



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS

Tomas Bureika

MIKROTINKLO FOTOELEKTRINIO MODULIO VALDYMO
TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Jonas Valickas

PANEVĖŽYS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS

**MIKROTINKLO FOTOELEKTRINIO MODULIO VALDYMO
TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Valdymo technologijos (kodas 621H66001)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Jonas Valickas
(data)

Recenzentas

(parašas) prof. dr. Vytenis Sinkevičius
(data)

Projektą atliko

(parašas) Tomas Bureika
(data)



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS

(Fakultetas)

Tomas Bureika

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos 621H66001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Mikrotinklo fotoelektrinio modulio valdymo tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 _____ m. _____ d.
_____ Panevėžys _____

Patvirtinu, kad mano, **Tomo Bureikos**, baigiamasis projektas tema „**Mikrotinklo fotoelektrinio modulio valdymo 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)

20..... ..

BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Išduota studentui: Tomui Bureikai Grupė PME-4

1. Darbo tema:

Lietuvių kalba: Mikrotinklo fotoelektrinio modulio valdymo tyrimas

Anglų kalba: Research of Micro Grid photovoltaic Module Control System

Patvirtinta 20__ m. _____ mėn. _____ d. dekanas potvarkiu Nr. _____

2. Darbo tikslas:

Ištirti fotoelektrinio modulio panaudojimo ir efektyvumo didinimo metodus elektros energijos gamybos lokaliniuose mikrotinkluose. Išanalizuoti mikrotinklo srovės ir jėgimo galios valdymo priemonės. Ištirti fotoelektrinio modulio modelį, ištirti valdymo charakteristikas, gauti mechaninių įtėpių priklausomybes su skirtingais vėjo greičio parametrais. Sudaryti automatinę valdymo sistemą, kuri galėtų spręsti klimato kaitos problemas.

3. Reikalavimai ir sąlygos:

Naudojantis „Comsol Multiphysics“ programinės įrangos priemonėmis ištirti fotoelektrinio modulio modelį, gauti valdymo charakteristikas. Sudaryti Matlab Simulink tiesiaieigės pavaros modelį. Ištirti ir įvertinti pavaros apkrovų priklausomybes.

4. Projekto struktūra. Turinys konkretizuojamas kartu su vadovu, atsižvelgiant į BP pobūdį.

Magistrinio baigiamojo darbo projekto analitinė dalis susideda iš fotoelektrinių modulių analizės, jų panaudojimo aktualumo, efektyvumo didinimo galimybių, priemonių taikymo ir mikrotinklo šaltinių valdymo galimybių analizės. Tiriamojame dalyje atliekamos matematinio modeliavimo operacijos naudojant Comsol programinį paketą, ištirtas fotoelektrinis modulio modulis, gautos vėjo įtėpių priklausomybės veikiant skirtingais vėjo greičiais. Naudojantis Matlab Simulink programinės įrangos instrumentinėmis priemonėmis sudaryta tiesiaieigės sraigtinės elektros pavaros modelis, kuriame atliekami eksperimentiniai matavimai nustatant skirtingas apkrovų jėgų vertes. Tyrimų ir eksperimentinių matavimų eigoje sudaroma automatinė blokinė valdymo sistema sprendžianti fotoelektrinių modulių nepertraukiamą elektros energijos tiekimą ir apsaugą nuo avarinių situacijų dėl didelio vėjo greičio.

5. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo projekto dalis.

6. Projekto pateikimo gynimui kvalifikacinėje komisijoje terminas

Užduotį gavau: _____

(studento vardas, pavardė, parašas)

(data)

(data)

Vadovas: _____

(pareigos, vardas, pavardė, parašas)

(data)

Bureika, Tomas. Mikrotinklo fotoelektrinio modulio valdymo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Jonas Valickas; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas, technologijų katedra. Lietuvių kalba, 66 puslapiai, 37 paveikslėliai, 10 lentelių, 19 formulių.

Mokslo kryptis ir sritis: valdymo technologijos

Reikšminiai žodžiai: alternatyvi energija, atsinaujinanti energetika, mikrotinklas, fotoelektrinis modulis, modeliavimas, algoritmas, valdymas.

Panevėžys, 2016. 66 p.

SANTRAUKA

Fotoelektrinių modulių naudojimo būdai vis labiau išryškina gausybę įvairių technologinių problemų. Klimato sąlygų nestabilumas, oro dulketumas stipriai mažina fotoelektrinių modulių efektyvumą. Nuo stipraus vėjo kenčia modulių mechaninės konstrukcijos, atsiranda elektros energijos tiekimo problemų. Šiame darbe nagrinėjamas fotoelektrinio modulio modeliavimas „Comsol Multiphysics“ programine įranga, kuria remiantis gautos valdymo charakteristikos ir sudaroma automatinė valdymo blokinė schema, galinti išspręsti daugelį keliamų problemų.

Bureika Tomas.: *Master's* thesis in Research of Micro Grid photovoltaic Module Control System / supervisor assoc. professor Valickas Jonas. Panevėžio technology and business faculty, Department of Technology. Lithuanian language, 66 pages, 37 images, 10 tables, 19 formulas.

Research area and field: control technology

Key words: alternative energy, renewable energy, micro-grids, photovoltaic modules, simulations, algorithms, control.

Panevėžys, 2016. 66 p.

SUMMARY

The use of Photovoltaic modules increasingly brings a number of various technological problems. Instability in climate conditions and dust pollution strongly reduces the efficiency of photovoltaic modules. Strong winds affect modules mechanical structure resulting in electrical power supply problems. The main focus of this thesis is to examine the photoelectric module modeling „Comsol Multiphysics“ software, which is based on the received handling characteristics and automatic control block diagram, which in turn can solve many of photovoltaic modules challenges.

IVADAS

Sparčiai didėjant elektros energijos poreikiui, vis dažniau kyla klausimų dėl iškastinio kuro poreikio ir teršiamos gamtos. Jei ateityje gyventume su tokiais pat elektros energijos suvartojimo poreikiais, tai per ateinančius 25 metus elektros energijos suvartojimas daugiau nei padvigubėtų. Šiuo metu tradicinis energetikos sektorius aplinką teršia iki 50 %, o transportas – 30 %. Didelis aplinkos užterštumas kelia vis rimtesnį pavojų atmosferai, vandeniui, žemei, bei visai biosferai. Šie rodikliai verčia aktyviau susimąstyti apie alternatyvios energetikos vystymą ir plėtoją [1, 9].

Didžiausias alternatyvios energijos tiekimo efektyvumas pasiekiamas mikrotinkle, kuriame yra lokaliai sujungiami įvairaus tipo alternatyvios energijos šaltiniai ir kaupikliai. Fotoelektrinių modulių naudojimo būdai vis labiau išryškina gausybę įvairių technologinių problemų. Klimato sąlygų nestabilumas, oro dulkėtumas stipriai mažina fotoelektrinių modulių efektyvumą. Nuo stipraus vėjo kenčia modulių mechaninės konstrukcijos, atsiranda elektros energijos tiekimo problemos. Šiame straipsnyje yra nagrinėjamas fotoelektrinio modulio modeliavimas „Comsol Multiphysics“ programine įranga, kuria remiantis buvo gautos valdymo charakteristikos ir sudaroma automatinė valdymo blokinė schema, kuri gali išspręsti daugelį keliamų problemų.

Darbo metodai: mokslinė literatūros analizė, modeliavimas ir eksperimentiniai tyrimai.

Darbo objektas: Fotoelektrinio modulio efektyvumo gerinimas ir jo valdymo galimybių tyrimas.

Darbo tikslas ir uždaviniai: ištirti fotoelektrinio modulio modelį, ištirti valdymo charakteristikas, gauti mechaninių įtempių priklausomybes su skirtingais vėjo greičio parametrais naudojantis „Comsol Multiphysics“ programinės įrangos priemonėmis. Sumodeliuoti ir ištirti tiesiaieigę elektros pavarą, atlikti eksperimentinius matavimus nustatant apkrovų vertes. Pagal gautus duomenis sudaryti valdymo charakteristikas, kurios apibrėžtų optimaliausią ir efektyviausią fotoelektrinio modulio panaudojimo būdą.

TURINYS

1.SAULĖS ENERGIJOS IŠTEKLIŲ PASISKIRSTYMAS LIETUVOJE IR EUROPOJE.....	10
2.SAULĖS ELEKTROS ENERGIJOS GAMYBA LIETUVOJE IR PASAULYJE.....	13
3.ALTERNATYVIOS ENERGIJOS MIKROTINKLAS.....	15
3.1. Mikrotinklo valdymo režimas.....	16
3.2. Mikrotinklo jėgimo galios valdymas.....	16
3.3. Mikrotinklo srovės valdymas.....	17
4.FOTOELEKTRINIŲ MODULIŲ ANALIZĖ.....	19
4.1. Fotoelektrinio elemento veikimo principas.....	20
4.2. Pirma karta. Silicio kristalo fotoelektriniai moduliai.....	22
4.2.1. Monokristaliniai fotoelektriniai moduliai.....	22
4.2.2. Polikristaliniai fotoelektriniai moduliai.....	23
4.3. Antra karta. Plonasluoksniai fotoelektriniai moduliai.....	24
4.3.1. Amorfiniai ir mikromorfiniai silicio kristalo (a – Si / μ – Si) fotoelektriniai moduliai.....	25
4.3.2. Kadmio telūrido (CdTe) fotoelektriniai moduliai.....	26
4.3.3. Vario, indžio selenido (CIS) ir vario, indžio, galio diselenido (CIGS) fotoelektriniai moduliai.....	27
4.4. Trečioji karta. Naujos technologijos ir perspektyvos.....	27
4.4.1. Nanokristalinės fotoelektrinės celės.....	28
4.4.2. Polimeriniai fotoelektriniai moduliai.....	28
4.4.3. Dažais įjautrinti fotoelektriniai moduliai.....	29
4.4.4. Koncentruoti fotoelektriniai moduliai.....	30
4.5. Skyriaus išvados.....	31
5.FOTOELEKTRINIŲ MODULIŲ EFEKTYVUMO TYRIMAS.....	32
5.1. Silicio kristalo fotoelektrinio modulio efektyvumo tyrimas.....	33
5.2. Plonasluoksnio kadmio telūrido (CdTe) fotoelektrinio modulio efektyvumo tyrimas.....	36
5.3. Dviejų ašių saulės sekimo sistema.....	39
5.4. Saulės sekimo sistemos valdymas.....	41

5.5. Skyriaus išvados.....	43
6. TIRIAMOJI DALIS.....	45
6.1. Foelektrinio modulio modeliavimas.....	45
6.2. Foelektrinio modulio prototipo naudojamos medžiagos.....	46
6.3. Mechaninių įtempių matematinis modeliavimas pasvirusioje plokštumoje.....	46
6.4. Oro turbulencijos matematinis modeliavimas.....	48
6.5. Ekstremalios turbulencijos modelis.....	49
6.6. Staigaus vėjo gūžio ir krypties pasikeitimo modelis.....	49
6.7. Tyrimo rezultatai.....	50
6.8. Tiesiaeigės sraigtinės pavaros modeliavimas ir tyrimas.....	52
6.9. Tyrimo rezultatai.....	55
6.10. Foelektrinio modulio valdymo sistema.....	60
6.11. Skyriaus išvados.....	62
7. IŠVADOS IR REZULTATAI.....	63
8. LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	64

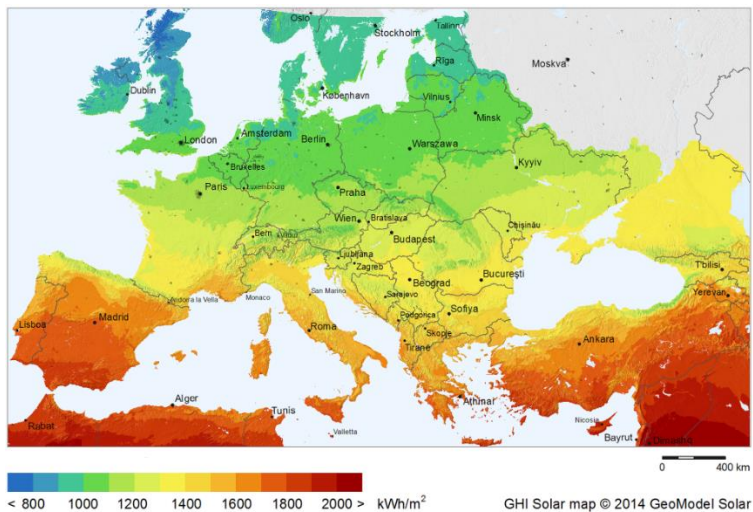
1. SAULĖS ENERGIJOS IŠTEKLIŲ PASISKIRSTYMAS LIETUVOJE IR EUROPOJE

Saulės energijos ištekliai Lietuvoje yra pakankamai geri saulės energetikai plėtoti ir vystyti. Šiuo metu susidarė tokia situacija, kad mokslininkai ir įvairūs specialistai taikosi būtent į saulės fotoelektrinius modulius, kadangi tai yra pats galingiausias Žemėje atsinaujinančios energijos šaltinis. Fotoelektrinių modulių technologijos yra viena iš labiausiai besivystančių sričių per visą elektros energijos gamybos istoriją, o verslininkai nuolatos investuoja į naujoves ir inovacijas. Dėl šių kriterijų nuolat pinga fotoelektriniai moduliai, fotoelektrinės sistemos ir joms skirtos galios elektronikos įranga. Šiuo metu daug šalių yra investavusios į saulės energetiką, tarp jų ir tokios, kurių saulės energijos ištekliai panašūs kaip ir Lietuvos. Per 2009 m. Čekijoje įrengtų saulės elektrinių bendroji galia sudarė 411 MW, o Belgijoje – 292 MW. Lietuvoje didžiausi saulės energijos ištekliai yra vakarinėje šalies dalyje, prie jūros. Maksimali metinė ekspozicija horizontaliojoje plokštumoje Nidoje siekė 1042 kWh/m². Mažiausi saulės energijos ištekliai yra šiaurės rytinėje ir rytinėje šalies dalyje. Minimali metinė ekspozicija horizontaliojoje plokštumoje Biržuose – 926 kWh/m². Vidutinė metinė ekspozicija horizontaliojoje plokštumoje Lietuvoje siekia apytiksliai 1000 kWh/m². Didžiausia vidutinės metinės ekspozicijos horizontaliojoje plokštumoje nuokrypa nuo šalies vidurkio bet kuriame Lietuvos teritorijos taške sudaro ne daugiau kaip 5,9 %. Palyginimui galime paimti keletą pasaulio šalių ir pasižiūrėti, kaip yra pasiskirstę elektros energijos ištekliai [1]:

- Estijoje, Danijoje sudaro 950 – 1000 kWh/m²;
- Olandijoje, Belgijoje, Lietuvoje, Latvijoje sudaro 950 – 1050 kWh/m²;
- Lenkijoje sudaro 950 – 1100 kWh/m²;
- Čekijoje sudaro 1000 – 1100 kWh/m²;
- Vokietijoje sudaro 950 – 1200 (Alpių kalnuose – 1350) kWh/m²;
- Ukrainoje sudaro 1100 – 1380 kWh/m²;
- Rumunijoje sudaro 1150 – 1400 kWh/m²;
- Italijoje sudaro 1100 – 1800 (Sicilijoje) kWh/m²;
- Vidurinėje Azijoje sudaro 1400 – 2000 kWh/m².

