maža $= 0,0001 \Omega$;

R_{sh} lygiagrečios šunto varžos vertė tuo tarpu labai didelė $= 1000 \Omega$.

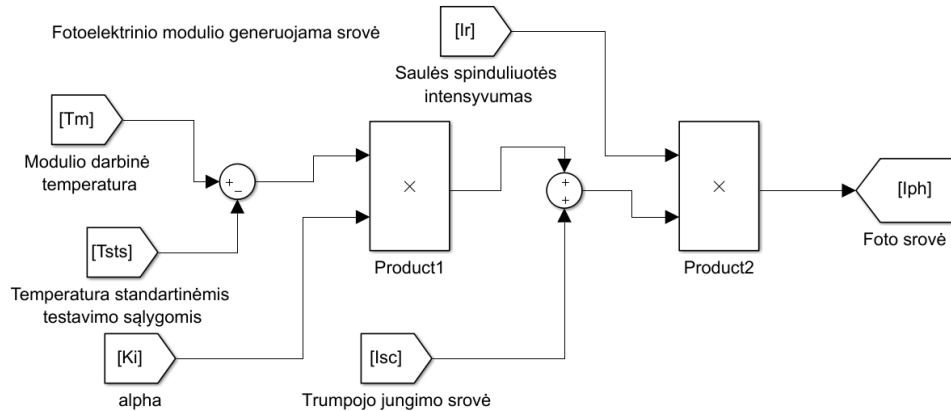


27 pav. Žinomi fiziniai parametrai Matlab/Simulink aplinkoje

Fotoelektrinio modulio įtampis ir srovės charakteringosios lygtis :

Foto srovės lygtis (žr. 28 pav.):

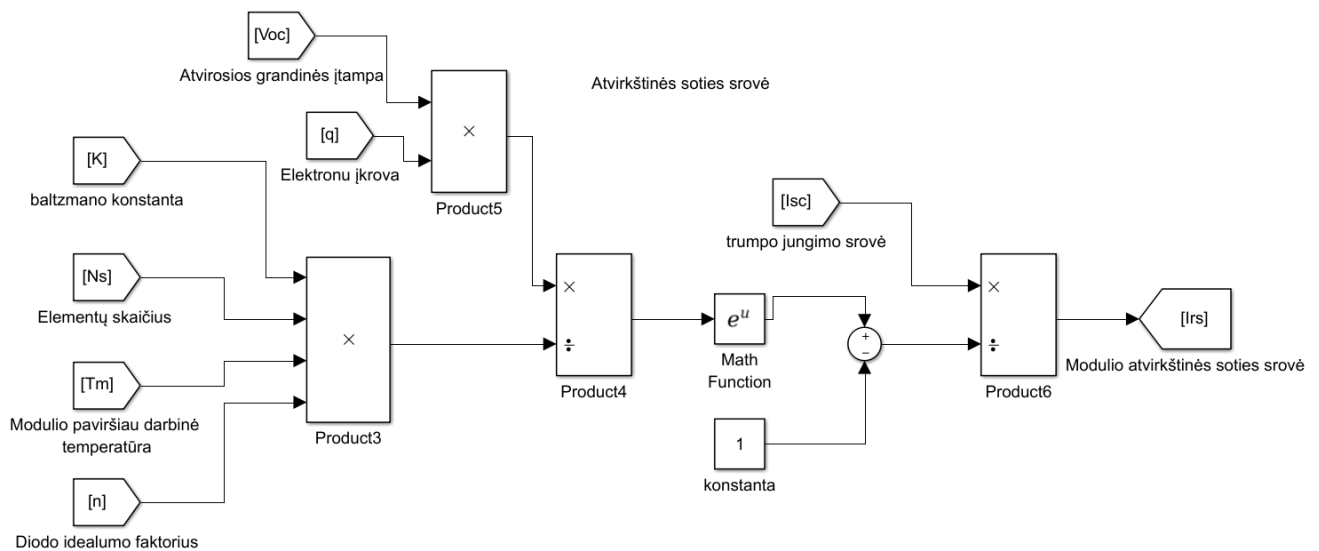
$$I_{ph} = \frac{I_r}{I_{rSTS}} (I_{SC} + Ki(T - T_{STS})); \quad (25)$$



28 pav. Foto srovės I_{ph} lygtis Matlab/Simulink aplinkoje

Modulio atvirkštinės soties srovės lygtis (žr. 29 pav.):

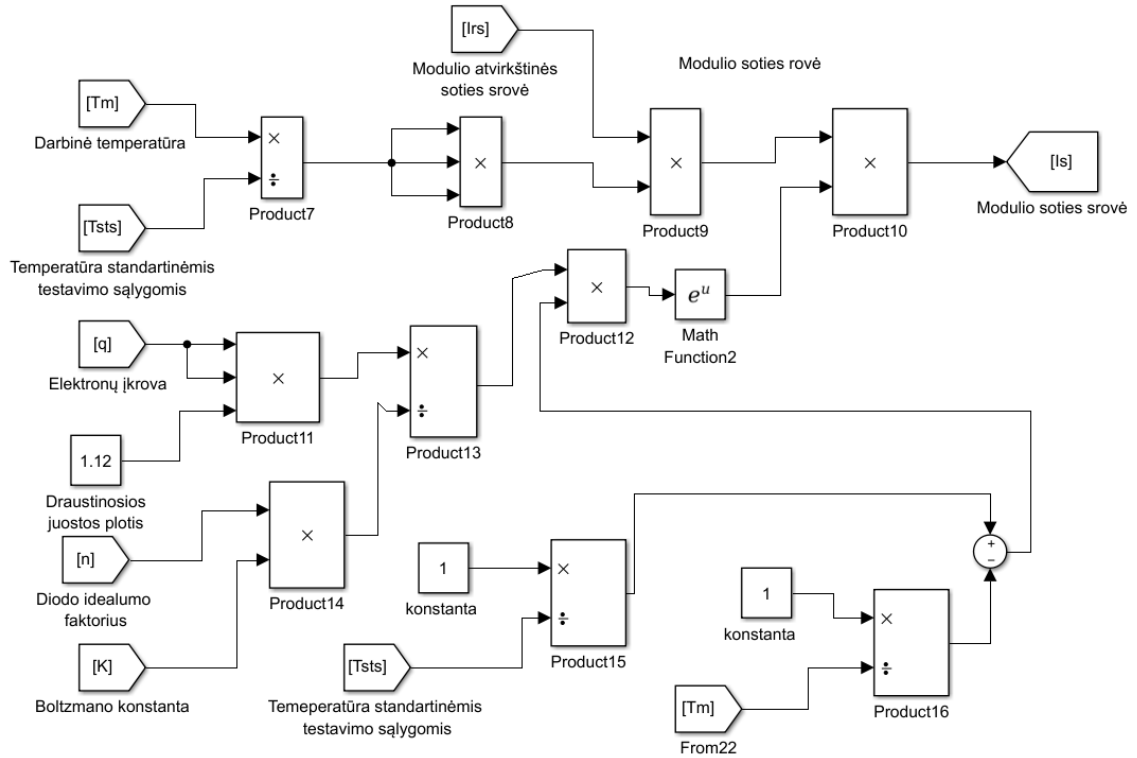
$$I_{rs} = \left[\frac{I_{SC}}{\exp\left(\frac{qV_{OC}}{N_S k n T}\right) - 1} \right]; \quad (26)$$



29 pav. Modulio atvirkštinės soties srovės lygtis Matlab/Simulink aplinkoje

Modulio soties srovės lygtis (žr. 30 pav.):

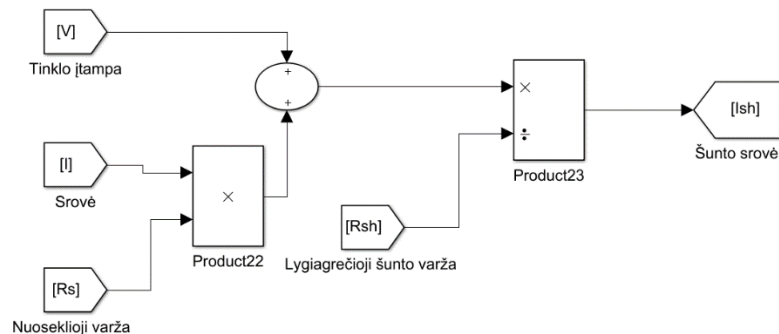
$$I_s = I_{rs} \left[\frac{T}{T_{STS}} \right]^3 \exp \left[\frac{qE_g}{nk} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{STS}} \right) \right]; \quad (27)$$



30 pav. Modulio atbulinės soties srovės lygtis Matlab/Simulink aplinkoje

Modulio šunto srovės lygtis (žr. 31 pav.):

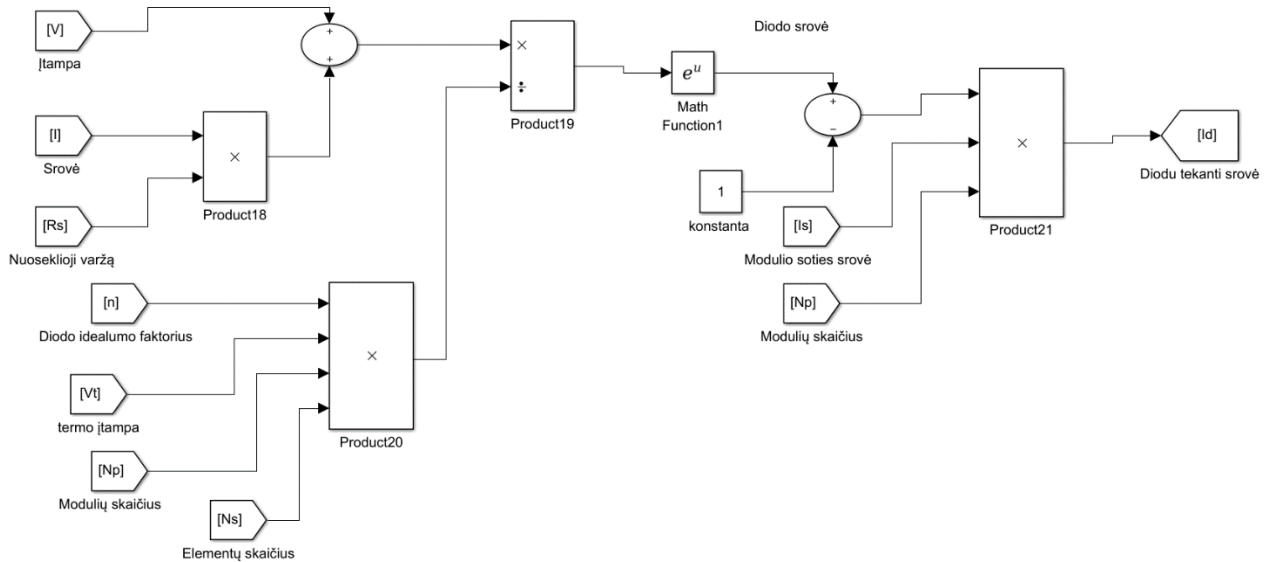
$$I_{sh} = \frac{I \times R_s + V}{R_{sh}}; \quad (29)$$



31 pav. Modulio šunto srovės lygtis Matlab/Simulink aplinkoje

Diodu tekančios srovė lygtis (žr. 32 pav.):

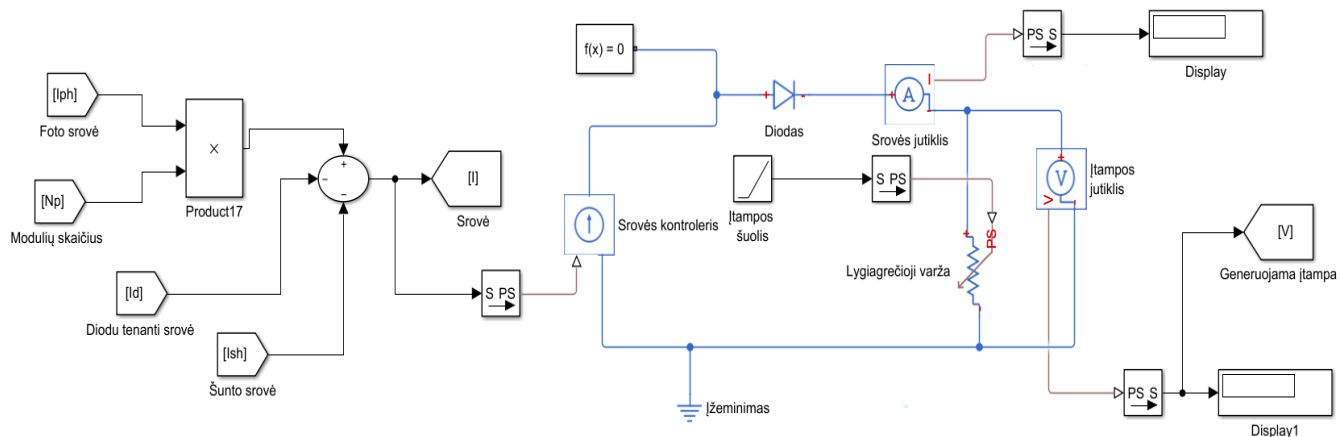
$$I_D = \left(\exp \frac{IR_S + V}{nV_t N_p N_s} - 1 \right) \times I_s N_p ; \quad (31)$$



32 pav. Diodu tekančios srovės lygtis Matlab/Simulink aplinkoje

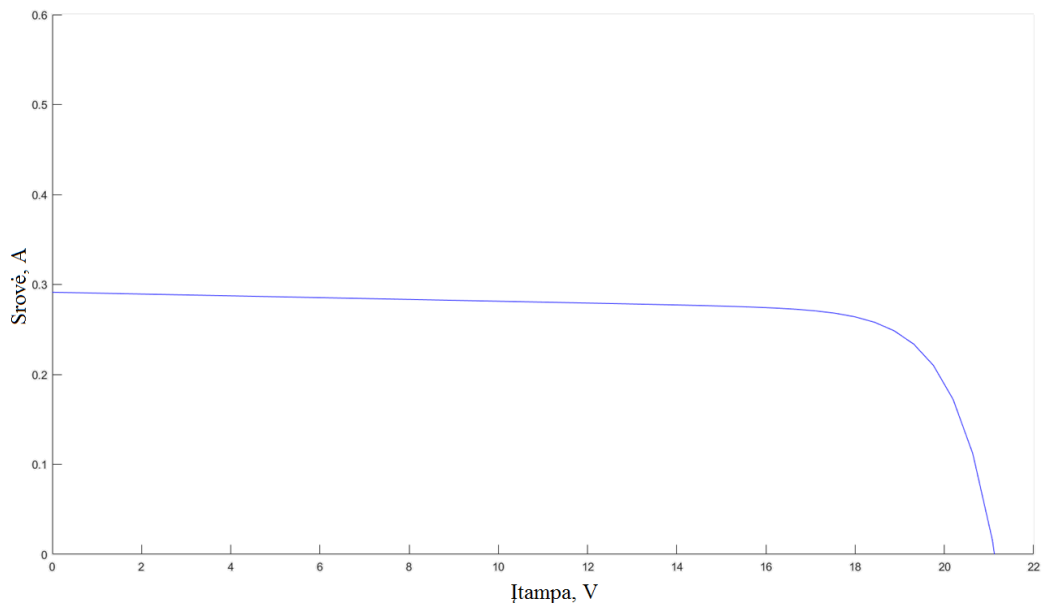
Matlab/Simulink aplinkoje sukuriama ekvivalentinė elektrinė fotoelektrinio modulio grandinė. Išėjimo parametruose gauname įtampos, srovės ir galios kreives. Matematinė šio modelio srovės lygtis (žr. 33 pav.):

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[\exp \left(\frac{\frac{V}{N_s} + I \times \frac{R_s}{N_p}}{n \times V_t} \right) - 1 \right] - I_{sh} ; \quad (23)$$

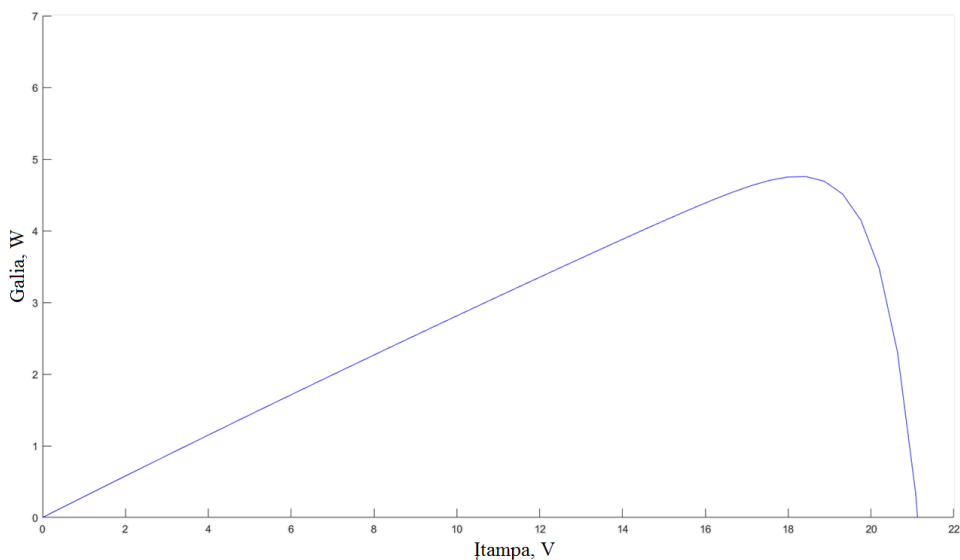


33 pav. Elektrinė ekvivalentinė fotoelektrinio modulio grandinė Matlab/Simulink aplinkoje

Atliekant fizinio modelio tyrimus, apšvitos matavimo prietaisu liuksmetru buvo išmatuotas apšvitos kiekis, tenkantis fotoelektrinio modulio aktyviajam paviršiui. Vidutinis modulio plokštumai tenkantis apšvitos kiekis yra 3150 liuksų. Konvertuojant liuksus į saulės apšvitą gaunamas 140 W/m^2 spindulių intensyvumas. Žinant spindulių intensyvumo kiekį, krentantį į fizinio modulio plokštumą, atliekamas matematinio modulio modeliavimas. Gaunamos modeliuojamo modelio išėjimo charakteristikos kreivės.