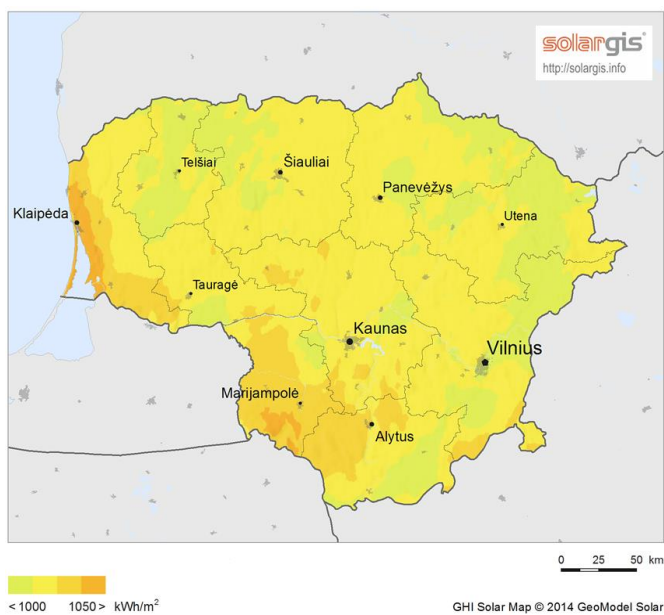
Visai nesunkiai galime atlikti Saulės energijos išteklių pasiskirstymo tyrimą remdamiesi įvairiomis duomenų bazėmis, kurios laikui bėgant yra atnaujinamos. Visa informacija yra kaupiama meteorologinėse stotyse, naudojant šiuolaikiškas pažangias technologijas. Viena tikslesnių ir geriau žinomų tokio tipo duomenų bazių yra „Solargis“. Ši duomenų bazė kaupia duomenis naudojant

pažangiausią naujos kartos „Himawari 8“ palydovą, jo savininkai - japonų meteorologinė agentūra, kuri įsikūrusi 2016 m. Norint atlikti nuodugnius tyrimus naudojantis konkrečiomis priemonėmis ar technologijomis, ši paslauga yra mokama, tačiau esamos šalies energijos išteklių pasiskirstymą galime gauti nemokamai. 1 pav. pateikiama iliustracija, kurioje grafiškai spalvų palete pavaizduotas Saulės energijos išteklių pasiskirstymas visoje Europoje [3]:



1 pav. Saulės energijos išteklių pasiskirstymas Europoje

Remiantis 1 pav. duomenimis, galime daryti išvadą, kad Lietuvoje saulės energijos išteklių pasiskirstymas yra labai panašus kaip Vokietijoje, Lenkijoje ir Baltarusijoje. 2 pav. pateikiamas Saulės energijos išteklių pasiskirstymas Lietuvos teritorijoje.



2 pav. Saulės energijos išteklių pasiskirstymas Lietuvoje

Remiantis 2 pav. duomenimis, galime daryti išvadą, kad didžiausi saulės energijos ištekliai yra Kuršių nerijos, Klaipėdos, Marijampolės ir Alytaus apskričių teritorijose.

2. SAULĖS ELEKTROS ENERGIJOS GAMYBA LIETUVOJE IR PASAULYJE

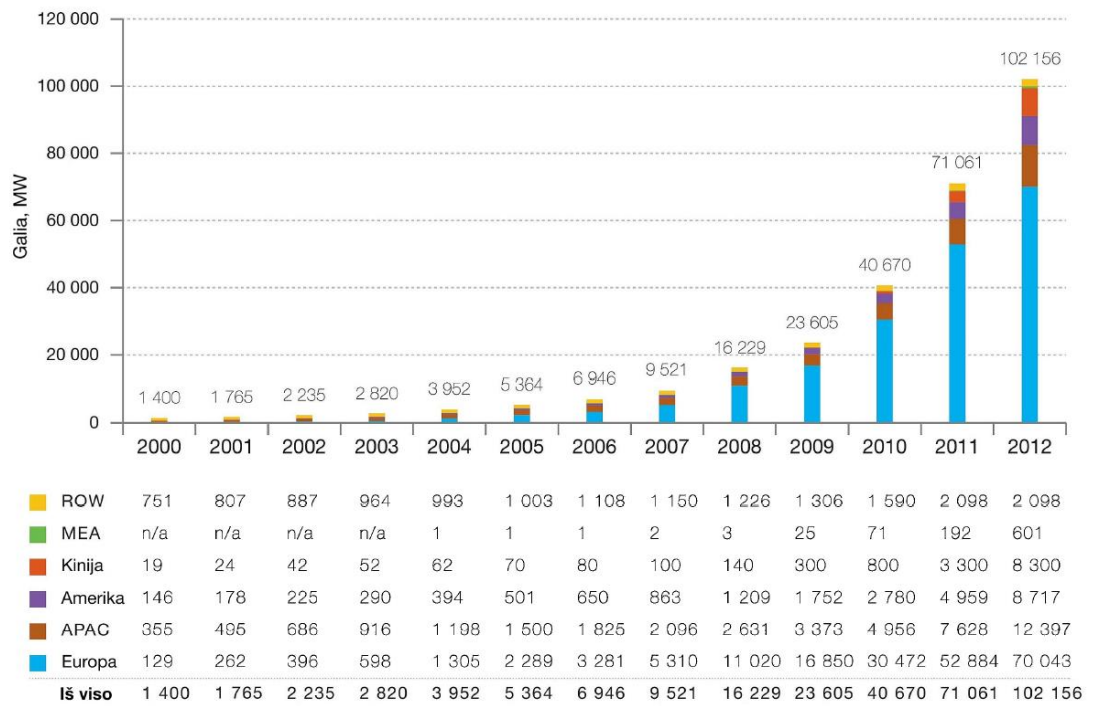
Elektros energijos gamybos iš atsinaujinančių energijos išteklių, taip pat naudojant ir saulės energiją, apimtis Lietuvoje 2007 – 2013 metų laikotarpiu pateikiama 1 lentelėje. Iš pateiktų duomenų matosi, kad fotoelektrinės energijos gamyba tiek pasaulyje, tiek Lietuvoje sparčiai auga [2].

1 lentelė

Elektros energijos gamybos Lietuvoje apimtis iš atsinaujinančių energijos išteklių
2007 – 2013 m. [2]

Metai	Saulės energija, GWh	Vėjo energija, GWh	Hidro energija, GWh	Bio-šaltinių energija, GWh	Iš viso, GWh
2007	0	106,43	420,88	67,49	594,77
2008	0	131,40	402,12	65,26	598,77
2009	0	157,10	424,56	98,72	680,37
2010	0,00237	202,19	540,02	141,69	883,90
2011	0,07599	472,19	476,09	148,92	1097,58
2012	2,32	537,68	420,88	195,41	1156,28
2013	44,8	599,99	516,20	262,67	1423,67

Pasaulyje saulės elektros energijos gamyba naudojant fotoelektrinius modulius per pastarąjį dešimtmetį augo dideliais tempais. 2009 metų pabaigoje pasaulinė saulės modulių įdiegtoji galia siekė beveik 24 GW, po metų šis skaičius padidėjo iki 40,7 GW, o 2011 metų pabaigoje 71,1 GW. 2012 metais pasaulyje buvo įdiegta daugiau kaip 100 GW saulės elektrinių, kurios pagamina daugiau kaip 100 TWh elektros energijos kiekvienais metais. 3 pav. iliustruoja pasaulinio fotoelektrinės energijos gamybos pajėgumą 2000 – 2012 m. Iliustracijoje matyti, kad Europa gamindama fotoelektrinę energiją pirmauja pasauliniu mastu. 2012 metų pabaigoje bendra energijos pajėgumo galia viršijo 70 GW, tai sudaro 70 % pasaulinės elektros energijos gamybos rinkos [2].



3 pav. Pasaulio fotoelektrinės energijos gamybos pajėgumo kaita 2000 – 2012 m. [2]

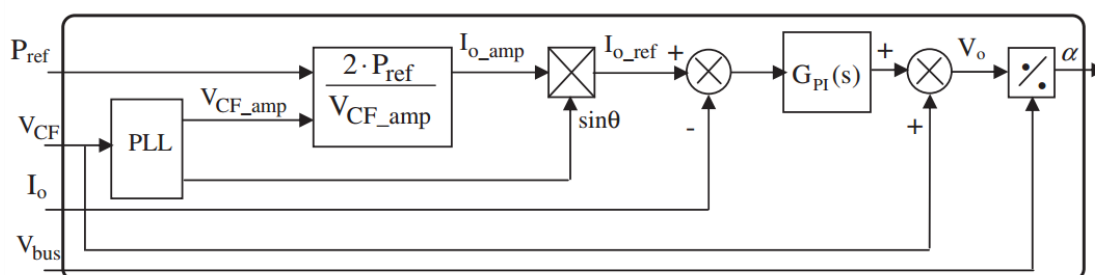
3. ALTERNATYVIOS ENERGIJOS MIKROTINKLAS

Sparčiai plečiantis alternatyviai energetikai didėjo interesas, kaip naudingiau ir intelektualiau paskirstyti šiuos tinklus, kokias paskirstymo technologijas taikyti alternatyviai energetikai, kaip sudaryti maksimalias sąlygas alternatyvios energetikos plėtrai. Praėjusiame dešimtmetyje pasaulyje buvo pradėtos projektuoti naujos kartos paskirstymo technologijos – mikrotinklai. Mikrotinklai kuriami siekiant sudaryti kuo geresnes sąlygas atsinaujinantiems energijos ištekliams, taip pat jų plėtrai elektros, šilumos energetikos struktūrose bei pastatų energijos sistemose. Mikrotinklų plėtra Lietuvoje leistų gerokai padidinti atsinaujinančios energetikos mastus ir padėtų pagerinti Europos sąjungos užsibrėžtus tikslus 2020 metams. Mikrotinklų bendra idėja yra ta, kad galima sujungti nuo kelių iki keliolikos nedidelę galią turinčius šaltinius ir visus prie šio tinklo prisijungusius energijos vartotojus. Įdomu ir tai, kad į bendrą sistemą mikrotinklas gali sujungti ne tik elektros energijos, bet ir šilumos bei dujų tinklus. Pats geriausias mikrotinklas yra tas, kuris patenkina visų vartotojų poreikius, t. y. aprūpina elektros energija, šiluma ir pakrauna elektromobilius. Iš esmės tai yra viskas, ko mums gali prireikti kiekvieną gyvenimo akimirką. Mikrotinklų išteklių plėtros būdas dažniausiai taikomas žemosios įtampos tinkluose, bet gali būti ir išimčių. Standartinio tipo alternatyvios energijos elektros gamybos būdai nėra patikimi vartotojų atžvilgiu. Alternatyvios energijos elektros gamybos kaupimo intensyvumas tiesiogiai susijęs su klimato ir oro sąlygų pokyčiais. Kaip pavyzdį galima paminėti saulės fotoelektrinius modulius, kai elektros energija kaupiama šviečiant saulei. Lietuvoje oro sąlygos yra labai permainingos, daug debesuotų, apsiniaukusių dienų, o žiemos metu diena yra labai trumpa. Todėl šiuo atveju gaminama elektros energija kaupiama skirtingai, atsižvelgiant į esamas oro sąlygas. Projektuojamų mikrotinklų bendra idėja yra kombinuoti alternatyvius energijos išteklius, t. y. naudoti Saulės energiją kartu su vėjo, biomasės, šilumos energija ir kitomis energijos gamybos rūšimis. Tai suteikia didelį patikimumą nepertraukiamai elektros energijos gamybai ir tokiu būdu galime aprūpinti elektros energijos tiekimu didelio patikimumo reikalaujančias įmones, namus ar net miestus, turinčius intelektualius pastatus, technologinius parkus, ligonines. Žemosios įtampos vartotojams siūloma naudoti mikrotinklus, turinčius nedidelės galios generavimo šaltinius, elektros energijos keitiklius, kaupiklius ir galinčius valdyti intelektualiai. Mikrotinklai gali lygiagrečiai veikti su kito tipo elektros energijos skirstomaisiais tinklais, jų konfiguracija gali būti radialinė arba žiedinė, o jautriems elektros kokybės vartotojams gali būti tiekiami nuolatinės srovės elektros tinklai. Mikrotinkle gali būti integruotos šildymo ir šaldymo sistemos, o tai žymiai sumažintų kenksmingų dujų emisijas. Kad tikslingai pasiskirstytų visi elektros energijos gamybos srautai, būtina patikima valdymo sistema, kuri prisitaikytų prie įvairių darbo režimų ir sąlygų. Norint efektyviai naudotis mikrotinklais, reikalingi technologijų valdymo sprendimai. Didžiausias energijos efektyvumas pasiekiamas kombinuojant energijos išteklius. Šiuo metu labiausiai analizuojami ir vystomi vėjo –

saulės energijos ištekliai mikrotinkle. Kombinuotas vėjo – saulės energijos šaltinių panaudojimo būdas dar vadinamas hibridinėmis sistemomis [9, 10, 12].

3.1. Mikrotinklo valdymo režimas

Prisijungus įtampos keitikliui prie tinklo pasiekama visa bendra galia, kokią tik gali pasiekti hibridinė sistema, ir ji perduodama elektros tinklui. Bendra prisijungimo prie tinklo kontrolės struktūra iliustruojama 4 pav. pateiktoje valdymo schemeje [11].



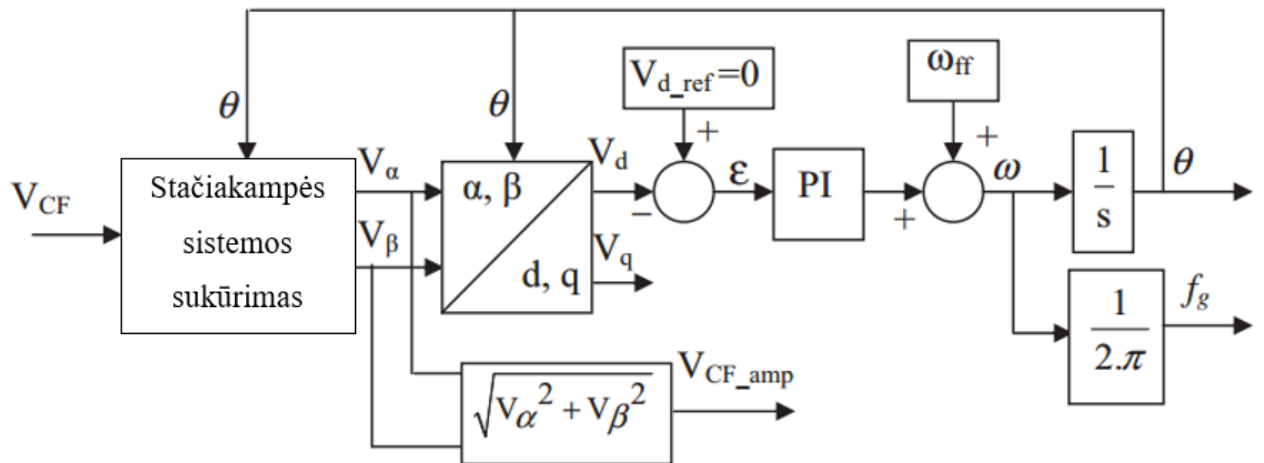
4 pav. Prisijungimo prie tinklo kontrolės struktūra [11]

Patys svarbiausi valdymo sistemos elementai:

- Tinklo sinchronizacija, naudojant fazės užrakinimo kilpą. (PLL)
- Įėjimo galios valdymas
- Tinklo srovės valdymas
- Tinklo energijos strategijos valdymas integruojant baterijos pakrovimo valdymą

3.2. Mikrotinklo įėjimo galios valdymas

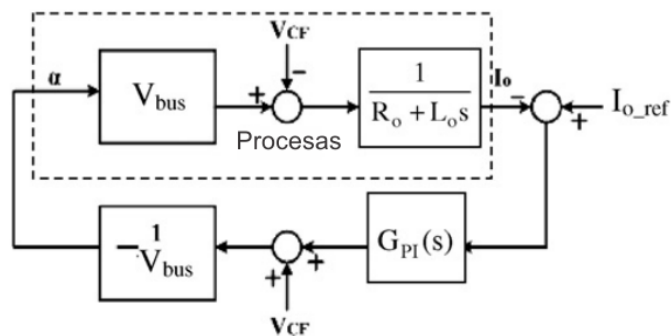
Tinklo sinchronizacija naudojama tam, kad, susiejus abidvi sistemas, sinchronizuotąsi keitiklio išduodama įtampa su tinklo įtampa. Sinchronizacijos metu tinklo įtampos sinusoidinė išraiška turi būti stabilizuota ir be triukšmų. Tinklo sinchronizacijos struktūros PI reguliavimo parametrai yra apskaičiuoti taip tiksliai, kad parametrai valdomi nepertraukiamu režimu. Tinklo sinchronizacijos struktūra yra taip pat panaudota tinklo įtampos kontrolei, kad gautųsi tikslingos dažnio vertės ir būtų išvengta įtampų svyravimų. Tinklo sinchronizacijos principas yra pavaizduotas 5 pav. [11]



5 pav. Tinklo sinchronizacijos valdymo bendra struktūra [11]

3.3. Mikrotinklo srovės valdymas

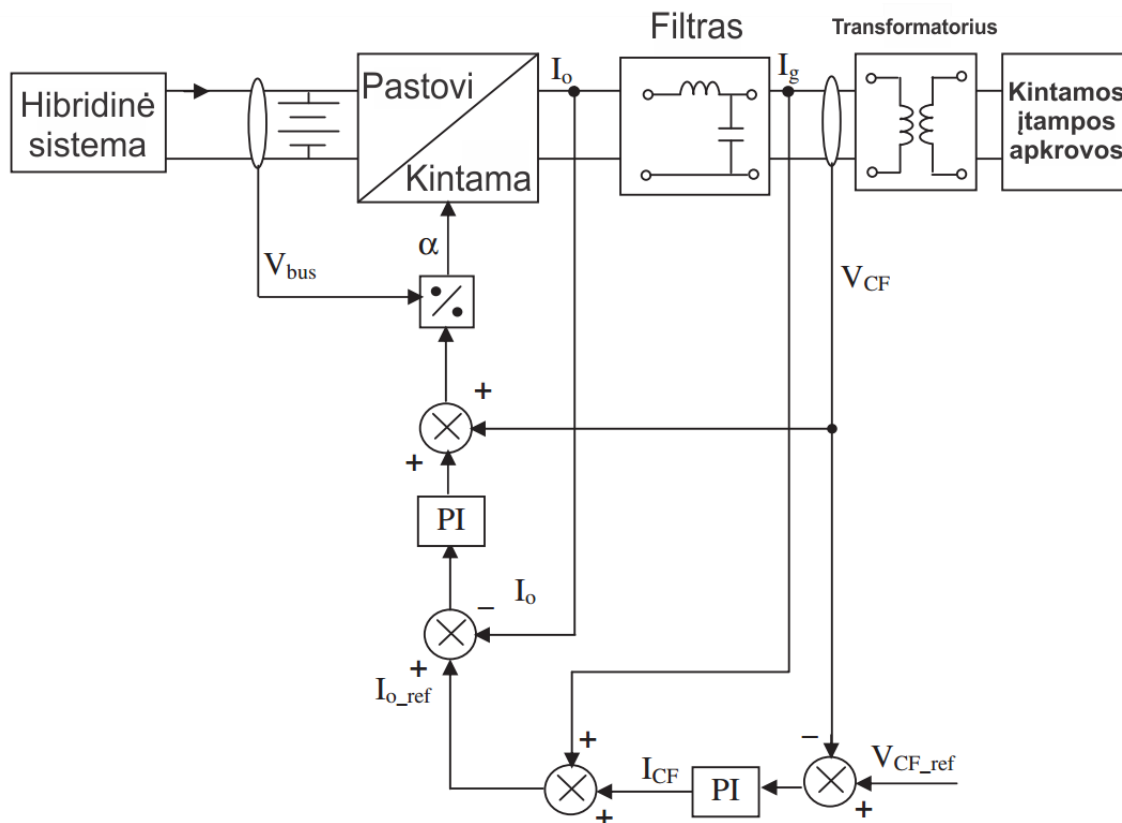
Prie tinklo prijungtas įtampos keitiklis yra valdomas, kad reguliuotųsi tinklo srovė. Tinklo srovės valdymo standartiniu PI reguliatoriumi su paduodama tinklo įtampa. Tokiu būdu yra valdoma srovė įtampos keitiklyje. 6 pav. pateikta schema su srovės kilpa, panaudojant PI standartinį reguliatorių [11].



6 pav. Tinklo srovės valdymas, panaudojant standartinį PI reguliatorių [11]

Sistemos valdymo esmė yra ta, kad pagamintos energijos įtampa turi būti kontroliuota amplitudės ir dažnio išraiškomis, atitinkamai aktyvus galios srautas tampa valdomas ir kontroliuojamas. Sistemos nestabilumo atveju tarp vėjo turbinos generatoriaus ir fotoelektrinės sistemos generatoriaus srovės pagamintos energijos galią sistema gali reguliuoti apribotu diapazonu. Per didelis galios perteklius bus kaupiamas baterijoje. Ši valdymo sistema generuoja vieną sinusinės charakteristikos fazę, kuri tiekia visas apkrovas. Valdymo schema susideda iš kaskadinių reguliavimo kilpų, kurios panaudotos,

kad reguliuotų apkrovos srovę vidinėje kilpoje ir tiekiamą įtampą išorinėje kilpoje. Tiekiamos įtampos regulatoriaus tikslas yra reguliuoti įtampą apsaugant nuo netiesinių apkrovos srovės verčių. Valdymo schemoje yra panaudotas standartinis PI reguliatorius, kuris veikia sinchroniškai palaikydamas užduotą apkrovos vertę [11].

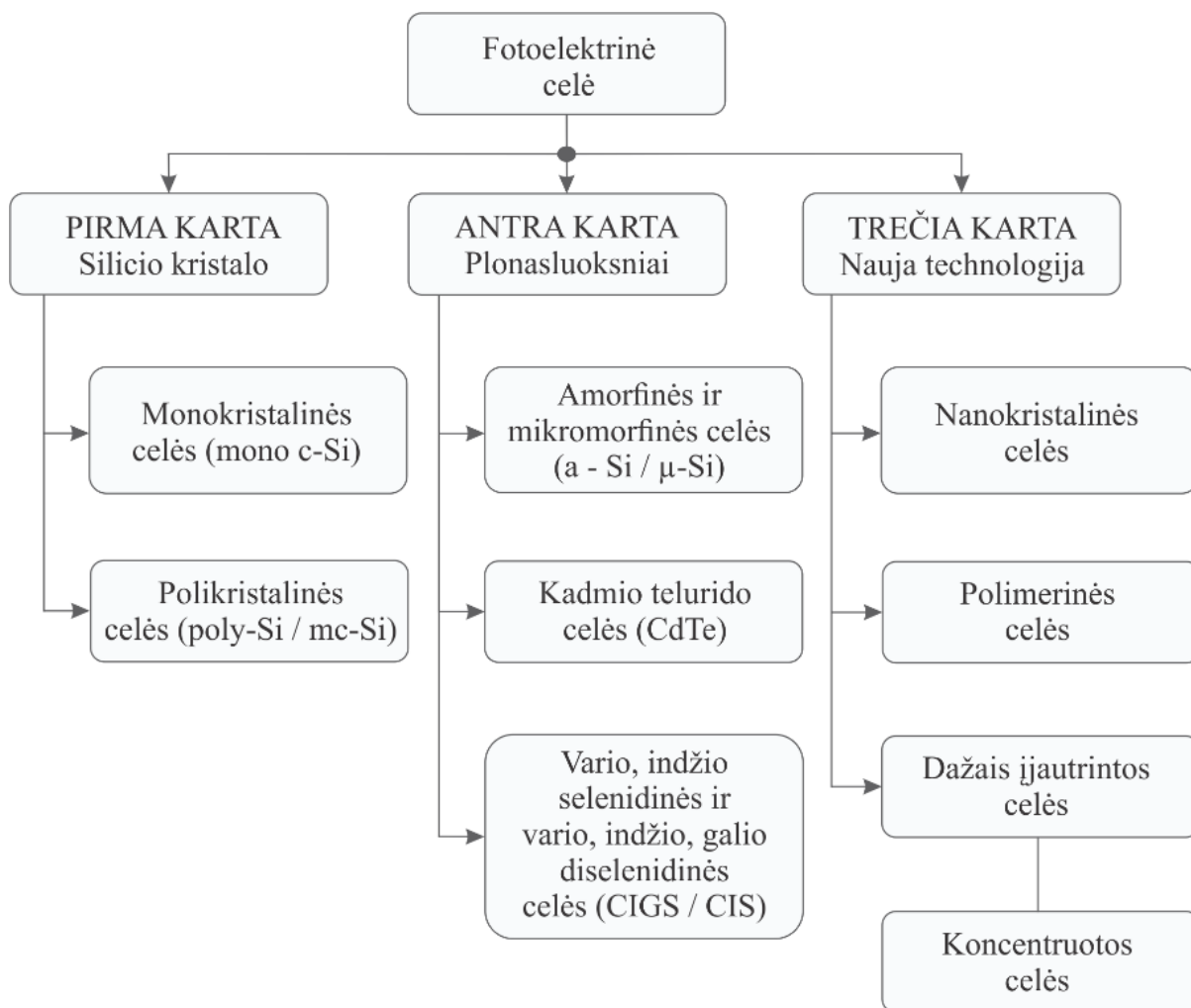


7 pav. Automatinės valdymo sistemos blokinė schema [11]

Įtampos keitiklis gauna nuolatinę srovę iš atsinaujinančių energijos išteklių, ir ją konvertuoja į kintamosios įtampos srovę, taip maitina elektros tinklą. Baterijos garantuoja vartotojams nepertraukiamą aprūpinimą elektros energija net tuo atveju, jei tinklas išjungiamas, tokiu būdu įtampos keitiklis garantuos nepertraukiamą maitinimo šaltinį. Kad nuolatos būtų garantuojamas nepertraukiamas maitinimas, yra suteikiami prioritetai, kad būtų įkraunamos visos susijusios baterijos. Jei bus prikaupta per daug elektros energijos, sistema perjungs į pardavimo režimą ir perteklius keliaus į tradicinius paskirstymo tinklus, taip atliekama elektros energijos pardavimo operacija. Visa hibridinė sistema yra išjungiamą sistemoje esančiais jungikliais, įvykdžius operaciją, sistema per 5-8 ms atsijungia ir nebegamina elektros energijos [11].

4. FOTOELEKTRINIŲ MODULIŲ ANALIZĖ

Šiuo metu rinkoje siūloma įvairių tipų ir charakteristikų fotoelektriniai moduliai. Kokį modulį pasirinkti, gali tapti sunkiu uždaviniu net ir geram specialistui. Tam, kad tinkamai pasirinktume tinkamo tipo modulį, reikia įvertinti ekonominius lūkesčius, geografinę vietos padėtį, nuodugniai iširti patį objektą, kuriame bus įrengiami saulės moduliai, bei įvertinti naudojamos elektros energijos poreikį.



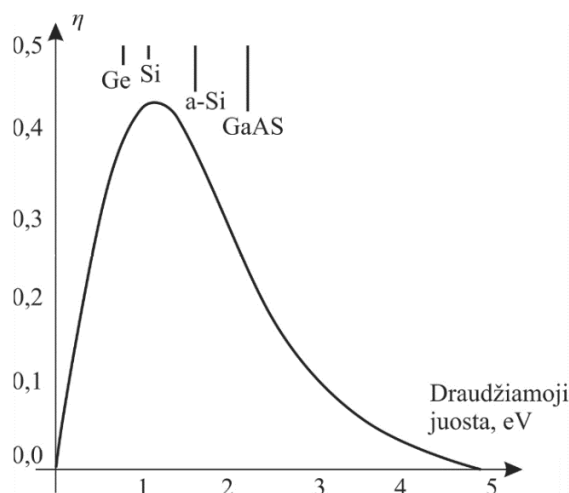
10 pav. Fotoelektrinės celės technologinės raidos blokinė schema

Laikui bėgant, sparčiai didinant saulės energetikos vystymą ir tobulinant gamybos technologinius procesus, tobulėjo fotoelektriniai moduliai, kurie yra išskiriami į tris kartas. 10 pav. pateikiama fotoelektrinės celės technologinės raidos blokinė schema.

Šiame skyriuje apžvelgsime visus galimus saulės fotoelektrinių modulių tipus ir technologines kartas, panagrinėsime, kokie yra fotoelektrinių modulių privalumai ir trūkumai.

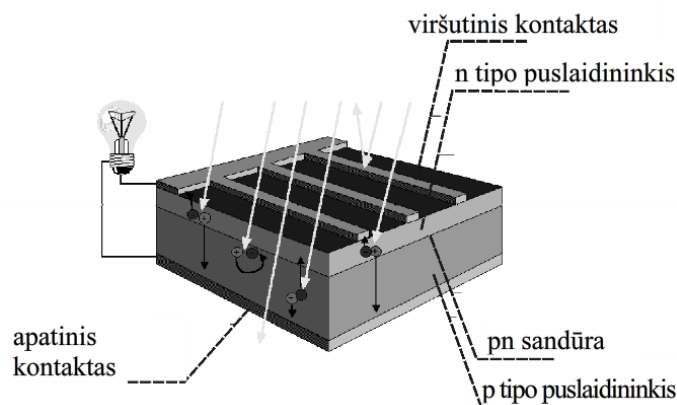
4.1. Fotoelektrinio elemento veikimo principas

Fotoelektrinis elementas – tai puslaidininkinis įtaisas, kuris šviesos energiją verčia į elektros energiją. Fotoelemente yra naudojamas fotoelektrinis efektas. Silicio atomą sudaro keturiolika protonų ir keturiolika elektronų. Kai gaminant formuojamas silicio monokristalas, atomai sudaro kovalentines jungtis su keturiais gretimais atomais. Kiekvienoje jungtyje silicio atomas dalijasi vienu iš keturių savo valentinių elektronų su gretimą atomu vienu iš keturių valentinių elektronų. [1, 2].