34 pav. ET-M53645 fotoelektrinio modulio matematinio modeliavimo srovės ir įtampos charakteristikos

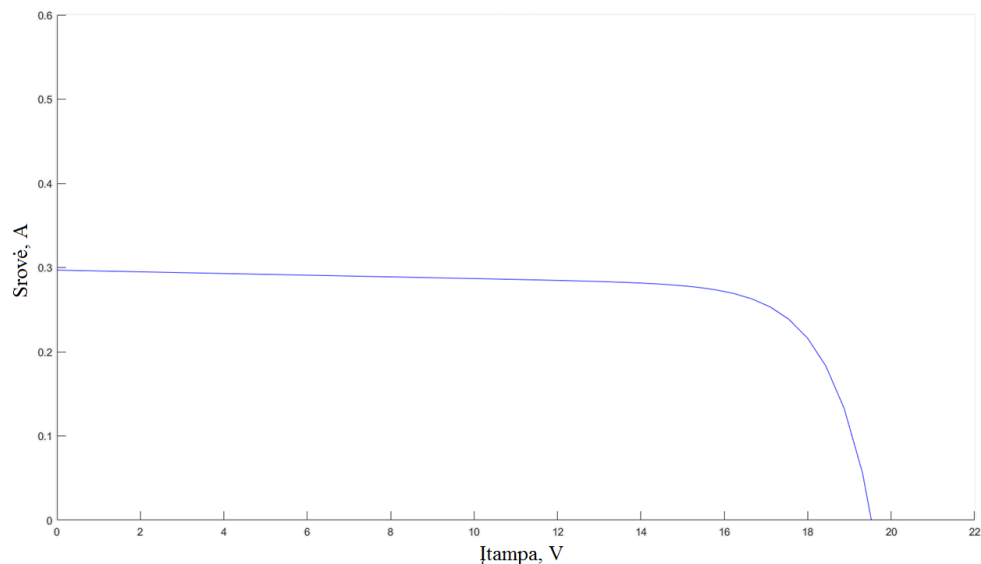


35 pav. ET-M53645 fotoelektrinio modulio matematinio modeliavimo įtampos ir galios charakteristikos

Fizinio ir matematinio modelio galios, įtampos ir srovės parametrai

Modulio tipas	Atviros grandinės įtampa, V	Trumpojo jungimo srovė, A	Galia, W
Fizinis modelis	19,8	0,28	5,544
Matematinis modelis	18,1	0,28	5,068

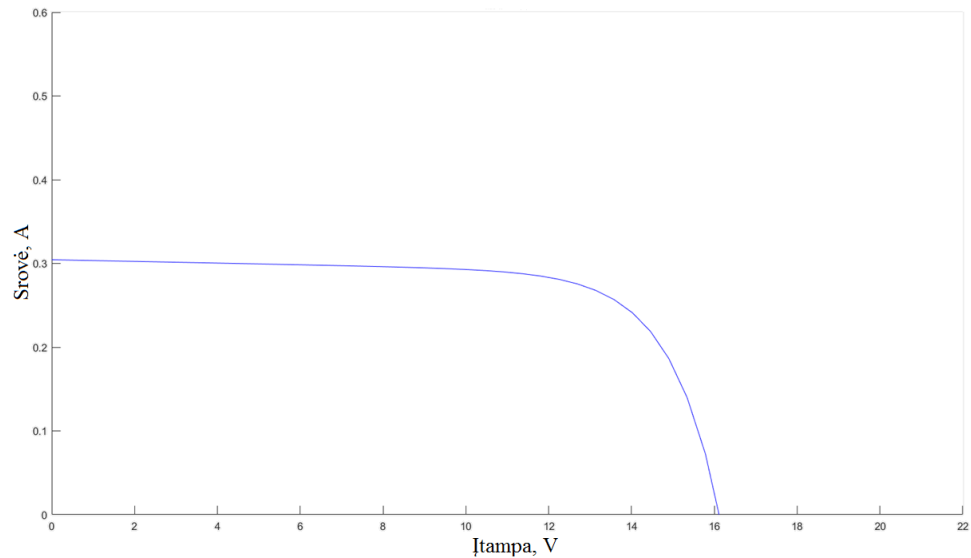
Matematinio modulio išėjimo parametrai palyginami su ET-M53645 fotoelektrinio saulės modulio parametrais (žr. 6 lent.). Nustatytas sistemų koreliacijos koeficientas atitinka 91,44 procento. Išėjimo galia, atviros grandinės įtampa ir trumpojo jungimo srovė nežymiai skiriasi nuo realių modulio išėjimo parametrų. Parametrai skiriasi, nes matematinis modelis neįvertina saulės spinduliuotės sklaidos, dėl kurios fizinio modelio generuojamos galios parametrai dažniausiai būna truputi didesni. Kai modulio paviršiaus temperatūra didėja, išėjimo galia ir įtampa mažėja, o išvesties srovė išlieka beveik pastovi. Tyrinėjant fizinį modelį, pastebėta, kad kai modulis įšyla iki 20 laipsnių Celsijaus darbinės temperatūros, jo atviros grandinės įtampa krenta iki 19,2 volto. Tuo tarpu minėtos temperatūros parametrai matematiniam modelyje sutampa su fizinio modulio reikšmėmis. Šunto lygiagrečioji varža taipogi turi reikšmingą įtaką saulės fotoelektrinio modulio darbo kreivėms, nes varžos pokytis svyruoja nuo 1000 iki 0,1 omų.



36 pav. ET-M53645 fotoelektrinio modulio matematinio modeliavimo įtampos ir srovės charakteristikos moduliui įkaitus iki 25 °C darbinės temperatūros

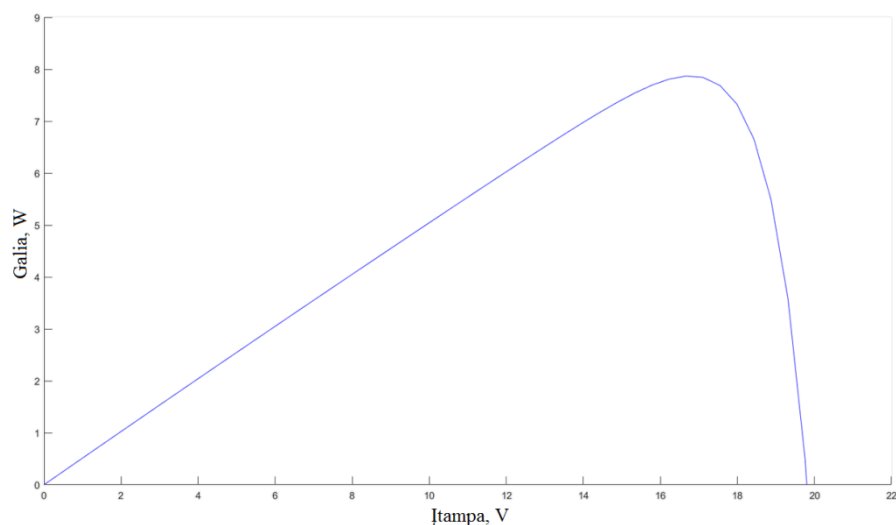
Modeliuojant įvertinama modulio darbinės temperatūros įtaka ženklus efektyvumo praradimui (žr. 37 pav.). Moduliui pasiekus 50 laipsnių Celsijaus darbinę temperatūrą, įtampa

krenta iki 16,1 V ir tai lemia, kad prie tokios temperatūros modulis generuoja 3,7 vatų galią esant vienodam apšvietimo intensyvumui.

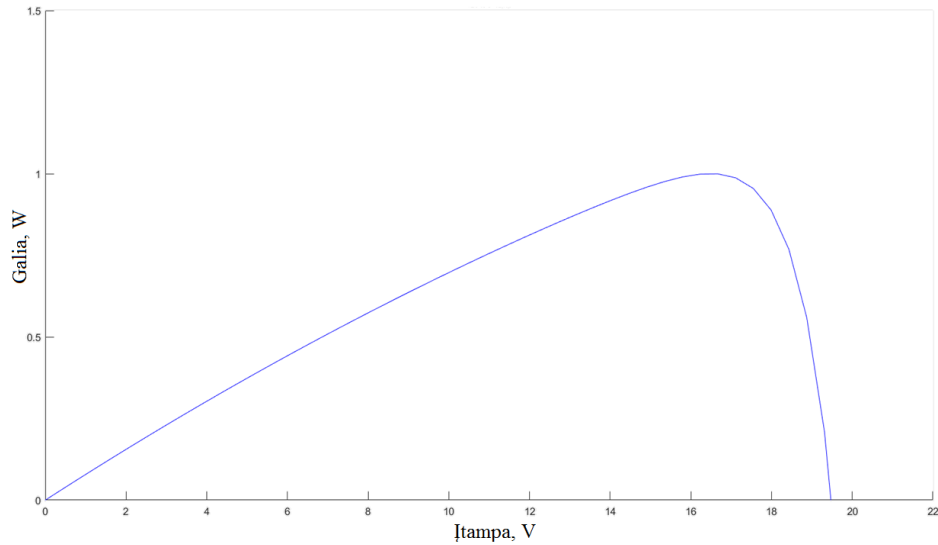


37 pav. Fotelektrinio modulio matematinio modeliavimo įtampos ir srovės charakteristikos moduliui įkaitus iki 50 °C darbinės temperatūros

Iš literatūros analizėje pateiktų Lietuvos hidrometeorologijos stoties duomenų, modeliuojant fizinį modulį, ištiriamos galimos fotelektrinio modelio parametrų charakteristikos prie skirtingų aplinkos sąlygų. Yra žinoma, kad saulės apšvitos intensyvumo vidurkis vasaros sezono, liepos mėnesį, yra 188 W/m², tuo tarpu žiemos sezono, vasario mėnesio, apšvitos vidurkis viso tesiekia 28 W/m². Žinant šiuos apšvitos kiekius, ištiriama kiek vidutiniškai, per pasirinktą laikotarpį, galios turėtų generuoti tiriamas ET-M53645 modulis. Įvertinama, kad modulio darbinė temperatūrą liepos mėnesį yra 25 °C, vasario mėnesį 5 °C.