8 pav. Puslaidininkių draudžiamosios juostos dydžiai [1]

Elektronai yra tarpusavyje susieti valentinėje juostoje ir negali klaidžioti nuo atomo prie atomo. Kad jie pradėtų judėti nuo atomo prie atomo, turi gauti elektros energijos. Laidumo ir valentinės juostos energijų skirtumas yra vadinamas draudžiamąja juosta. Draudžiamosios juostos dydis lemia fotoelemento tuščiosios veikos įtampą. 8 pav. pateikiama puslaidininkių draudžiamosios juostos dydžiai. Didesnė draudžiamoji juosta parodo, kad medžiagos atomo valentiniams elektronams perkelti į laidumo juostą reikia daugiau energijos. Draudžiamosios juostos dydis yra svarbus veiksnys, nuo kurio priklausys fotoelektrinio elemento veikimo efektyvumas. Atliekant natūrinius bandymus, nustatyta, kad iš saulės ateinantys fotonai skiriasi turima energija. Fotonas su energijos pertekliumi gali išlaisvinti vieną elektroną, o tos energijos perteklius virsta šiluma. Į vieną silicio plokštelės pusę įterpiamas boras, o į kitą – fosforo priemaišos, todėl susiformuoja pn sandūra, kuri sudaro pastovų elektrinį lauką. Suformavus kontaktus ir sudarius uždarą grandinę, fotoelektriniu elementu teka elektros srovė. Fotoelektrinio elemento struktūra pavaizduota 9 pav. [1, 2]



9 pav. Fotelektrinio elemento struktūra [1]

Minimali fotono energija, išlaisvinanti elektroną iš p sluoksnio, yra nuo $E_g = 0,2$ iki $3,7$ eV. Tai priklauso nuo puslaidininkinės medžiagos, draudžiamosios juostos pločio, temperatūros, legiravimo laipsnio ir pn sandūros formavimo. Draudžiamosios juostos energija apskaičiuojama remiantis formule [2]:

$$E_g = E_{g(0)} - \left(\frac{\alpha \cdot T_{FE}^2}{\beta + T_{FE}} \right), \quad (4.1.1)$$

čia: E_g – draudžiamosios juostos energija 0 Kelvinų temperatūroje; α ir β yra tam tikros konstantos; T_{FE} – absoliutinė fotelektrinio elemento temperatūra Kelvinais

Fotelektrinių elementų gamyboje naudojamos šios pagrindinės puslaidininkinių medžiagos [2]:

- galio arsenidas (GaAs);
- vario indžio diselenidas (CIS);
- kadmio telūridas (CdTe);
- germanis kartu su siliciu ($CuInSe_2$).

Visame pasaulyje yra labiausiai paplitę silicio fotelektriniai elementai. Fotelektrinio elemento veikimas gali būti aiškinamas ir kitaip, kadangi elementai gali būti formuojami kitokio tipo puslaidininkio pagrindu, todėl skirsis ir veikimo principas. Pn sandūroje du skirtingi legiruoti puslaidininkiai susijungia, todėl laisvieji elektronai iš n legiruotojo sluoksnio juda į p legiruotąjį

sluoksni. Dėl šios priežasties susikuria elektrinis laukas ir elektronai negali įveikti pn sandūros. Susidariusiojo vidinio elektrono lauko vertės išraiška [1, 2]:

$$\Phi_i = \frac{k \cdot T_{cell}}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2}\right), \quad (4.1.2)$$

Čia: k – Bolcmano konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K), T_{cell} – absoliutinė fotoelektrinio elemento temperatūra Kelvinais [K], q – elektrono krūvis ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C), N_a – akceptorinių priemaišų tankis, N_d – donarinių priemaišų tankis, n_i – savųjų krūvininkų tankis

Kiekvieną fotoelektrinį elementą galime apibūdinti keliais pagrindiniais parametrais. Pats svarbiausias – naudingumo koeficientas, jis apskaičiuojamas remiantis fotoelektrinio elemento gaminamos elektros energijos ir į ją patekusios saulės spindulinės energijos santykiu. Kitas labai svarbus parametras – fotoelektrinio elemento užpildymo faktorius (koeficientas), kuris apskaičiuojamas remiantis šia formule [1]:

$$FF = \frac{U \cdot I}{U_0 \cdot I_k}; \quad (4.1.3)$$

čia: U ir I yra įtampos ir srovės darbo taškas; U_0 – fotoelektrinio elemento tuščiosios veikos įtampa; I_k – fotoelektrinio elemento trumpojo jungimo srovė

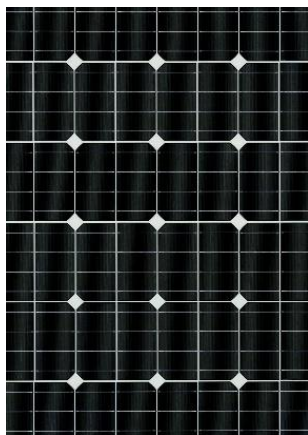
4.2. Pirma karta. Silicio kristalo fotoelektriniai moduliai

Pirmos kartos silicio kristalo fotoelektriniai moduliai skirstomi į monokristalinius ir polikristalinius. Tai pati seniausia ir populiariausia apdirbimo technologija dėl didelės galios efektyvumo. Ši technologija apima nuo 85 iki 90 % visos rinkos pardavimų, iš kurių monokristaliniai moduliai sudaro 60 %. Iš pradžių šiame skyrelyje apžvelgiami monokristaliniai fotoelektriniai moduliai [4, 7].

4.2.1. Monokristaliniai fotoelektriniai moduliai

Šiuo metu sukurtos technologijos, kurias taikant išpjaunamos 25 μm storio fotoelementų plokštelės, todėl tai paspartino gamybos procesus ir dėl naujų apdirbimo technologijų mažėjo fotoelementų savikaina. Didžiausias tokių elementų teorinis naudingumo koeficientas $\eta = 24 \%$

buvo pasiektas laboratoriniu būdu, o pramoniniu būdu gaminamų komercinių fotoelektrinių elementų $\eta = 21\%$. Kai praktikoje susiduriama su įvairiais nepalankiais faktoriais, dažniausiai pasiekiamas naudingumo koeficientas iki 17,5%. Tai yra didelis technologinis perversmas, kadangi maždaug prieš 10 metų monokristalinio silicio fotoelektrinių elementų naudingumo koeficientas siekė 13 – 15%, t. y. iki 8% mažiau. Naudingumo koeficiento rodikliai gali skirtis dėl įvairių faktorių: geografinės padėties, metų laiko, kokiomis aplinkybėmis vykdomas eksperimentas, todėl mokslinėje literatūroje dažnai rasime vis kitokius skaičius. Naudingumo koeficiento pokyčius gali smarkiai nulemti ir modulio apdirbimo technologija, kokiais metais jis buvo pagamintas ir pan. Monokristalinio modulio iliustracija pateikiama 11 a pav., moduliai dažniausiai būna juodos spalvos [1, 4].



a [20]



b [21]

11 pav. Silicio kristalo fotoelektriniai moduliai: a – monokristalinis fotoelektrinis modulis; b – polikristalinis fotoelektrinis modulis

Be tradicinių monokristalinių celių taip pat yra gaminamos HIT tipo celės su dviem elektrodais modulio galinėje pusėje. Šie moduliai pasižymi dideliu našumu [6].

Renkantis monokristalinius modulius, reikia atkreipti dėmesį, kad šie moduliai nėra pritaikyti darbui aukštesiose temperatūrose, nes yra aukštas temperatūrinis galios koeficientas (0,43 – 0,5%/C), todėl karštą vasaros dieną sumažėja generuojama galia, o tai gali būti nuostolinga vartotojui. Šio tipo moduliai kainuoja beveik du kartus brangiau nei plonasluoksniai moduliai [4, 7].

4.2.2. Polikristaliniai fotoelektriniai moduliai

Polikristalinių fotoelektrinių elementų storis yra toks pat kaip monokristalinio silicio taikant pažangias šiuolaikines technologijas. Šios technologijos moduliai 2008 metais apėmė 48% visos rinkos pardavimų. Draudžiamosios juostos plotis – 1,12 eV. Didžiausias pasiektas naudingumo

koeficientas laboratorinėmis sąlygomis sudarė $\eta = 17,18 \%$, masinėje gamyboje polikristaliniai elementai sudarė $\eta = 12 - 14 \%$. Nagrinėjant įvairią mokslinę literatūrą pastebima, kad naudingumo koeficiento rodikliai buvo pateikiami skirtingai: $\eta = 13 - 14 \%$; $\eta = 14 - 16 \%$. Skaičiai skiriasi dėl modulių apdirbimo technologijos, gamybos proceso kokybės ir vykdomų eksperimentinių sąlygų. Polikristaliniai moduliai yra pigesni nei monokristaliniai, kadangi polikristalinę celę pigiau pagaminti nei monokristalinę, be to, kristalo gryninimo procese nereikalingas silicis. Renkantis polikristalinius modulius, reikia atkreipti dėmesį, kad jie yra jautrūs aukštomis temperatūroms, kaip ir monokristaliniai, todėl karštą vasaros dieną patirsime generuojamos galios nuostolius. Temperatūros galios koeficientas siekia nuo 0,40 iki 0,47 %/C. Žvelgiant ekonominiu aspektu, polikristaliniai moduliai yra pigesni nei monokristaliniai ir du kartus pigesni už plonasluoksnius modulius. Iš visų silicio pagrindu gaminamų fotoelektrinių elementų monokristalinio silicio elementai turi didžiausią naudingumo koeficientą ir geriausią galios santykį, tačiau kaina yra brangiausia. Monokristalinių modulių darbo trukmė siekia iki 25 metų, per maždaug 12 metų fotoelementų naudingumo koeficientas sumažėja iki 10 %, o per 25 metus iki 20 %. Būtent dėl šių savybių juos vis dažniau pradeda naudoti, kadangi jų parametrai laikui bėgant mažiau kinta, lyginant su kito tipo moduliais [1, 4, 6, 7]. Polikristalinio modulio iliustracija pateikiama 11 b pav., šio tipo moduliai būna margai mėlynos spalvos.

4.3. Antra karta. Plonasluoksniai fotoelektriniai moduliai

Per 20 gamybos metų plonasluoksniai fotoelektriniai moduliai tapo dvigubai pigesni nei monokristaliniai ir polikristaliniai moduliai. Plonasluoksniai fotoelektriniai moduliai dažniausiai yra antros technologinės kartos, jie rinkoje šiuo metu apima nuo 10% iki 15 % visų globalių pardavimų, įskaitant visas pagaminimo technologijas ir tipus. Dėl naujų technologijų plonasluoksniai moduliai gaminami iš itin plonų fotoelektrinių plokštelių, kurių storis siekia iki 1 μm . Monokristalinių ir polikristalinių fotoelektrinių elementų storis siekia iki 25 μm , todėl plonasluoksniai fotoelektriniai elementai net 25 kartus plonesni. Dėl šių technologijų plonasluoksniai fotoelektriniai moduliai tapo žymiai lengvesni, juos paprasčiau montuoti, nereikia tvirtų konstrukcijų, o montuojant ant namo stogo leido gerokai sumažinti bendrą stogo svorio apkrovą. Dėl protokristalinio silicio mažos apimties pagaminti nanokristalai tapo ne tokie jautrūs aukštesnėms temperatūroms. Fotoelementai, pagaminti iš šių medžiagų, turi mažesnę naudingumo koeficientą nei įprastinių monokristalinių ar polikristalinių fotoelektrinių modulių [4, 5, 6, 7]. Pagal naudojimo tipą ir paskirtį plonasluoksniai fotoelektriniai moduliai skirstomi į kelias grupes:

- amorfinio ir mikromorfinio silicio kristalo (a – Si / μ – Si) fotoelektriniai moduliai;

- kadmio telūrido (CdTe) fotoelektriniai moduliai;
- vario, indžio selenido fotoelektriniai moduliai (CIGS) ir vario, indžio, galio dislenido fotoelektriniai moduliai (CIS).

4.3.1. Amorfiniai ir mikromorfiniai silicio kristalo (a – Si / μ – Si) fotoelektriniai moduliai

Amorfinis silicis pasižymi plačia draudžiamąja juosta ir 40 kartų didesne absorbcija negu monokristalinis silicis. Draudžiamosios juostos plotis – 1,75 eV, geriausių pavyzdžių, kurie buvo gaminami laboratorinėmis sąlygomis, naudingumo koeficientas siekė $\eta = 12\%$. Pirmaisiais eksploatavimo mėnesiais amorfinio silicio moduliai yra linkę nusidėvėti, todėl naudingumo koeficientas tampa $\eta = 7 - 8\%$, pradeda mažiau generuoti galios, tačiau po šio nusidėvėjimo proceso naudingumo koeficientas nekinta ir išlieka stabilus. Nors ir turintys žemą naudingumo koeficiento lygį, jie lengvai valdomi ir eksploatuojami esant aukštomis temperatūroms ar nepastovioms klimato sąlygoms, kai saulė šviečia intensyviai vos kelias valandas. Šio tipo modulių pagaminimo procesas nėra sudėtingas, pažangiomis technologijomis pagaminamas iki 1 μm storio kristalas, apdirbimo metu celės gali būti gaminamos žemoje temperatūroje, o tai leidžia gerokai sutaupyti medžiagų ir laiko. Šie kriterijai sudaro palankias sąlygas įsigyti produktą už labai patrauklią kainą [1, 4].



12 pav. Plonasluoksniai fotoelektriniai moduliai: a – amorfinis / mikromorfinis (a – Si / μ – Si) fotoelektrinis modulis; b – kadmio telūrido (CdTe) fotoelektrinis modulis; c – Vario, indžio selenido (CIGS) / vario, indžio, galio diselenido (CIS) fotoelektrinis modulis

Amorfinio silicio kristalo fotoelektrinis modulis yra iliustruojamas 12 a pav. Vizualiai modulyje nesimato ryškiai išsiskiriančių celių, kaip įprastuose monokristaliniuose ar polikristaliniuose

moduliuose. Celės atrodo tarsi ištisinės ir yra tamsiai rudos spalvos. Mikromorfiniai fotoelektriniai moduliai gali būti gaminami net iki 5,7 m² dydžio, tai mažina savikainą, kadangi sutaupoma įvairiems konstrukciniams elementams. Didžioji dalis įvairių įmonių šio tipo modulių pagamina itin lengvus, tvirtos konstrukcijos, siūlo įvairių matmenų, gali būti lenkti moduliai ir pan. [1, 4]. Pagrindinis amorfinio silicio kristalo trūkumas, kad laikui bėgant generuojasi vis mažesnis galios santykis, kadangi saulės spinduliuotė neigiamai paveikia kristalo struktūrą. Eksploatuojant amorfinius fotoelektrinius modulių tokiose vietovėse, kur yra dideli saulės energijos išteklių, o oro sąlygos nėra tokios dinaminės, tokių modulių tarnavimo laikas gali būti labai trumpas, nors charakteristikos leidžia dirbti esant aukštesnėms temperatūroms. Ekonominiu požiūriu tokius modulių tikslingiau eksploatuoti vietovėse, kur Saulės energijos išteklių yra mažesni, o oro sąlygos yra kintančios, tai sulėtins kristalo degeneracinius procesus ir prailgins tarnavimo trukmę [2, 3, 6]. Mikromorfiniai fotoelektriniai moduliai pasižymi geresniu naudingumo koeficientu, kadangi efektyviau absorbuoja infraraudonuosius spindulius, efektyviau veikia esant silpnam apšvietimui. Pagal išorę mikromorfiniai moduliai nesiskiria nuo amorfinių, vienintelis skirtumas – modifikuotas kristalas, kuris pagerina bendrą charakteristiką. Eksploatavimo metu šių modulių naudingumo koeficientas siekia $\eta = 10 \%$, pagal apdirbimo technologiją galima pagaminti iki 3 μm storio kristalus, t. y. tris kartus storesni nei amorfinio silicio kristalai, tačiau panaudojus šią technologiją moduliai veikia stabiliau, gali dirbti esant aukštomis temperatūroms, tačiau yra ribojamas dydis ir jis gali būti pasiektas iki 1,4 m² plote [4, 5].

4.3.2. Kadmio telūrido (CdTe) fotoelektriniai moduliai

Tai plonasluoksniai fotoelektriniai moduliai, kurių celės pagamintos iš kadmio ir telūrido. Kadmis yra išgaunamas naudojant cinką, o telūridas išgaunamas apdirbant varį telūru. 2011 m. duomenimis celės, pagamintos kadmio telūrido pagrindu, yra 16,7 % našesnės nei kito tipo plonasluoksniai fotoelektriniai moduliai. 2 b paveiksle yra iliustruojamas kadmio telūrido fotoelektrinis modulis, kuris išore labai panašus į amorfinius modulių, turinčius dažniausiai vientisus, tamsiai pilkus paviršiaus atspalvius. Kadmio telūrido elementas turi stabilias chemines savybes, o draudžiamoji juosta siekia iki 1,5 eV. Optinės absorbcijos koeficientas – $5 \times 10^{15} / \text{cm}$, naudingumo koeficientas siekia nuo $\eta = 9 \%$ iki $\eta = 11\%$, o temperatūrinis galios koeficientas nuo 0,20 iki 0,25 %/C. Šio tipo moduliai yra maždaug du kartus pigesni nei kito tipo plonasluoksniai moduliai, pasižymi geromis darbinėmis charakteristikomis aukštos temperatūrose ir turi mažesnius galios nuostolius. Kadmio telūrido modulių privalumas yra tas, kad šviesa absorbuojama ir klimatui kintant, jiems užtenka menkiausias šviesos, kad būtų generuojama elektros energija. Su šiais moduliais debesuotą dieną galima pasiekti didesnę naudingumo koeficientą ir bendrą elektros

energijos efektyvumą nei su kito tipo fotoelektriniais moduliais. Potenciali problema yra ta, kad telūro pagaminama gerokai mažesniais kiekiais nei kadmio, todėl laikui bėgant iškyla klausimų, ar vario pramonė galės optimizuoti gavybos ir perdirbimo resursus. Kadmio yra toksiškas elementas, todėl iškyla klausimų apie jo daromą žalą aplinkai, jei nebus sugalvota, kokių priemonių imtis ir kaip šią problemą išspręsti, gali būti apribotas jo panaudojimo būdas [4, 5, 8].

4.3.3. Vario, indžio selenido (CIS) ir vario, indžio, galio diselenido (CIGS) fotoelektriniai moduliai

CIS tipo moduluose celė susideda iš trijų elementų mišinio – vario, indžio ir selenido. CIGS tipo moduluose celė susideda iš keturių elementų mišinio: vario, indžio, galio ir diselenido. CIS ir CIGS tipo fotoelektriniai moduliai turi didžiausią efektyvumą ir naudingumo koeficientą lyginant su kitais plonasluoksniais fotoelektriniais moduliais. CIS tipo fotoelektrinės celės šiuo metu yra masiškai gaminamos visame pasaulyje, bendradarbiaujant įmonėms su įvairiais universitetais ir moksliniais institutais. Vizualiai šiuose moduluose nesimato ryškiai išsiskiriančių celių, kaip tradicinėse monokristaliniuose ir polikristaliniuose moduluose, celės atrodo kaip ištisas juodos spalvos paviršius. 12 c paveiksle pateikiama CIS / CIG tipo fotoelektrinio modulio iliustracija. Šių modulių naudingumo koeficientas masiškai gaminant siekia nuo $\eta = 7\%$ iki 16% , o temperatūrinis galios koeficientas - nuo $0,13$ iki $0,41\%/C$, todėl karštą vasaros dieną generuojamos galios sumažėja labai nedaug. Pats didžiausias naudingumo koeficientas buvo pasiektas $\eta = 20,3\%$ laboratorinėmis sąlygomis. Šie moduliai labai gerai absorbuoja ultravioletinius spindulius ir, lyginant su kitomis technologijomis, CIS ir CIGS moduliai veikia efektyviau žiemos metu. Dėl CIS ir CIGS modulių patrauklios kainos, praktiškumo ir didelio naudingumo koeficiento jie tapo labiausiai mėgstami iš visų plonasluoksninių fotoelektrinių modulių. Gaminant CIGS tipo celes, taikomos šios apdirbimo technologijos: apdulkinimas, garinimas, elektrocheminės dangos gamyba, spausdinimas ir elektronų pluošto nusodinimas. Šių elementų gamybos procesas yra gana sudėtingas. Gaminant CIGS tipo celę, medžiagos substratas gali būti parenkamas iš stiklo plokštelės, polimerų, plieno, aliuminio ir t. t. CIGS tipo fotoelektrinių modulių didelis privalumas yra tas, kad laikui bėgant mažai degeneruojasi celės, o tai didina tarnavimo laiką ir stabilizuoja generuojamos elektros energijos efektyvumą [4, 5, 7].

4.4. Trečioji karta. Naujos technologijos ir perspektyvos

Trečioji fotoelektrinių modulių karta yra moksliniais tyrimais, todėl masinėje prekyboje nėra pasiekama. Keletas trečiosios kartos fotoelektrinių modulių jau siūloma komercijai, tačiau dar nėra

žinoma, kokią rinkos dalį jie užims ir kaip konkuruos su esamais modulių gamintojais. Šiuo metu trečioji technologinė karta susideda iš keturių tipų [4]:

- nanokristalinės fotoelektrinės celės;
- polimeriniai fotoelektriniai moduliai;
- dažais įjautrinti fotoelektriniai moduliai;
- koncentruoti fotoelektriniai moduliai.

4.4.1. Nanokristalinės fotoelektrinės celės

Nanokristalinės fotoelektrinės celės susideda iš silicio kristalo pagrindo naudojant nanotechnologijas, jos storis siekia kelis nanometrus (nm). Nanokristalinės celės dažnai dar vadinamos kvantinių taškų saulės celėmis. 4 pav. iliustruojama kvantinio taško (nanokristalinės celės) struktūra. Pagrindinis šios apdirbimo technologijos tikslas - pakeisti įprastinius monokristalinius, polikristalinius, kadmio telūrido, vario, indžio, galio diselenido fotoelektrinius elementus į nanokristalinius elementus taikant nanotechnologijas [4].

Pagrindas	
Elektronų injekcija	e ⁻
Kvantiniai taškai	
Skylė	p ⁺
Peršviečiamas anodas	

4 pav. Nanokristalinės fotoelektrinės celės struktūra

Šios technologijos nanokristalinės celės naudingumo koeficientas siekia nuo $\eta = 7\%$ iki $\eta = 8\%$, tai nėra puikūs rodikliai, tačiau šios celės yra atsparios šilumai, todėl gerai veikia esant aukštai temperatūrai ir patiriami minimalūs galios nuostoliai karštą vasaros dieną.

4.4.2. Polimeriniai fotoelektriniai moduliai

Polimeriniai fotoelektriniai elementai dažniausiai yra lanksčios medžiagos, jie pagaminti iš polimerinio substrato. Pirmoji polimerinius fotoelektrinius elementus išrado „Kodak“ laboratorijos tyrėjų grupė. Pasižymi nedidele kaina, nes turi nedidelį naudingumo koeficientą, kuris siekia nuo $\eta = 3\%$ iki $\eta = 10\%$, tačiau atsparūs šilumai. Pagaminimo technologija leidžia išnaudoti mažiau

medžiagų, kurios yra draugiškesnės aplinkai. Fotelektriniai moduliai yra pagaminti iš polimerinių fotelektrinių elementų, kurių naudingumo koeficientas siekia nuo $\eta = 4\%$ iki $\eta = 5\%$, nors laboratoriniai pavyzdžiai buvo pristatyti $\eta = 6 - 8\%$. 13 a paveiksle iliustruojamas organinis fotelektrinis modulis. Šie moduliai yra lanksčios konstrukcijos, jų montavimas gali būti labai įvairus: atsižvelgiant į krentančius šėšėlius, galima pakreipti įvairiu kampu, galima montuoti probleminėse vietovėse, kur daug kalnų ir pan. (13 c pav.). Susiduriama su didelėmis problemomis fotelektrinius modulius montuojant standartiškai tiesiogiai ant pastatų konstrukcijų, o naudojant organinius fotelektrinius modulius galima padengti visą pastatų plotą. 13 b pav. pateikiamas panaudojimo būdas komerciniuose pastatuose. Buvo planuojama 2012 m. tokio tipo modulių parduoti daugiau nei 1 GW. Organinės celės gaminamos iš lanksčių plastikinių medžiagų, jas galima atspausdinti, jos yra lengvos ir gali būti skaidraus paviršiaus. Manoma, kad tai didelės ateities perspektyvos naudojant organinius modulius mobiliems telefonams, nešiojamiems kompiuteriams, kišeniniams žibintams, žaislams, mobiliems robotams ir visiems kitiems mobiliems įrenginiams, kur naudojamos baterijos [4, 5].



a [25]



b [26]



c [27]

13 pav. Fotelektriniai moduliai ir jų panaudojimo būdai: a – lanksčios konstrukcijos organinis fotelektrinis modulis; b – organinių fotelektrinių modulių panaudojimo būdas komerciniuose pastatuose; c – organinių fotelektrinių modulių panaudojimo būdas kalnuotose vietovėse

4.4.3. Dažais įjautrinti fotelektriniai moduliai

Dažais įjautrintos fotelektrinės celės naudoja fotelektrochemines celes, kurios pagamintos iš puslaidininkinių medžiagų. Šios celės yra patrauklios dėl naudojamų nebrangių medžiagų, o gamybos procesas yra labai paprastas, galima taikyti ir spausdinimo technologijas. Celė susideda iš puslaidininkinio elektrodo (n-tipo Ti_2 ir p-tipo NiO) ir dažų jautrinančiosios medžiagos. Gaminant pramoniniu būdu, dažais įjautrintų modulių naudingumo koeficientas siekia vos $\eta = 4 - 5\%$,

laboratorinėmis sąlygomis didžiausias pasiektas naudingumo koeficientas $\eta = 12\%$. Šių modulių naudingumo koeficiento rodikliai žemi dėl apribojamo pasirinkimo dažų, kurie galėtų gerai ir efektyviai absorbuoti šviesą. Šiuo metu yra daug susidomėjusių tyrėjų, kurie atlieka eksperimentus ir pritaiko nanokristalinius puslaidininkius, taip tikimasi padidinti įjautrintų dažais celių naudingumo koeficiento rodiklius. Dažais įjautrintų fotoelektrinių modulių pagrindinė problema yra celių degeneracija dėl ultravioletinių ir infraraudonųjų spindulių. Šių modulių bendras efektyvumas yra labai mažas, o laikui bėgant dėl degeneracinių procesų celės vis prasčiau absorbuoja šviesą, mažėja tarnavimo laikas. Kadangi celės pagrindinė sudėtis yra skysti dažai, nerekomenduojama šio tipo modulių eksploatuoti šaltose vietovėse, nes atsiranda užšalimo tikimybė [4, 5]. 14 a pav. pateikiama įjautrintų dažų fotoelektrinio modulio iliustracija ir b paveiksle – jų panaudojimo būdas komerciniuose pastatuose.



a [28]



b [29]

14 pav. Fotoelektrinis modulis ir jo panaudojimo būdas: a – dažais įjautrintas, skaidraus paviršiaus fotoelektrinis modulis; b – dažais įjautrintų fotoelektrinių modulių panaudojimo būdas komerciniuose pastatuose

4.4.4. Koncentruoti fotoelektriniai moduliai

Koncentruoti fotoelektriniai moduliai susideda iš optinių lęšių ar veidrodžių, kurių pagrindinis uždavinys – koncentruoti tiesioginius saulės spindulius į labai mažas fotoelektrines celes. Šios celės turi aukštą naudingumo koeficientą ir yra gaminamos iš puslaidininkinių medžiagų. Dėl gerų fotoelektrinių celių savybių ir techninių parametrų laboratorinėmis sąlygomis didžiausias naudingumo koeficientas pasiektas net iki $\eta = 59\%$. Pramonėje gaminamų koncentruotų modulių naudingumo koeficientas siekia $\eta = 40 - 50\%$. Šiuo metu fotoelektrinės celės yra sukurtos skirtingomis technologijomis, todėl koncentruotų modulių naudingumo koeficientas tiesiogiai

priklauso nuo pasirinktos celės ir jos apdirbimo technologijos. 15 pav. pateikiama koncentruotų fotoelektrinių modulių iliustracija [4, 5].