38 pav. ET-M53645 fotelektrinio modulio tikėtinas galios generavimas liepos mėnesį



39 pav. ET-M53645 fotoelektrinio modulio tikėtinas galios generavimas vasario mėnesį

Modeliuojant matematinį fotoelektrinį modelį su turimais apšvitos parametrais, bet kurią pasirinktą dieną, galima preliminariai iširti būsimos valdymo sistemos efektyvumą.

5.4. Saulės judėjimo nustatymas

Norint tinkamai optimizuoti valdymo sistemą, sekančią saulės padėtį danguje, reikia žinoti saulės judėjimo trajektorijas kiekvieną metų dieną. Iš nagrinėtos literatūros žinoma, kad saulės aukštis, metų sezono atžvilgiu, pagal azimutą yra nevienodas. Norint pasiekti didžiausią sistemos našumą, ją reikia orientuoti pagal saulę žinant saulės trajektorijos aukštį kiekvieną metų dieną.

Žinant kokioje žemės vietoje veiks valdymo sistema, galima nustatyti tos vietovės geografinę platumą ir ilgumą. Šiuo atveju valdymo sistemos būsima veikimo vieta pasirinkta Kauno Technologijų universiteto, Panevėžio technologijų ir verslo fakulteto centrinė katedra, kurios adresas yra Nemuno gatvė 33. Šio adreso platumos koordinatės yra 55,72099 laipsnių, o ilgumos 24,34283 laipsnių [33]. Tiriamuoju atveju skaičiuojama saulės padėtis vasaros sezono saulėgrįžoje, birželio 22 dieną. Ši diena puikus atskaitos taškas, kurią galima proporcingai lyginti su žiemos sezono saulėgrįžos dienomis. Siekiant nustatyti saulės padėti, žinant, kad birželio 22 diena yra 173 metų diena, nustatomas nuokrypio kampas. Iš literatūros analizėje aprašyto saulės judėjimo nusakančių lygčių randamas nuokrypio kampas:

$$\delta = 23,45^{\circ} \sin \left[\frac{360(173 - 80)}{365} \right] = 23,84^{\circ}; \quad (1)$$

Dėl skirtingų ilgumos koordinačių, lyginant su laiko zona ir pasirinkta valdymo sistemos vieta, susidaro laiko skirtumas nuo vidurdienio, kada saulė pasirinktoje teritorijos vietoje pasiekia aukščiausią judėjimo trajektorijos tašką. Fotoelektrinio modulio montavimo vietovės geografinės ilgumos koordinatės yra 24,34283 laipsnių, o Lietuvos teritorija visa patenka į antrąją laiko zoną, kurios geografinės ilgumos koordinatės atitinka 30 laipsnių ilgumą. Šis laiko skirtumas nuo vidurdienio randamas pagal lygtį:

$$t = \frac{30 - 24,34283}{15} 60 = 22,41 ; \quad (2)$$

Pagal šias pasirinktas koordinates, birželio 22 dieną, saulė vidurdienį aukščiausią tašką pasieks 12 valandą 22 minutę ir 41 sekundę. Šis valandinis saulės padėties skirtumas nuo vidurdienio pasireiškia, nes saulė juda iš rytų į vakarus, o saulės aukštis nusakomas pagal atitinkama laiko zoną. Kadangi Lietuvos laiko zona yra 30 laipsnių ilgumoje, o pasirinktoje vietoje turime 24,34283 laipsnių ilgumą, atsiranda laiko skirtumas nuo vidurdienio, kada saulė pasiekia aukščiausią tašką.

Randamas vidurdienio padėties skirtumo kampas, kuris nusako saulės padėti nuo vidurdienio laipsniais:

$$h = \frac{12 - 12,37}{24} 360^0 = 5,55^0 ; \quad (6)$$

Įvertinus saulės nuokrypį nuo vidurdienio ir žinant geografinės platumos kampo koordinatės, bei įvertinus saulės vidurdienio padėti pagal pasirinktą dieną, randamas saulės aukščio kampas birželio 22 dieną vidurdienį pagal azimutą:

$$\alpha = \sin^{-1}[\sin\delta\sin\varphi + \cos\delta\cos\varphi\cos h]; \quad (4)$$

Iš šios lygties sinusas iškeliamas į priekį ir randamas saulės aukščio sinuso kampas:

$$\begin{aligned} \sin\alpha &= \sin 23,84 \times \sin 55 + \cos 23,84 \times \cos 55 \times \cos 5, \\ &= 0,404 \times 0,819 + 0,914 \times 0,573 \times 0,995 = 0,85 \end{aligned}$$

Žinant šį sinuso kampą pagal lygtį randamas azimuto kampas:

$$\gamma = \cos^{-1} \left[\frac{\sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \sin \varphi \cosh}{\cos \alpha} \right]; \quad (7)$$

Ši lygtis pertvarkoma iškeliant kosinusą į priekį ir randamas azimuto kampo kosinusas:

$$\cos \gamma = \frac{0,85 \times 0,819 - 0,404}{0,526 \times 0,573} = \frac{0,292}{0,3015} = 0,968$$

Saulės aukščio kampas pertvarkomas į laipsnius:

$$\alpha = \sin 0,85 = 58,25^{\circ};$$

Azimuto kampas pertvarkomas į laipsnius:

$$\gamma = \cos 0,968 = 14,5^{\circ};$$

Saulės aukščio kampas ir azimuto kampas nusako saulės padėtį vidurdienį remiantis antrosios laiko zonos (GMT+2) plokštumos koordinatėmis. Vidurdienį, birželio 22 dieną, saulės aukštis su plokštuma sudarys 55 laipsnių kampą ir azimuto kampas nuo antrosios laiko zonos plokštumos sudarys 60 laipsnių kampą.

Galiausiai, norint tiksliai žinoti saulės judėjimo trajektoriją pasirinktą dieną, reikia apskaičiuoti saulės patekėjimo ir nusileidimo už horizonto laiką. Visas horizontas sudaro 360 laipsnių, o 0 laipsnių azimuto vertė pasiekama, kai saulė būna aukščiausiam taške, perskiria horizontą į dvi dalis po 180 laipsnių. Žinant nuokrypio kampą ir kampą nuo pusiaujo, randamas saulės patekėjimo kampo kosinusas:

$$hs = 1,428 \times 0,441 = 0,631; \quad (5)$$

Saulės patekėjimo kampas pertvarkomas į laipsnius:

$$hs = \cos 0,631 = 51^{\circ};$$

Kadangi horizontas iki vidurdienio sudaro 180 laipsnių, atėmus saulės patekėjimo kampą gaunama saulės patekėjimo kampo reikšmė iki vidurdienio kampo pagal azimutą. $180^{\circ} - 51^{\circ} = 129^{\circ}$.

Žinant saulės patekėjimo kampą nuo vidurdienio padėties randame visos dienos saulės judėjimą horizonte valandomis:

$$H = \frac{48}{360} 129 = 17,19;$$

Šį saulės judėjimo laiką padalinus iš dviejų randamas laikas, per kurį saulė pasiekia vidurdienį $17,195/2 = 8,597$.