15 pav. Koncentruoti fotoelektriniai moduliai su Saulės sekimo sistemomis [30]

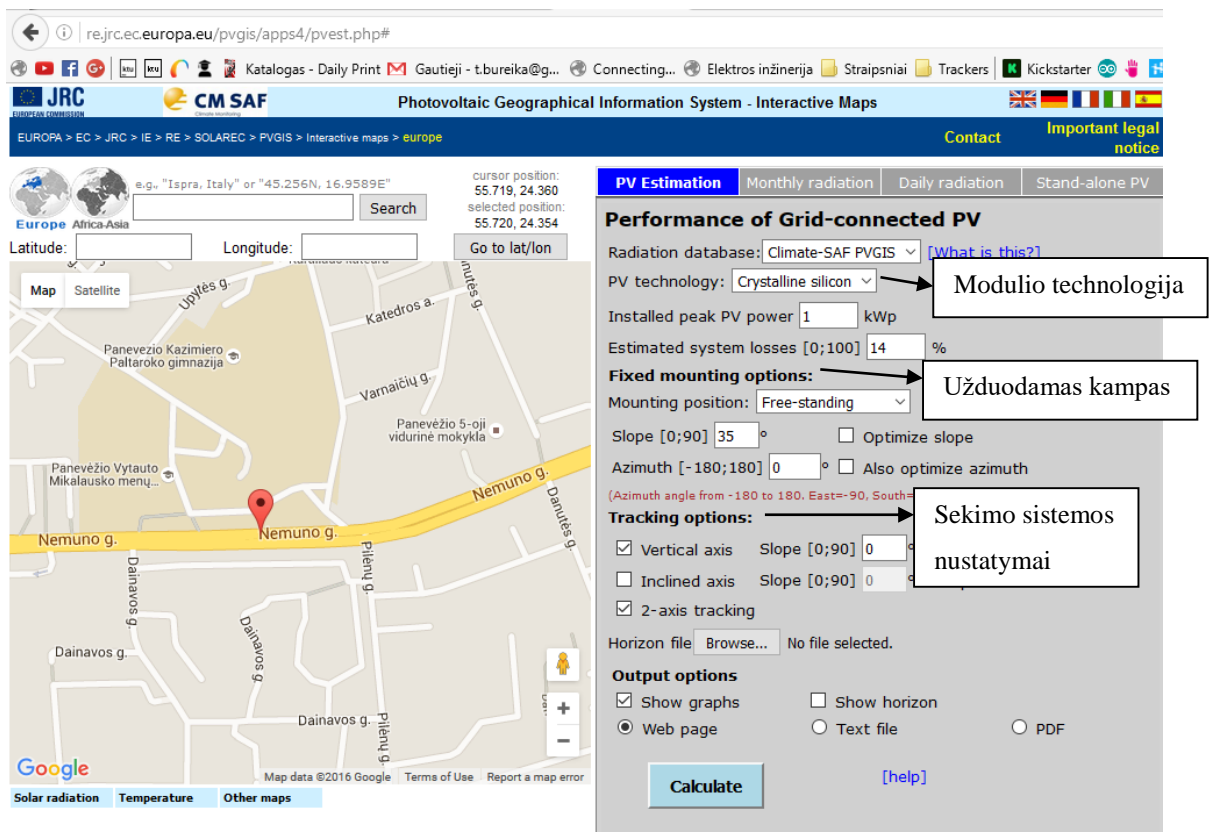
Moduliuose įrengta optika reikalauja tiesioginio orientavimo į saulės judėjimo kryptį, todėl, norint padidinti efektyvumą, naudojamos automatinės saulės sekimo sistemos. Saulės sekimo sistemos būna vienos ašies arba dviejų ašių, kuriomis modulis automatiškai nukreipiamas į saulės judėjimo kryptį. Naudojant tokias sistemas, modulių našumas labai padidėja. Norint pasiekti didžiausią efektyvumą, rekomenduojama koncentruotus fotoelektrinius modulius naudoti tokiuose regionuose, kur saulės energijos išteklių yra didžiausi. Koncentruoti moduliai labai įkaista nuo pastovaus orientavimo į saulės judėjimo kryptį, todėl reikalinga aušinimo sistema. Yra sukurti nauji modifikuoti moduliai, kuriuose yra taikomas aušinimas, tačiau apie juos nekalbama [4, 5, 6].

4.5. Skyriaus išvados

1. Analizuojant literatūrą buvo išsiaiškinta, kad didžiausias pasiekiamas galios efektyvumas su monokristaliniais fotoelektriniais moduliais. Dėl didelės rinkos pasiūlos ir paprasto gamybos proceso, galima įsigyti nekokybišką produktą, todėl verčiau rinktis tik firminius ir patikimus gaminius.
2. Kadmio telūrido fotoelektriniai moduliai pasižymi stabiliomis charakteristikomis, gali dirbti aukštose temperatūrose, turi gerus naudingumo koeficiento rodiklius, tačiau jų panaudojimo būdas yra pavojingas ir žalingas gamtai.
3. Koncentruotų fotoelektrinių modulių efektyvumas 40 – 50 %, bet dėl nuolatinio orientavimo į saulės judėjimo kryptį jie stipriai įkaista, todėl investuojant reikia atsižvelgti į aušinimo sistemas. Šių modulių gamyba ribojama dėl brangių ir sudėtingų technologijų.

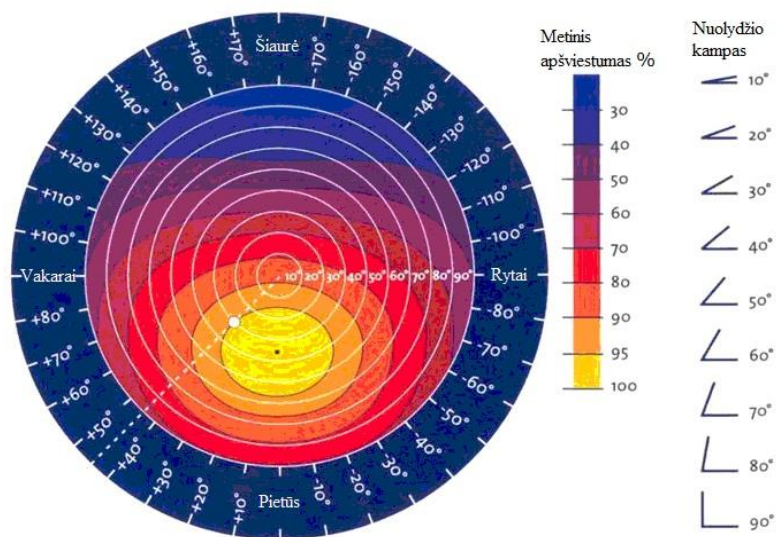
5. FOTOELEKTRINIŲ MODULIŲ EFEKTYVUMO TYRIMAS

Kadangi fotoelektrinių modulių pasirinkimas yra ganėtinai platus, dažniausiai iškyla klausimų, kaip tinkamai juos išsirinkti ir prisitaikyti pagal individualius poreikius. Visų pirma, reikia apžvelgti fotoelektrinių modulių mokslinę literatūrą ir atlikti efektyvumo tyrimus, atsižvelgiant į geografinę vietovę.



16 pav. Fotoelektrinių modulių efektyvumo tyrimų aplinka

Apžvelgę literatūrą, išsiaiškinome, kad silicio kristalo fotoelektriniai moduliai yra patrauklūs dėl gerų naudingumo koeficiento rodiklių, tačiau jautrūs aukštomis temperatūroms ir maždaug du kartus brangesni už plonasluoksnius. Plonasluoksniai fotoelektriniai moduliai pasižymi geromis temperatūrinėmis savybėmis, todėl karštą vasaros dieną nepatiriami generuojamos galios nuostoliai, bet turimas mažesnis naudingumo koeficientas. Tyrimo metu buvo parenkami silicio kristalo ir plonasluoksniai fotoelektriniai moduliai, naudojant stacionarią konstrukciją ir saulės sekimo sistemas. Naudojant stacionarią konstrukciją, reikia žinoti, koku pasvirimo kampu turi būti nustatomas nuolydis. Lietuvoje optimalus saulės modulių pasvirimo kampas yra apie $30^\circ - 38^\circ$ laipsniai. Esant įvairioms situacijoms, galima pasvirimo kampo korekcija nuo 15° iki 38° laipsnių. Remiantis 17 pav. iliustracija, galime optimaliai nustatyti pasvirimo kampa.



17 pav. Saulės modulių optimalaus pasvirimo kampo nustatymas [31]

Šiame skyriuje atliksime eksperimentinį tyrimą naudodami „CM SAF“ (ang. k. „*The satellite application facility on climate monitoring*“) klimato meteorologinės stoties duomenų bazes ir Europos komisijos tyrimų centro programinę įrangą, kuri pasiekama panaudojant interneto ryšį ir interneto naršymui skirtas priemones. 16 pav. iliustruojama fotoelektrinių modulių efektyvumo programinė įrangą. Programinė įrangą tiesiogiai komunikuoja su duomenų bazėmis, kuriose yra sukaupta visa reikiama informacija. Programinė įrangą leidžia koreguoti įvairius parametrus, todėl, visų pirma, reikia nustatyti geografinę padėtį, fotoelektrinio modulio technologijos tipą, generuojamos galios vertę, laipsnio kampą naudojant stacionarią moduliams skirtą konstrukciją ir saulės sekimo sistemos technologijos tipą. Pasirinkta geografinė vieta yra Panevėžys, Nemuno g. esančioje teritorijoje (žiūrėti 16 pav.).

5.1. Silicio kristalo fotoelektrinio modulio efektyvumo tyrimas

Tyrimo metu buvo nustatomi parametrai atsižvelgiant į modulio tipą ir rekomendacijas, kurios buvo pateikiamos tyrimų aplinkoje:

- nominalioji galia – 1 kWp;
- numatomi nuostoliai dėl temperatūros ir mažų saulės energijos išteklių – 8,8 %;
- numatomi kampuotų atspindžių nuostoliai – 3,2 %;
- fotoelektrinių modulių sistemų nuostoliai – 24 %;
- kiti nuostoliai (kabeliai, įtampos keitikliai ir t. t.) – 14 %.

Stacionarios fiksuotos ašies tyrimo duomenys

Stacionari fiksuota ašis: poslinkis=35°				
Mėnesis	E_d	E_m	H_d	H_m
Sausis	0.64	19.8	0.74	22.9
Vasaris	1.32	37.1	1.56	43.8
Kovas	2.86	88.6	3.53	109
Balandis	3.69	111	4.84	145
Gegužė	4.10	127	5.56	172
Birželis	3.99	120	5.50	165
Liepa	3.76	117	5.23	162
Rugpjūtis	3.50	109	4.78	148
Rugsėjis	2.76	82.7	3.63	109
Spalis	1.57	48.6	1.97	61.2
Lapkritis	0.64	19.2	0.77	23.2
Gruodis	0.43	13.3	0.50	15.6
Vidutinis metinis	2.44	74.3	3.23	98.2
Iš viso per metus		892		1180

Vertikalios ašies saulės sekimo sistemos tyrimo duomenys

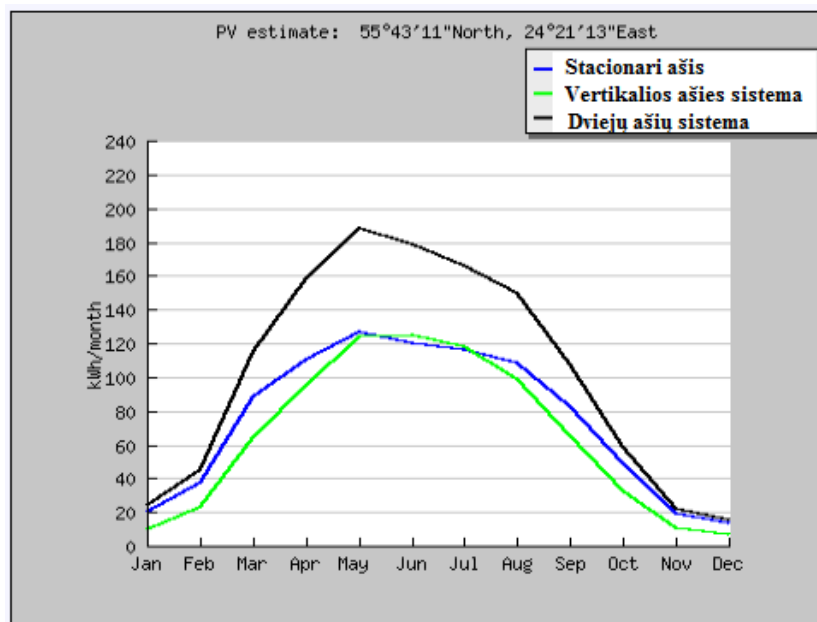
Vertikalios ašies saulės sekimo sistema				
Mėnesis	E_d	E_m	H_d	H_m
Sausis	0.31	9.68	0.44	13.7
Vasaris	0.81	22.7	1.03	28.9
Kovas	2.06	63.9	2.56	79.3
Balandis	3.18	95.5	4.08	122
Gegužė	4.01	124	5.28	164
Birželis	4.15	124	5.54	166
Liepa	3.82	118	5.16	160
Rugpjūtis	3.19	98.9	4.26	132
Rugsėjis	2.17	65.2	2.85	85.4

Spalis	1.05	32.6	1.38	42.9
Lapkritis	0.36	10.9	0.51	15.1
Gruodis	0.21	6.37	0.31	9.59
Vidutinis metinis	2.12	64.4	2.79	84.9
Iš viso per metus		773		1020

Dviejų ašių saulės sekimo sistemos tyrimo duomenys

Dviejų ašių saulės sekimo sistema				
Mėnesis	E_d	E_m	H_d	H_m
Sausis	0.78	24.0	0.90	27.8
Vasaris	1.61	45.0	1.92	53.9
Kovas	3.71	115	4.60	143
Balandis	5.27	158	6.86	206
Gegužė	6.07	188	8.08	251
Birželis	5.94	178	8.00	240
Liepa	5.37	166	7.32	227
Rugpjūtis	4.84	150	6.52	202
Rugsėjis	3.59	108	4.71	141
Spalis	1.90	58.9	2.41	74.8
Lapkritis	0.74	22.3	0.92	27.5
Gruodis	0.51	15.7	0.59	18.3
Vidutinis metinis	3.37	102	4.41	134
Iš viso per metus		1230		1610

E_d: vidutinė paros elektros energijos gamyba pasirinktoje sistemoje (kWh); E_m: vidutinė mėnesio elektros energijos gamyba pasirinktoje sistemoje (kWh); H_d: vidutinis paros saulės energijos išteklių pasiskirstymas pasirinktoje sistemoje (kWh/m²); H_m: vidutinis suminis saulės energijos išteklių pasiskirstymas pasirinktoje sistemoje (kWh/m²)



18 pav. Pagamintos elektros energijos rodikliai kWh/mėn., naudojant skirtingas fotoelektrinio modulio sistemas

Remiantis 18 pav. iliustracijos duomenimis, galime daryti išvadą, kad dviejų ašių saulės sekimo sistemos naudojimas yra pats efektyviausias būdas silicio kristalo fotoelektriniams moduliams. Vertikalios ašies sistemų panaudojimo būdas netinkamas, kadangi pagamintas elektros energijos skirtumas yra labai nedidelis lyginant su stacionarios ašies sistema. Naudojant dviejų ašių saulės sekimo sistemą gegužės mėnesį pagaminama maždaug 190 kWh elektros energijos, kai tuo tarpu kitos sistemos pagamina maždaug 120 kWh per mėnesį. Žiemos mėnesiais dviejų ašių saulės sekimo sistema pagamina dvigubai daugiau elektros energijos, lyginant su stacionarios ašies sistema. Silicio kristalo fotoelektrinių modulių bendra problema yra generuojamos galios nuostoliai karštą vasaros dieną. Pritaikius valdymo technologijas ir modifikavus dviejų ašių saulės sekimo sistemą, galėtume padidinti modulio efektyvumą.

5.2. Plonasluoksnio kadmio telūrido (CdTe) fotoelektrinio modulio efektyvumo tyrimas

Tyrimo metu buvo nustatomi parametrai atsižvelgiant į modulio tipą ir rekomendacijas, kurios buvo pateikiamos tyrimų aplinkoje:

- nominalioji galia – 1 kWp;
- numatomi nuostoliai dėl temperatūros ir mažų Saulės energijos išteklių – 1,0 %;
- numatomi kampuotų atspindžių nuostoliai – 3,2 %;

- fotoelektrinių modulių sistemų nuostoliai – 17,5 %;
- kiti nuostoliai (kabeliai, įtampos keitikliai ir t. t.) – 14 %.