Saulės patekėjimas horizonte apskaičiuojamas pagal lygtį:

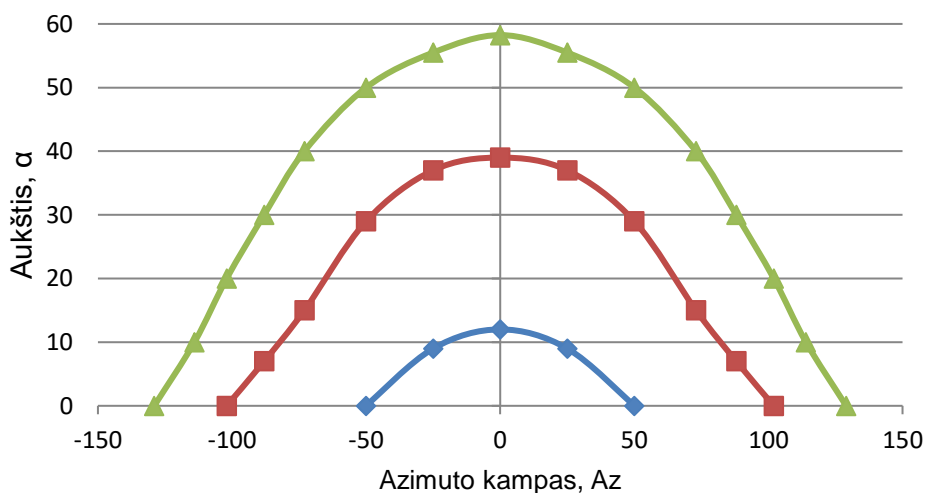
$$S_{patekėjimo} = 12 - \frac{H}{2} = 3,4; \quad (10)$$

Saulės nusileidimo laikas horizonte randamas:

$$S_{nusileidimo} = 12 + \frac{H}{2} = 20,597; \quad (11)$$

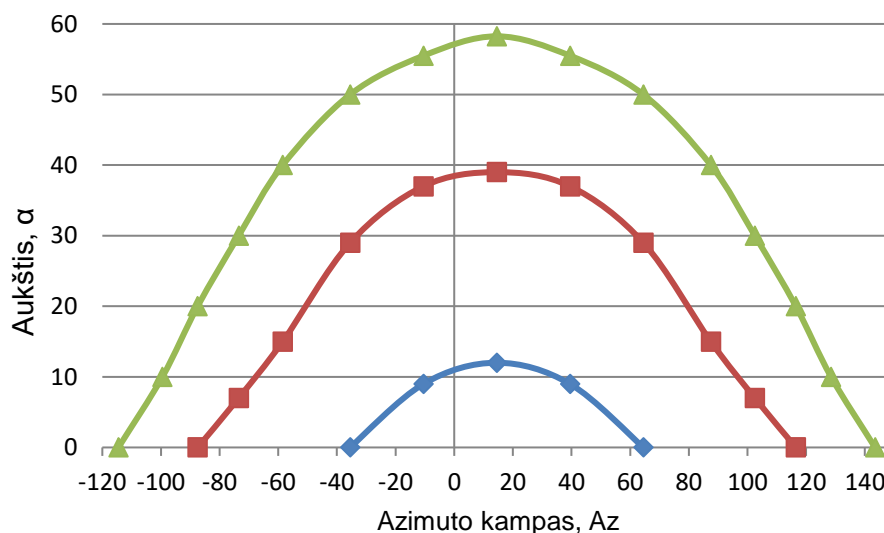
Iš šių paskaičiavimų matyti, kad pasirinktą birželio 22 dieną saulė patekės 3 valandą ir 40 minutę, visas judėjimas horizonte užtruks 17 valandų ir 19 minučių, o nusileis už horizonto 20 valandą ir 59 minutę.

Atlikus visus ankščiau minėtus skaičiavimus išsiaiškinta saulės judėjimo trajektorija pasirinkta diena. Randamas saulės judėjimas visos dienos bėgyje. Analogiškai atliekamas saulės padėties skaičiavimas rudens/pavasario ir žiemos sezonams pasirinktomis dienomis. Rudenio ir pavasario sezonams grafiškai pateikti saulės judėjimo trajektorijų skirtumui pakanka vienos kurios nors lygiadienio dienos skaičiavimo. Grafike pateikiama vasaros sezono birželio 22 dienos, rudens sezono rugsėjo 22 dienos lygiadienio ir žiemos sezono gruodžio 22 dienos saulės judėjimo trajektorijos pagal azimuto kampą kai ilgumos ir platumos koordinatės atitinka antrąją laiko zoną.



40 pav. Saulės judėjimo trajektorija pagal azimuto kampą kai ilgumos ir platumos koordinatės atitinka antrąją laiko zoną: žalia spalva vasaros sezonas (birželio 22 diena), raudona spalva rudens/pavasario sezonas (rugsėjo 22 diena), mėlyna spalva žiemos sezonas (gruodžio 22 diena)

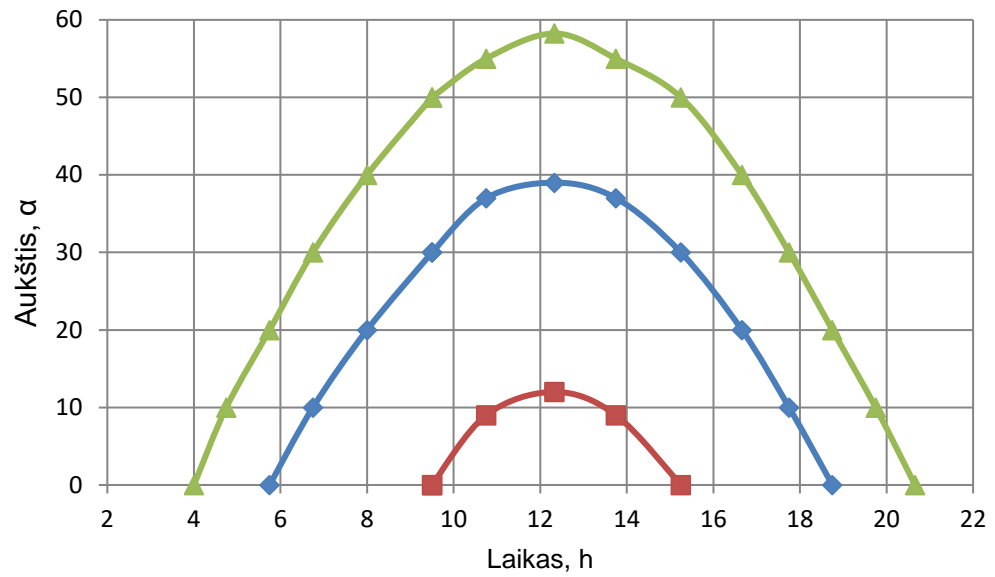
Azimuto kampo 0 laipsnių reikšmė prilyginama remiantis antrosios laiko zonos koordinatėmis. Atlikus skaičiavimus pasirinktoje valdymo sistemos vietoje, vidurdienį, aukščiausią tašką saulė pasieks 14,5 laipsnio nuo azimuto pradinės vertės. 41 paveikslėlyje pavaizduotas saulės judėjimo grafikas su 14,5 laipsnio poslinkiu nuo azimuto pradinės vertės.



41 pav. Saulės judėjimo trajektorija pagal azimuto kampą pasirinktoje valdymo sistemos vietoje: Žalia spalva vasaros sezonas (birželio 22 diena), raudona spalva rudens/pavasario sezonas (rugsėjo 22 diena), mėlyna spalva žiemos sezonas (gruodžio 22 diena)

Valdymo sistema saulės sekimą dažniausiai atlieka išskaičiuojant judėjimą pagal valandas. Taip pat iš ankstesnių skaičiavimų išsiaiškinta, kad saulė aukščiausią tašką vidurdienį pasirinktoje valdymo sistemos vietoje pasieks 12 valandą 22 minutę. Valandomis išreikštas saulės judėjimas atvaizduotas 42 paveikslėlyje.

Siekiant tikslingai atvaizduoti 42 paveikslėlyje pateiktą saulės judėjimą valandomis, nepaisomas vasaros ir žiemos sezonams taikoma laiko kaita. Žinant saulės judėjimo trajektorijas kiekvieną metų dieną, valdymo algoritmo pagalba, sekant saulę jos judėjimo trajektorijos tikslumu maksimaliai padidinamas sistemos našumas. Saulės trajektorijos sekimo tikslumas valdymo sistemoje priklausys tik nuo automatikos elementų tikslumo.

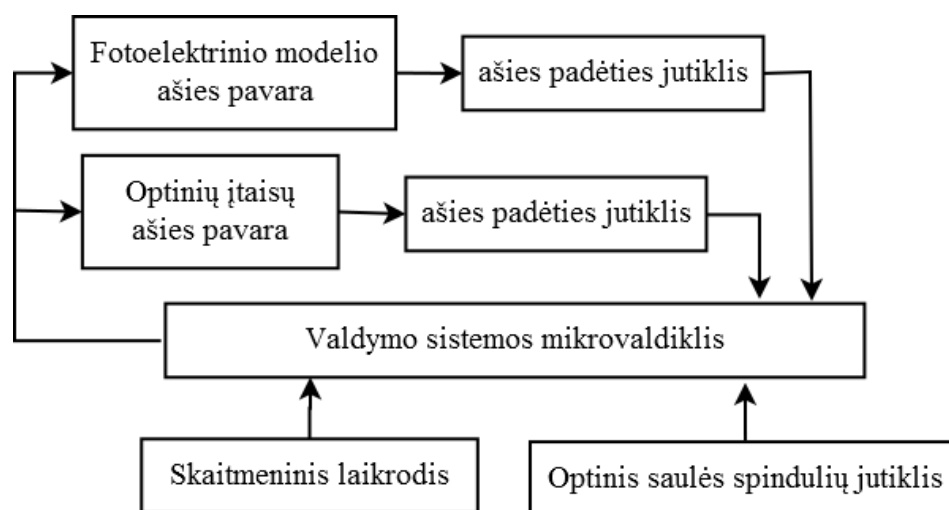


42 pav. Saulės judėjimo trajektorija dienoje pagal valandas: žalia spalva vasaros sezonas (birželio 22 diena), mėlyna spalva rudens/pavasario sezonas (rugsėjo 22 diena), raudona spalva žiemos sezonas (gruodžio 22 diena)

6. VALDYMO SISTEMOS PRINCIPAI

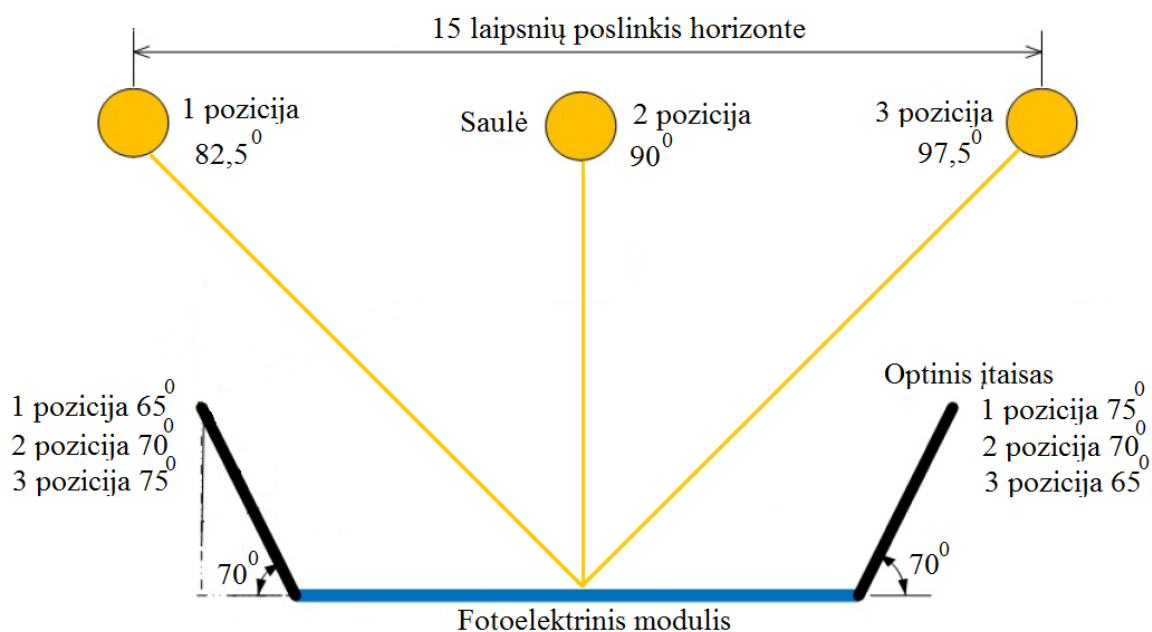
6.1. Fotelektrinio modulio valdymo sistemos struktūra

Fotelektrinių modulių sistemose, naudojant automatizuotas valdymo sistemas, sekant saulę pagal jos judėjimo kryptį, siekiama pasiekti didžiausio įmanomo fotelektrinio modulio našumo. Remiantis tyrimų metu surinktais duomenimis, sudaroma valdymo sistemos struktūrinė schema (žr. 43 pav.).



43 pav. Fotelektrinio modulio valdymo sistemos struktūrinė schema

Valdymo sistemos pagalba, naudojant spindulių koncentravimo įtaisus, siekiama maksimaliai padidinti modulio našumą nukreipiant saulės spindulius tinkamu kampu. Pagal siūlomus valdymo principus, fotelektrinis modulis dienos ciklo pradžioje orientuojamas į saulę taip, kad jai patekiant horizonte, modulio aktyvioji veikimo zona su saulės spinduliais sudaryti 82,5 laipsnio kampą. Iš literatūros analizės yra žinoma, kad saulė kas valanda horizonte pasisuka 15 laipsniu kampu. Fotelektrinis modulis, prabėgus valandai po saulės patekėjimo horizonte, su saulės spinduliais sudarys 97,5 laipsnių kampą. Pasibaigiant pirmajai valandai fotelektrinio modulio ašies pavara pasuka modulį horizontaliąją ašimi 15 laipsniu. Taip modulio aktyvioji zona su saulės spinduliais vėl sudaro 82,5 laipsnių kampą. Skaitmeninis laikrodis skaičiuoja laika ir taip kiekvieną valandą modulis sukamas 15 laipsniu kampu horizontaliąją ašimi. Taikant šiuos valdymo principus, fotelektrinis modulis su saulę pagal horizontaliąją ašį nuolatos sudarys 82,5 – 97,5 laipsnių kampus, tai jam leidžia pasiekti didžiausią įmanomą našumą orientuojant modulį šia ašimi (žr. 44.).



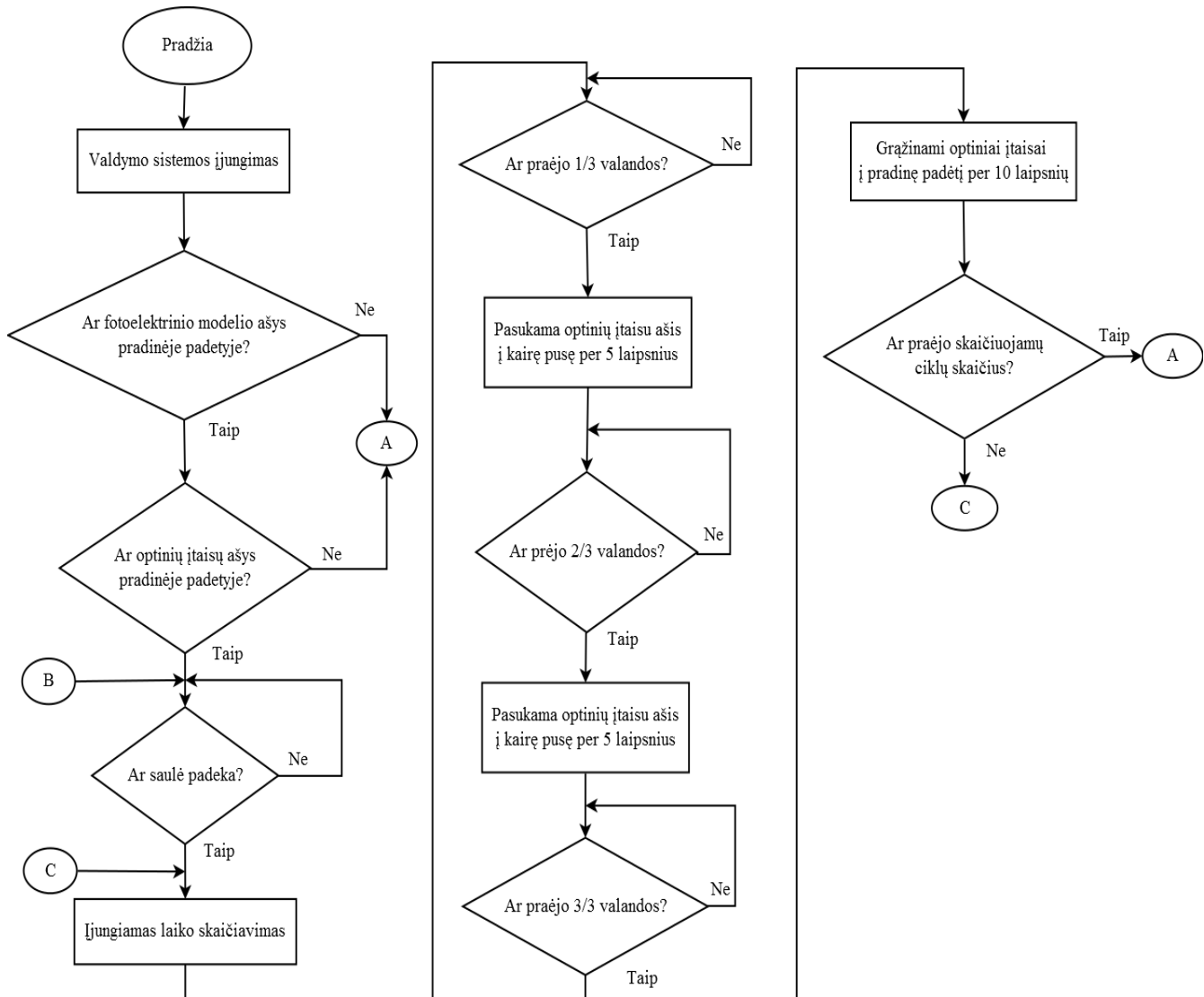
44 pav. Saulės judėjimo poslinkis valandoje

Optiniai koncentravimo įtaisai valdomi valandos bėgyje, sukant jų ašį du kartus, kas 20 minučių pagal saulės poziciją danguje. Optinių įtaisų padėtis keičiama kas 5 laipsnius. Šie įtaisai pirmųjų valandos dvidešimt minučių su modulio korpusu sudaro 65/75 laipsnių kampą. Tai yra pradinė pirmoji koncentratorių pozicija. Perėjus į antrąją valandos dalį, kai fotoelektrinis modulis su saule sudaro apytikriai 90 laipsnių kampą, optinių įtaisų horizontalioji ašis pakreipia koncentratorius į antrąją poziciją, kuri sudaro 70/70 laipsnių kampus. Trečiojoje valandos dalyje įtaisai pasukami į trečiąją poziciją, paskutiniąją valandos dalį jie su modulio korpusu sudaro 75/65 laipsnių kampus.