6 lentelė

Stacionarios fiksuotos ašies tyrimo duomenys

Stacionari fiksuota ašis: poslinkis=35°				
Mėnesis	E_d	E_m	H_d	H_m
Sausis	0.66	20.4	0.74	22.9
Vasaris	1.36	38.1	1.56	43.8
Kovas	3.00	92.9	3.53	109
Balandis	3.98	119	4.84	145
Gegužė	4.51	140	5.56	172
Birželis	4.44	133	5.50	165
Liepa	4.20	130	5.23	162
Rugpjūtis	3.88	120	4.78	148
Rugsėjis	3.01	90.4	3.63	109
Spalis	1.68	52.2	1.97	61.2
Lapkritis	0.67	20.2	0.77	23.2
Gruodis	0.45	14.0	0.50	15.6
Vidutinis metinis	2.66	80.9	3.23	98.2
Iš viso per metus		971		1180

7 lentelė

Vertikalios ašies saulės sekimo sistemos tyrimo duomenys

Vertikalios ašies saulės sekimo sistema				
Mėnesis	E_d	E_m	H_d	H_m
Sausis	0.38	11.9	0.44	13.7
Vasaris	0.90	25.1	1.03	28.9
Kovas	2.21	68.5	2.56	79.3
Balandis	3.46	104	4.08	122
Gegužė	4.41	137	5.28	164
Birželis	4.59	138	5.54	166

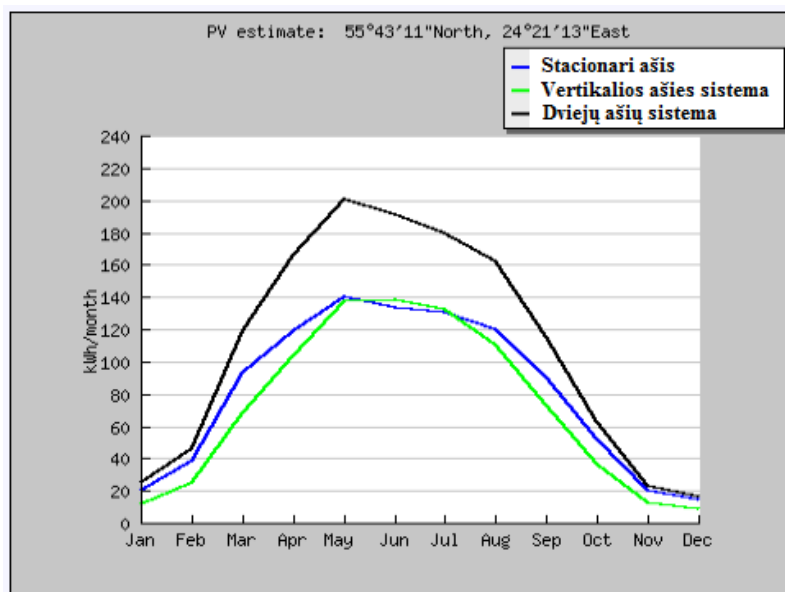
Liepa	4.27	132	5.16	160
Rugpjūtis	3.57	111	4.26	132
Rugsėjis	2.42	72.6	2.85	85.4
Spalis	1.18	36.6	1.38	42.9
Lapkritis	0.43	12.9	0.51	15.1
Gruodis	0.27	8.35	0.31	9.59
Vidutinis metinis	2.35	71.5	2.79	84.9
Iš viso per metus		858		1020

Dviejų ašių saulės sekimo sistemos tyrimo duomenys

Dviejų ašių saulės sekimo sistema				
Mėnesis	E_d	E_m	H_d	H_m
Sausis	0.79	24.5	0.90	27.8
Vasaris	1.64	46.0	1.92	53.9
Kovas	3.83	119	4.60	143
Balandis	5.53	166	6.86	206
Gegužė	6.47	201	8.08	251
Birželis	6.37	191	8.00	240
Liepa	5.81	180	7.32	227
Rugpjūtis	5.24	163	6.52	202
Rugsėjis	3.84	115	4.71	141
Spalis	2.01	62.3	2.41	74.8
Lapkritis	0.78	23.3	0.92	27.5
Gruodis	0.52	16.3	0.59	18.3
Vidutinis metinis	3.58	109	4.41	134
Iš viso per metus		1310		1610

E_d : vidutinė paros elektros energijos gamyba pasirinktoje sistemoje (kWh); E_m : vidutinė mėnesio elektros energijos gamyba pasirinktoje sistemoje (kWh); H_d : vidutinis paros saulės energijos išteklių

pasiskirstymas pasirinktoje sistemoje (kWh/m^2); H_m : vidutinis suminis saulės energijos išteklių pasiskirstymas pasirinktoje sistemoje (kWh/m^2)



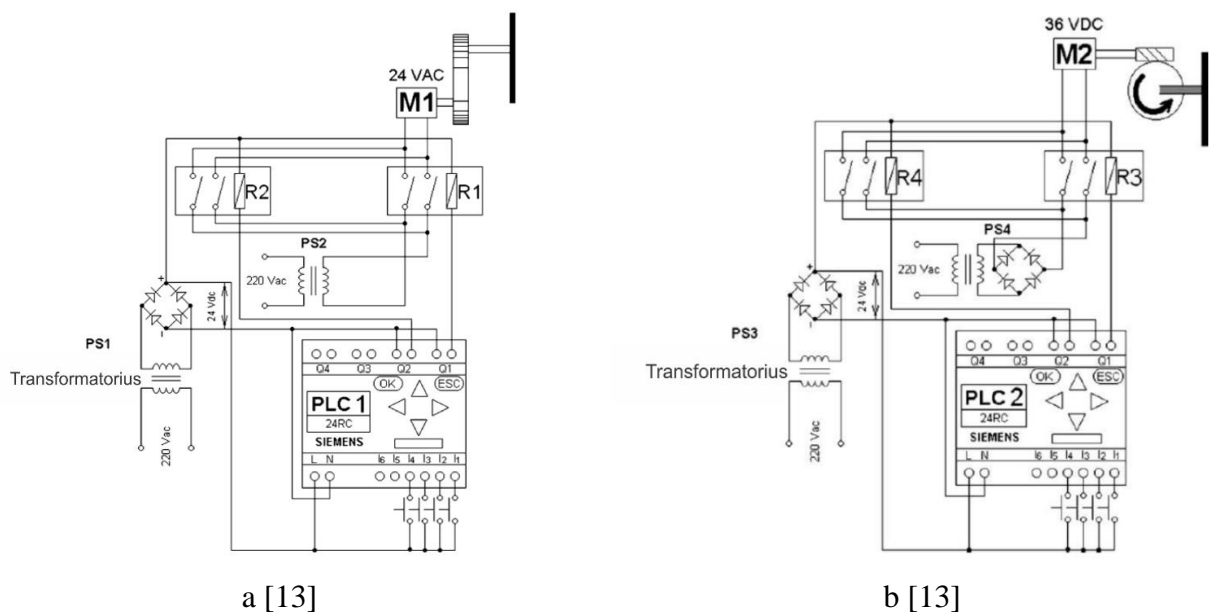
19 pav. Pagamintos elektros energijos rodikliai kWh / mėn., naudojant skirtingas fotoelektrinio modulio sistemas

Remiantis 19 pav. iliustracijos duomenimis, galime daryti išvadą, kad dviejų ašių saulės sekimo sistema yra efektyviausiai panaudojama kadmio telūrido fotoelektriniams moduliams. Vertikalios ašies sistemų panaudojimo būdas netinkamas, kadangi pagamintas elektros energijos skirtumas yra labai nedidelis lyginant su stacionarios ašies sistema. Naudojant dviejų ašių saulės sekimo sistemą gegužės mėnesį pagaminama maždaug 200 kWh elektros energijos, kai tuo laikotarpiu kitos sistemos pagamina maždaug 140 kWh per mėnesį. Tai yra 10 kWh / mėn. daugiau nei naudojant silicio kristalo modulius su dviejų ašių saulės sekimo sistema. Naudojant stacionarią sistemą, kadmio telūrido moduliai pagamino 20 kWh / mėn. daugiau nei silicio kristalo fotoelektriniai moduliai su ta pačia sistema. Kadmio telūrido modulių panaudojimo būdas yra efektyvesnis ir pigesnis palyginus su silicio kristalo moduliais.

5.3. Dviejų ašių saulės sekimo sistema

Saulės sekimo sistemos gali būti įvairių konstrukcijų ir sudėčių, tai labai priklauso nuo konkrečios situacijos. Dažniausiai saulės sekimo sistema susideda iš elektromechaninių komponentų ir užprogramuoto programuojamo loginio valdiklio, ar net mikrovaldiklio. Pagrindinis tokių sistemų tikslas yra didinti sistemos efektyvumą ir išgauti maksimalų elektros gamybos potencialą. Saulės

sekimo sistema gali būti vienos ašies, arba dviejų ašių. Vienos ašies sistema turi žymiai paprastesnę konstrukciją ir jos pigiau kainuoja, tačiau jų efektyvumas yra žymiai mažesnis, negu sistemų turinčių dviejų ašių konstrukciją. Dviejų ašių saulės sekimo sistemos gali būti integruojamos įvairioms fotoelektrinėms panelėms, bet tai gali kainuoti nemažai lėšų, norint išspręsti visus konstrukcinius aspektus konkrečioje montuojamoje situacijoje. Šiame darbe buvo tyrinėjama saulės sekimo sistema naudojant šiuolaikišką ir modernų programuojamą loginį valdiklį (toliau PLV). Uždaros kilpos sistemos su fotojutikliais tradiciškai naudojamos kaip pagrindinis metodas saulės sekimo sistemos kontrolei. Fotojutikliai naudojami inicijuoti Saulės padėties ir tokiu būdu siųsti elektros signalus, kurie įjungia elektros variklius saulės padėties sekimui. Daugelis projektuotojų tai priėmė kaip efektyvų sprendimą saulės sekimo sistemai, tačiau ši sistema gali turėti daug problemų kuomet atsiranda debesuotumas, todėl sistema gali nusistovėti visiškai priešingoje padėtyje, jei tas debesuotumas užtruktų kelias valandas. Todėl šiame darbe yra nagrinėjamas žymiai geresnis ir efektyvesnis saulės sekimo sistemos būdas, kuris paremtas programavimo valdymo metodais ir ši sistema veikia efektyviai ir sklandžiai bet kokiose oro sąlygose, nepriklausomai nuo debesuotumo. Siekiant tai įgyvendinti reikia apskaičiuoti laiko funkciją ir įterpti šias priklausomybes į programuojamą loginį valdiklį. Programuojamas loginis valdiklis kontroliuos pavaros darbą taip, kad bus sekama Saulės pozicija. Elektromechaninė sistema susideda iš dviejų veiksmų, kai pirmas atsakingas už bendrą sukimąsi vertikaloje ašyje, o antras atsakingas už rytų – vakarų (nuolydžio) sukimąsi ir Saulės sekimą. 20 a pav. pavaizduota vertikalios ašies valdymo principinė schema, 20 b pav. – nuožulnios ašies valdymo principinė schema [13].



20 pav. Saulės sekimo sistemos valdymo principinė schema: a – vertikalios ašies principinė valdymo schema; b – nuožulnios ašies principinė valdymo schema

Vertikalios ašies valdymo sistemos PS1 maitinimo šaltinis konvertuoja iš 230V kintamos įtampos į 24V nuolatinę įtampą po diodų tiltelio. PS2 maitinimo šaltinis generuoja kintamą įtampą elektros varikliui M1. Analogiškas maitinimas ir nuožulnios ašies valdymo sistemai, tik skiriasi vienas transformatorius su diodų tilteliais, kuomet išgaunama nuolatinė įtampa tam, kad užmaitinti variklį M2. Programuojamas loginis valdiklis yra Logo 24 RC tipo, nes jis puikiai tinka šiai sistemai, be to jį paprasta naudoti ir pigi rinkos kaina, todėl daugeliui bus įperkamas valdiklis. Šis programuojamas loginis valdiklis turi šešis įėjimus iš kurių keturi įėjimai yra panaudojami šiems tikslams [13]:

- 1) Mygtukas, kuris paleidžia automatinę saulės sekimo sistemą.
- 2) Mygtukas, kuris sustabdo sekimo sistemą.
- 3) Mygtukas, kuris aktyvuoja rankiniu būdu nustatyti vertikalią ašį.
- 4) Mygtukas, kuris aktyvuoja rankiniu būdu nustatyti nuožulnią ašį.

5.4. Saulės sekimo sistemos valdymas

Valdymo sistemos algoritmas susideda iš keturių laiko intervalų, t. y. fotoelektrinis modulis judės ne realiu laiku, o tik tam tikromis valandomis. Tokio pobūdžio sistema yra žymiai paprastesnė, nes ją lengviau derinti, programuoti, maža tikimybė, kad programinis kodas išsiderins, kadangi valdiklis turi vidinę atmintį. Prieš programuojant laiko intervalus, geriausia atlikti vietovės tyrimą, iširti, ar šalia esantys pastatai, medžiai ir kiti galimai trukdantys objektai nesudarys krintančio šešėlio fotoelektrinio modulio paviršiaus plote. Darome prielaidą, kad programuojant laiko intervalus, mums netrukdyt jokie pastatai ar kiti šalia esantys trukdantys objektai. 9 lentelėje pateikiami galimi laiko intervalai, pagal kuriuos bus sudaroma valdiklio programa.

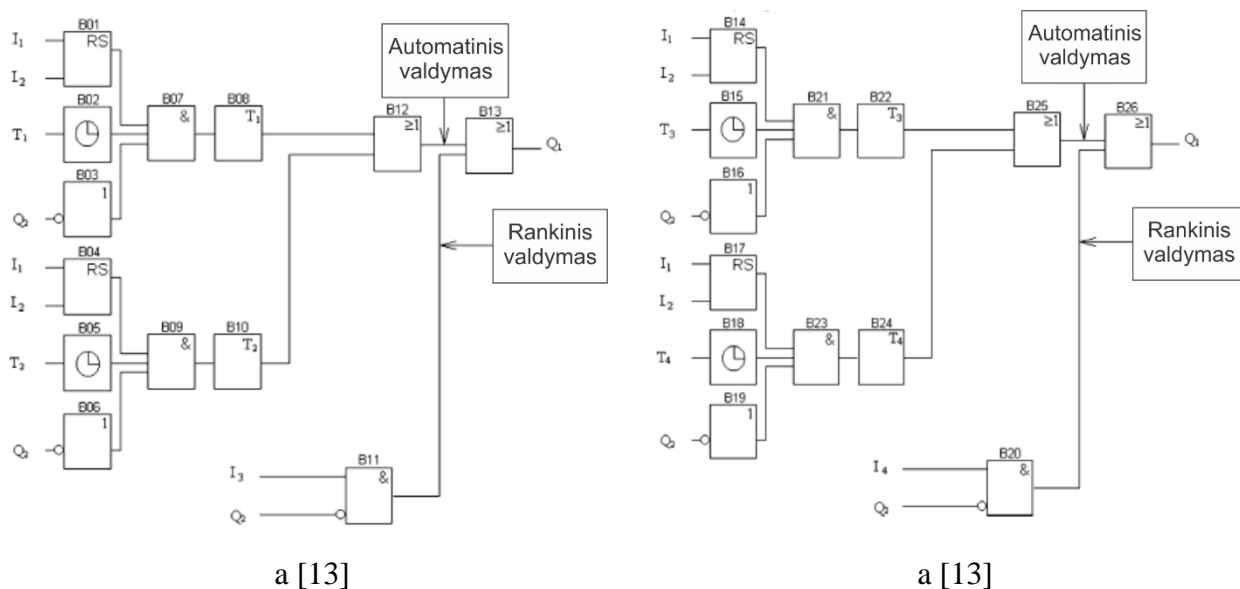
9 lentelė

Programuojamų laiko intervalų duomenys

T1	9 h 30 min.
T2	12 h 00 min.
T3	14 h 30 min.
T4	6 h 30 min.