Čia pirmuoju kampo dydžiu nurodomas optinis įtaisas, orientuojamas fotoelektriniam moduliui iš kairės, antrasis kampo dydis yra dešinėje modulio pusėje esančio įtaiso kampo vertė laipsniais. Praėjus valandos ciklui ir horizontaliosios ašies pavarai pasukus modulį 15 laipsniu, optiniai įtaisai grąžinami į pradinę, pirmąją poziciją. Taikant šiuos koncentratorių valdymo principus ženkliai padidinamas surenkamų spindulių kiekis moduliui. Iš literatūros apžvalgos ir surinktų tyrimų duomenų žinoma, kad vertikaliosios ašies sukimas padidina sistemos efektyvumą apie 11 procentų. Vietoje vertikaliosios ašies valdymo siūloma optinių įtaisų valdymas našumą padidina 25 procentais. Šiuo valdymo principu vertikalioji fotoelektrinio modulio ašis stacionari.

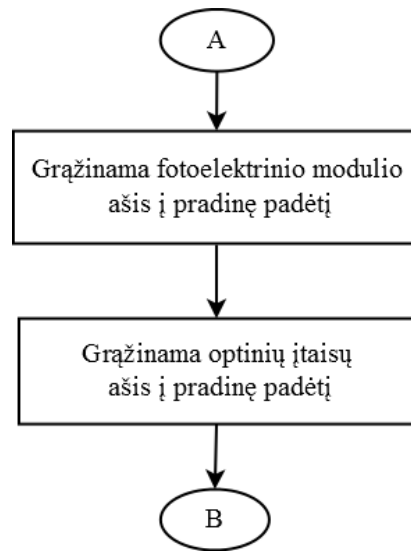
6.2. Sistemos valdymo algoritmas

Fotoelektrinio modulio sistemos valdymo algoritmas pavaizduotas 45 pav. Valdymo sistema paleidžiama nuspaudus paleidimo mygtuką, kuris aktyvuoja visus valdymo įrankius.



45 pav. Fotoelektrinio modulio sistemos valdymo algoritmas (pagrindinė programa)

Saulės sekimo valdymo sistema sudaryta iš pagrindinės valdymo programos ir paprogramės. Pagrindinė valdymo programa skaičiuoja laiką dienos bėgyje ir kiekvieną valandą elektros pavara pasuka modulio horizontaliąją ašį 15 laipsniu kampu. Kiekvienos valandos bėgyje, du kartus, kas 20 minučių, keičiamas optinių įtaisų orientacijos kampą. Pasibaigus ciklui optiniai įtaisai grąžinami į pradinę padėtį. Taip pat lygiagrečiai skaičiuojamas ciklų skaičius, kiek kartų pasukama modulio horizontalioji ašis. Įvykdžius dienoje esančių ciklų skaičių, sistema vykdo paprogramės kodą.



46 pav. Fotoelektrinio modulio sistemos valdymo algoritmas (paprogramės programa)

Paprogramė grąžina modulį ir optinius įtaisus į pradinės jų padėtis. Valdymo sistema tamsiuoju paros metu neveiksni. Suveikus optiniui saulės spindulių jutikliui sistema pradeda dienos ciklą iš naujo.

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

1. Ištyrus saulės spindulių kritimo kampo ir fotoelektrinio modulio našumo priklausomybes, gautos reikiamos modulio ašies valdymo charakteristikos. Nustatyta, kad modulis didžiausią našumą pasiekia, kai saulės spinduliai į modulio aktyviają zoną krenta sudarydami statųjį 90 laipsnių kampą. Taip pat pastebimas nežymus 4 procentų efektyvumo praradimas spinduliams į modulį krentant 85 – 95 laipsnių kampais.
2. Ištyrus optinių įtaisų spindulių koncentravimo ir fotoelektrinio modulio efektyvumo priklausomybės, gautos jų padėties valdymo charakteristikos. Nustatyta, kad optiniai įtaisai didžiausią koncentravimo koeficientą pasiekia, kai jų padėties orientacija su modulio korpusu sudaro 70 laipsnių kampą. Orientuojant įtaisus šiuo kampu, fotoelektrinio modulio našumas padidėja iki 36 procentų. Taip pat pastebimas nedidelis iki 3 procentų spindulių koncentravimo efektyvumo praradimas, optiniams įtaisams su moduliu sudarant 65 – 75 laipsnių kampus.
3. Atlikus matematinį fotoelektrinio modulio modeliavimą nustatomas fizinės sistemos ir matematinio modelio parametrų koreliacijos koeficientas kuris atitinka 91,41 procento. Sudarytas matematinis modelis leidžia tyrinėti bet kokią projektuojamą fizinę sistemą, netiriant jos fiziškai. Remiantis matematinio modelio duomenimis, darbe plačiau panagrinėjamas fizinės sistemos veikimas prie įvairių aplinkos sąlygų.
4. Nustatyta saulės judėjimo trajektorija pasirinktoje valdymo sistemos vietoje. Pagal turimas vietovės koordinatas apskaičiuotas saulės judėjimas horizonte kiekvieną metų dieną. Išsiaiškinti tikslūs saulės patekėjimo ir nusileidimo laikai, apskaičiuotas saulės aukštis dienos eigoje. Žinant tikslią saulės judėjimo trajektoriją pasirinktą dieną, parenkama tiksli valdymo sistema, sekanti saulę pagal jos judėjimo trajektoriją dangaus skliaute.
5. Siūlomas horizontaliosios ašies valdymas, pasukant fotoelektrinio modulio ašį kiekvieną valandą, padidina sistemos našumą iki 15 procentų. Siūlomas optinių įtaisų valdymas valandos bėgyje keičiant jų kampus modulio atžvelgiu kas 5 laipsnius, padidina sistemos našumą iki 36 procentų. Optinių įtaisų ašies valdymas siūlomas vietoje vertikaliosios fotoelektrinio modulio ašies valdymo. Vertikaliosios ašies valdymas padidina sistemos našumą iki 11 procentų, taigi siūlomas koncentratorių valdymas vietoje vertikaliosios ašies leidžia pasiekti iki 25 procentų didesnę sistemos našumą.

LITERATŪRA

1. V. Adomavičius, J. Valickas.: RES-based Energy Production In Lithuania In Context Of Global Environment Pollution And Climate Change. Departament Of Electrical Energy Systems And Departament Of Technologies, March 2016, Lithuania, Kaunas University Of Technology.
2. V. Adomavičius, J. Valickas, G. Petrauskas, L. Pušinaitis.: Potential Of Village House For Sustainable Energy Production. International Conference on Trends in Agricultural Engineering, 7 - 9 September 2016, Prague, Czech Republic.
3. *National Oceanic And Atmospheric Administration*. [interaktyvus]2017 [žiūrėta 2017-04-03]. Prieiga per: <http://www.noaa.gov/climate>
4. *UN COP21: Framework Convention on Climate Change*. [interaktyvus] Paris, 2015, 32 p. [žiūrėta 2017-04-01] Prieiga per:<https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>. Accessed 10 February 2017
5. *The Association of European Renewable Energy Research Centres*. [interaktyvus] 2017 [žiūrėta 2017-04-01].Prieaiga per: <http://www.eurec.be/en/>
6. *Aplinkos apsaugos agentūra*. [interaktyvus] 2017 [žiūrėta 2017-04-02] Prieiga per: <http://klimatas.gamta.lt/cms/index?rubricId=b9b37eae-b305-46a5-b794-d3d49c10c57d>
7. Solar Energy Perspectives: Executive Summary. International Energy Agency. December 2011. 19 - 22 p.
8. *Global Climate And Energy Projects: Exergy Flow Charts*. [interaktyvus] 2017 [žiūrėta 2017-04-17]. Prieiga per: <http://gcep.stanford.edu/research/exerycharts.html>
9. *Solar Heating Industry Review*. [interaktyvus] 2009 [žiūrėta 2017-04-17]. Prieiga per: http://www.worldofsolarthermal.com/solar_thermal_news/solar_water_heating_news/3258-Solar-Heating-Industry-Review-2009.html
10. *Saulės spinduliuotės atlasas. Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba*. [interaktyvus] 2018 [žiūrėta 2017-04-17] Prieiga per: <http://www.meteo.lt/lt/saules-spinduliuotes-atlasas>
11. Petrauskas G, Adomavičius V. *Saulės energijos naudojimas elektrai gaminti. Mokomoji knyga*. Kaunas: Technologija, 2012. 120 psl. ISBN 978-609-02-0752-9
12. Adomavičius V. *Mažosios atsinaujinančiųjų išteklių energijos sistemos. Mokomoji knyga*. Kaunas: Technologija, 2013. 292 psl. ISBN 978-609-02-0945-5
13. *Žemės judėjimas aplink orbita*. [interaktyvus] 2017 [žiūrėta 2017-11-14] Prieiga per: <http://publicradio1.wpengine.netdna-cdn.com/updraft/files/2014/09/Sept-22-equinox.jpg>
14. Jeong C.Seong. Sun position calculator (SPC) for Landsat imagery with geodetic latitudes Computers & Geosciences Volume 85, Part A, December 2015, Pages 68-74

15. A. A. Rizvi, K. Addoweesh, A. El-Leathy, and H. Al-Ansary, "Sun position algorithm for sun tracking applications," IECON Proc. (Industrial Electron. Conf., pp. 5595–5598, 2014.
16. Meier, D. L.; Davis, H. P.; Garcia, R.A.; Salami, J.; Rohatgi, A.; Ebong, A.; Doshi, P. 2001. Aluminum alloy back p-n junction dendritic web silicon solar cell, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 65: 621–627 p.
17. Green, Martin A. Archer, Mary D. *Clean Electricity From Photovoltaics (2nd Edition)*. Series on Photoconversion of Solar Energy, vol 4. Imperial College Oress, London. 2014. 677 psl. ISBN:9781848167674
18. M. Pikutis: *Fotovoltinės elektrinės intelektualaus valdymo kūrimas. Mokslo literatūros knyga*. Vilnius: VGTU leidykla, Technika, 2015. 116 p. ISBN 978-609-457-877-9
19. *Baltijos Saulės energija. Saulės moduliai*. [interaktyvus] 2017 [žiūrėta 2017-05-07] Prieiga per: <http://www.bsp.lt/lt/1-produktai>
20. *Energy Informacion Administracion, World Energy Projections*. [interaktyvus] 2017 [žiūrėta 2017-04-14] Prieiga per: <https://www.eia.gov/>
21. Adomavicius V., Kaminickas M. Analysis of PV power future development possibilities. *Energetika*. 2014. T60. Nr. 4. P. 233-248.
22. *Heliatek. New Organic Photovoltaic world record efficiency*. [interaktyvus] 2017 [žiūrėta 2017-05-08] Prieiga per: <http://www.heliatek.com/en/press/press-releases/details/heliatek-sets-new-organic-photovoltaic-world-record-efficiency-of-13-2>
23. Kiyoshi Y, Hideki T: *Photovoltaics : Developments, Applications and Impact*. *Energy Science, Engineering and Technology*, Nova Science Publishers, Inc. New York. 2010. 294 psl. ISBN: 9781608760220
24. Bletterie, B., Bründlinger R. and Lauss G. On the characterisation of PV inverters efficiency introduction to the concept of achievable efficiency, *Photovoltaics* 2011 19, 423–435 p.
25. H. Tian, F. Mancilla-david, K. Ellis, P. Jenkins, and E. Muljadi, "A Detailed Performance Model for Photovoltaic Systems Preprint," *Sol. Energy J.*, no. July, 2012.
26. Skoplaki E., Palyvos J.A. On The Temperature Dependence Of Photovoltaic Module Electrical Performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy* 83 2009, 614–624.
27. *Saulės elementų efektyvumas*. [interaktyvus] 2017 [žiūrėta 2017-05-14] Prieiga per: <http://rtn.elektronika.lt/rtn/9904/saulelem.html>
28. Gill, Monique A. *Photovoltaics : Synthesis, Applications and Emerging Technologies*. *Energy Science, Engineering and Technology*. New York. 2014. 220 psl. ISBN:978-1-63117-844-3

29. *Saulės patekėjimo lygtys*. [interaktyvus] 2018 [žiūrėta 2018-01-04] Prieiga per:
https://en.wikipedia.org/wiki/Sunrise_equation
30. G. Dzimano. “Modeling of Photovoltaic Systems,” *Master’s Thesis*, The Ohio State University 2008.
31. Huld T., Friesen G., Skoczek A., Kenny R. P., Sample T., Field M., Dunlop E. D. A Power-Rating Model For Crystalline Silicon PV Modules. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 2011 95, 3359–3369.
32. Reis, V., Sant, D. S., Filho, D. O., Egido, M. A., Ribeiro, A., Flauzino, A., ... Ferreira, F. (2015). Photovoltaic Systems with and without Radiation Concentrators for Temperate and Tropical Regions, (April 2012), 12505–12529.
33. *Geografinės pasirinktos vietos ilgumos ir platumos koordinatės*. [interaktyvus] 2017 [žiūrėta 2017-11-04] Prieiga per:
[https://www.google.lt/maps/place/55°43'13.0"N+24°20'33.1"E/@55.720283,24.3419798,19z/data=!3m1!4b1!4m13!1m6!4m5!1m3!2m2!1d24.3424037!2d55.7202876!1m0!3m5!1s0x0:0x0!7e2!8m2!3d55.7202832!4d24.3425268?hl=en](https://www.google.lt/maps/place/55°43'13.0)

Fotoelektrinio modulio parametrai keičiantis spindulių kritimo kampui pagal horizontaliąją plokštumą

Kampas, °	Atviros grandinės Įtampa, V	Trumpo jungimo srovė, A	Galia, W
5	15,6	0,04	0,624
10	15,7	0,05	0,785
15	16	0,07	1,12
20	16,3	0,09	1,467
25	16,7	0,09	1,503
30	17,1	0,11	1,881
35	17,4	0,12	2,088
40	17,8	0,14	2,492
45	18	0,15	2,7
50	18,5	0,17	3,145
55	18,7	0,2	3,74
60	19	0,22	4,18
65	19,2	0,24	4,608
70	19,5	0,25	4,875
75	19,7	0,26	5,122
80	19,8	0,26	5,148
85	19,8	0,27	5,346
90	19,8	0,28	5,376
95	19,8	0,27	5,346
100	19,8	0,25	4,95
105	19,7	0,25	4,925
110	19,6	0,23	4,508
115	19,3	0,22	4,246
120	19	0,21	3,99

1 lentelės tęsinys kitame puslapyje

1 lentelės tęsinys

125	18,8	0,19	3,572
130	18,5	0,15	2,775
135	18,2	0,14	2,548
140	17,7	0,12	2,124
145	17,4	0,10	1,74
150	17	0,09	1,53
155	16,6	0,09	1,494
160	16,2	0,07	1,134
165	15,9	0,06	0,954
170	15,7	0,04	0,628
175	15,5	0,04	0,62

2 lentelė

Fotoelektrinio modulio parametrai keičiantis spindulių kritimo kampui pagal vertikaliają plokštumą

Kampas, °	Atviros grandinės Įtampa, V	Trumpo jungimo srovė, A	Galia, W
5	15,2	0,04	0,608
10	15,3	0,05	0,765
15	15,6	0,06	0,936
20	15,9	0,06	0,954
25	16,1	0,08	1,288
30	16,4	0,09	1,476
35	16,8	0,11	1,848
40	17	0,13	2,21
45	17,4	0,14	2,436
50	17,8	0,17	3,026
55	18,1	0,19	3,439
60	18,5	0,2	3,7

2 lentelės tęsinys kitame puslapyje

65	18,9	0,22	4,158
70	19,1	0,25	4,775
75	19,5	0,26	5,07
80	19,7	0,28	5,516
85	19,8	0,29	5,742
90	19,9	0,30	5,97
95	19,8	0,29	5,742
100	19,8	0,27	5,346
105	19,7	0,25	4,925
110	19,4	0,24	4,656
115	19,1	0,22	4,202
120	18,8	0,2	3,76
125	18,6	0,18	3,348
130	18,4	0,15	2,76
135	18	0,13	2,34
140	17,7	0,10	1,77
145	17,2	0,09	1,548
150	16,8	0,07	1,176
155	16,5	0,06	0,99
160	16,1	0,04	0,644
165	15,8	0,04	0,632
170	15,4	0,04	0,616
175	15,3	0,03	0,459

Fotoelektrinio modulio parametrai keičiant veidrodžių kampą

Kampas, °	Atviros grandinės Įtampa, V	Trumpo jungimo srovė, A	Galia, W
5	19,8	0,28	5,544
10	19,8	0,28	5,544
15	19,8	0,28	5,544
20	19,8	0,28	5,544
25	19,8	0,28	5,544
30	19,8	0,28	5,544
35	19,8	0,28	5,544
40	19,8	0,28	5,544
45	19,8	0,29	5,742
50	19,8	0,29	5,742
55	19,8	0,30	5,94
60	20	0,32	6,4
65	20,3	0,38	7,714
70	20,5	0,39	7,995
75	20,4	0,38	7,752
80	20,3	0,35	7,105
85	20,3	0,32	6,496
90	20,2	0,30	6,06

Fotoelektrinio modulio parametrai keičiant veidrodinės plėvelės kampą

Kampas, °	Atviros grandinės Įtampa, V	Trumpo jungimo srovė, A	Galia, W
5	19,8	0,28	5,544
10	19,8	0,28	5,544
15	19,8	0,28	5,544
20	19,8	0,28	5,544
25	19,8	0,28	5,544
30	19,8	0,28	5,544
35	19,8	0,28	5,544
40	19,8	0,28	5,544
45	19,8	0,28	5,544
50	19,8	0,28	5,544
55	19,8	0,30	5,94
60	19,9	0,36	7,164
65	19,9	0,41	8,159
70	20	0,42	8,4
75	20,1	0,41	8,241
80	20,3	0,37	7,511
85	20,3	0,34	6,902
90	20,3	0,30	6,09

Fotoelektrinio modulio generuojamos galios priklausomybė nuo optinių įtaisų orientacijos kampo padėties

Kampo padėtis, °	Atviros grandinės Įtampa, V	Trumpo jungimo srovė, A	Galia, W
60/55	20	0,34	6,8
65/60	20,1	0,36	7,236
70/65	20,3	0,40	8,12
75/70	20,2	0,40	8,08
80/75	20	0,38	7,6
85/80	19,9	0,36	7,164
90/85	19,9	0,32	6,368