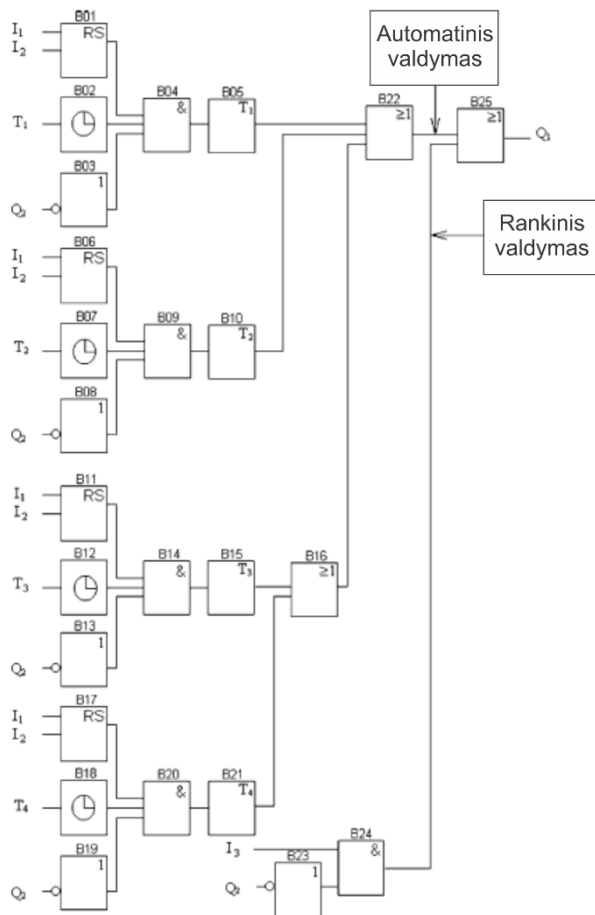
Variklio greičio parametrai parenkami pasirinktinai, tačiau nerekomenduojama nustatinėti greitų apsisukimų, kad dėl papildomų apkrovų nebūtų vartojama daugiau elektros energijos. Turi būti

parenkami optimalūs elektros variklio greičio parametrai, atsižvelgiant į mechanines konstrukcines galimybes. Teoriškai kuo mažesni elektros variklio apsisukimai, tuo mažiau vartojama elektros energijos, tačiau reikia atsižvelgti ir į reikiamą išvystomą jėgą.

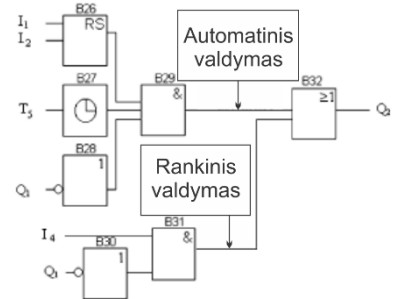


21 pav. PLV programa nuožulnios ašies saulės sekimo sistemos valdymui: a – judesio „pirmyn“ PLV programa; b – judesio „atgal“ PLV programa

Teoriniu aspektu, dirbant elektros varikliui prie mažesnių apsisukimų, mažiau vartojama elektros energijos, tačiau reikia atsižvelgti ar mažo greičio pakaks mechaninės konstrukcijos judesiui. Logo 24 RC valdiklio sistema naudoja funkcinį blokinių diagramų programavimo kalbą. Nuožulnios ašies saulės sekimo sistemos PLV valdymo programa iliustruojama 21 pav. Norint valdyti nuožulnios ašies sekimo sistemą, reikia vienos programos, kuri valdys judesį „pirmyn“, o kitos programos prireiks inicijuojant valdymo judesį „atgal“. Valdymo blokai B02, B05, B15 ir B18 atlieka laiko skaičiavimo funkciją, o B08, B10, B22 ir B24 programuojami 9 lentelėje išvardyti minėti laiko intervalai. B02 skaitiklis bus aktyvus nuo 6 h 30 min iki 9 h 30 min, o praėjus šiam laiko tarpui bus aktyvuojamas B08 skaitiklis, kuris siunčia signalą elektros variklio judesiui [13]. PLV programa vertikaliuos ašies saulės sekimo sistemai valdyti pateikiama 22 pav.



a [13]



b [13]

22 pav. PLV programa vertikalios ašies saulės sekimo sistemos valdymui: a – judesio „pirmyn“ PLV programa; b – judesio „atgal“ PLV programa

Norint realizuoti vertikalios ašies sekimo sistemos valdymą, reikės dviejų programų. Viena atsakinga už judesį „pirmyn“, kita už judesį „atgal“, analogiška loginė seka kaip ir nuožulnios ašies sistemos. Valdymo blokai B02, B07, B12 ir B18 atlieka laiko skaičiavimo funkciją, o B05, B10, B15 ir B21 programuojami 1 lentelėje išvardyti minėti laiko intervalai. B32 valdymo blokas suveiks po saulėlydžio ir vertikalios ašies sistemos elektros variklis turės grįžti į pradinę padėtį, ir ciklas vėl prasidės iš naujo. Ši saulės sekimo valdymo sistema suvartoja mažai elektros energijos, kadangi sistema veikia tik tam tikrais laiko intervalais [13].

5.5. Skyriaus išvados

1. Atlikus silicio kristalo fotoelektrinio modulio efektyvumo tyrimą paaiškėjo, kad efektyviausias panaudojimo būdas yra su dviejų ašių saulės sekimo sistema. Gegužės mėnesį

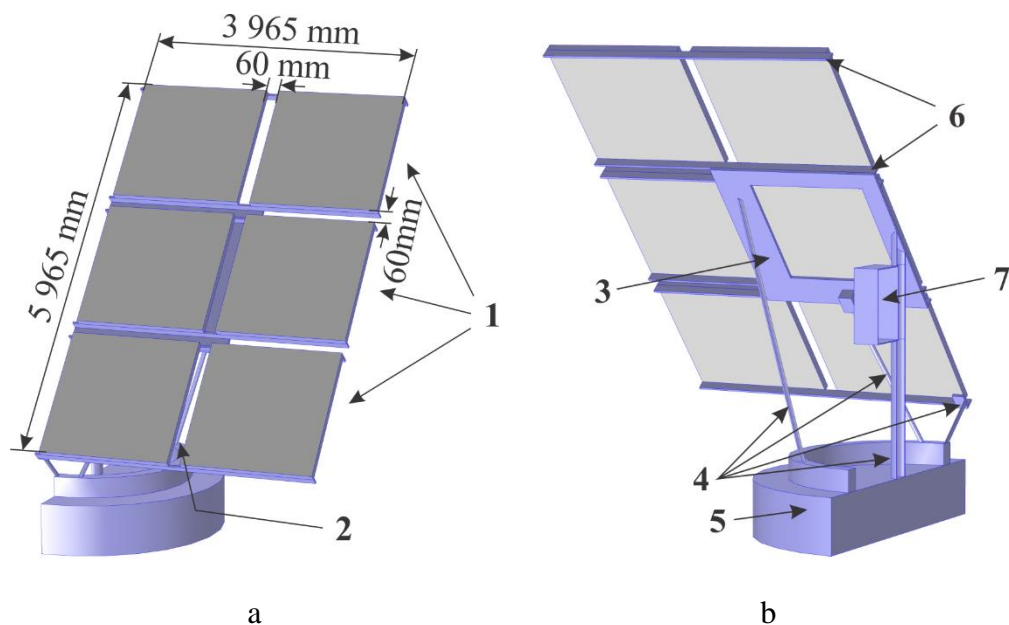
buvo generuojama 70 kWh / mėn. daugiau elektros energijos lyginant su kitomis sistemomis. Žiemos periodais dviejų ašių saulės sekimo sistemos panaudojimo būdas generuoja dvigubai daugiau elektros energijos lyginant su kitomis sistemomis.

2. Atlikus kadmio telūrido (CdTe) fotoelektrinio modulio efektyvumo tyrimą paaiškėjo, kad efektyviausias panaudojimo būdas yra su dviejų ašių saulės sekimo sistema. Gegužės mėnesį buvo generuojama 60 kWh / mėn. daugiau elektros energijos lyginant su kitomis sistemomis. Žiemos periodais dviejų ašių saulės sekimo sistemos panaudojimo būdas generuoja dvigubai daugiau elektros energijos lyginant su kitomis sistemomis.
3. Nors kadmio telūrido fotoelektrinio modulio efektyvumo rodikliai yra labai geri lyginant su silicio kristalo fotoelektriniais moduliais, tačiau reikia atkreipti dėmesį į tai, kad kadmio telūridas yra kenksmingas ir žalingas aplinkai. Šiuo metu daugelis šalių šį kenksmingą elementą riboja ir sprendžia dėl tolimesnių šių modulių panaudojimo perspektyvų.
4. Silicio kristalo fotoelektriniai moduliai nuolat orientuojant statmenai į saulės spindulius karštomis vasaros dienomis gali įkaitinti paviršiaus plotą iki kritinės leistinos temperatūrinės ribos. Įkaitintas paviršiaus plotas gali neigiamai paveikti fotoelektrinio modulio generuojamai galiai.
5. Saulės sekimo sistemos orientuojamos pagal fotojutiklius yra sudėtingos ir netikslios, kadangi atsiradus šviesos koncentracijos trikdžiams jos linkusios išsiderinti ir nusistovėti visiškai priešingoje pusėje. Tokiu atveju kaupiama elektros energija su žemais efektyvumo rodikliais.
6. Racionalesnis ir efektyvesnis saulės sekimo sistemos sprendimas naudojant programuojamąjį loginį valdiklį, optimaliai suskirstant laiko intervalus dalimis. Automatinė valdymo sistema tam tikrais laiko intervalais pakreipia į saulės judėjimo kryptį.

6. TIRIAMOJI DALIS

6.1. Fotoelektrinio modulio modeliavimas

Ne visada yra galimybių atlikti realų eksperimentą praktiškai, todėl taikomi imitaciniai modeliai ir gaunama informacija apie tyrinėjamą sistemą ar objektą. Tokiu atveju sutaupoma daug laiko ir finansų, galima tyrinėti egzistuojančias ir neegzistuojančias sistemas, prieiti prie konkrečių išvadų. Šiame straipsnyje sprendžiamas vėjo įtempių uždavinys naudojantis „Comsol Multiphysics“ programine įranga, kuri grindžiama baigtinių elementų analizės metodu. Atliekant tokį eksperimentą galima sudaryti valdymo charakteristikas. 23 pav. yra parenkamas fotoelektrinio modulio prototipas su 60 mm oro tarpais. Modelyje įvertintos pradinės sąlygos – lauko temperatūra, veikiamas atmosferinis slėgis, ramios būsenos vėjo srautas bei fotoelektrinio modulio konstrukcinės ir mechaninės savybės. Tiriamojo fotoelektrinio modulio konstrukcinis išsidėstymas iliustruojamas 1 pav.



23 pav. Fotoelektrinio modulio konstrukcinis išsidėstymas: a – vaizdas iš priekinės pusės; b – vaizdas iš galinės pusės; 1 – atskiri fotoelektriniai moduliai sutvirtinami bendroje plokštumoje; 2 – 60 mm oro tarpai tarp modulių; 3 – aliumininis modulių sutvirtinimo pagrindas; 4 – pagalbinės plieninės atramos; 5 – pagrindas; 6 – aliumininiai sutvirtinimo profiliai; 7 – valdymo blokas

Modelį sudaro šeši fotoelektriniai moduliai, kurie sutvirtinami bendru profiliniu karkasu, atskiriant modulius 60 mm oro tarpu. Vieno fotoelektrinio modulio matmenys – $1948,3 \times 1952,5$ mm, o kai fotoelektriniai moduliai sutvirtinami į bendrą karkasą, bendri plokštumos matmenys – 3965

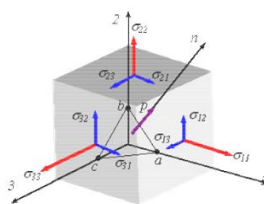
× 5965 mm. 60 mm oro tarpai mažina mechaninius įtampius sukeltam vėjo srautui ir tokiu būdu ribojamas vėjo pasiskirstymas viename paviršiaus plote.

6.2. Fotoelektrinio modulio prototipo naudojamos medžiagos

Konstrukcija laikosi ant cilindro formos plieninio strypo ir kitų plonesnių plieninių pagalbinių atramų. Viena cilindro formos strypo pusė statmenai pritvirtinta prie pagrindo, kita - prie aliumininio modulių sutvirtinimo pagrindo, prie kurio tvirtinami visi šeši fotoelektriniai moduliai. Modelyje panaudotos pagalbinės atramos, kurios suteikia stabilumo visai mechaninei konstrukcijai veikiant jėgoms. Vieną fotoelektrinį modulį sudaro sujungti maži fotoelementai, padengti stiklu. Visas stiklas kartu su fotoelementais įdedamas į aliumininį karkasinį rėmą, kuris papildomai sutvirtinamas. Šiuo atveju aliumininis karkasinis rėmas atlieka aušinimo funkciją, kad neįkaistų fotoelektrinių modulių paviršiaus plotas. Konstrukciniai aliumininiai elementai yra pagaminti 5% kietojo aliuminio standumo ir 0,33 Puasono santykiu. Modeliuojant daroma prielaida, kad fotoelektrinio modulio sistema kartu su vykdykliu yra absoliučiai tvirta žemės atžvilgiu [14].

6.3. Mechaninių įtampių matematinis modeliavimas pasvirusioje plokštumoje

Panagrinėkime teoriniu aspektu, kokiais metodais yra apskaičiuojami įtempiai pasvirusioje plokštumoje ir kokios yra skaičiavimo formulės. Įtempiams nustatyti laisvai pasirinktoje pasvirusioje plokštumoje įveskime koordinačių ašių žymėjimą: $x - 1$, $y - 2$, $z - 3$. 24 pav. iliustruojami mechaniniai įtempiai pasvirusioje plokštumoje [15].



24 pav. Mechaniniai įtempiai pasvirusioje plokštumoje [15]

Pasvirusios plokštumos abc normalės vektorius gali būti užrašomas [15]:

$$n = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix}; \quad (6.3.1)$$

Įtempių būvio matrica elemente užrašoma taip [15]:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix}; \quad (6.3.2)$$

Įtempių užrašymas matrica vadinama tenzoriumi. Matricos įstrižainė rodo plokštumos normalinius įtempius, o kiti matricos elementai – tangentinius įtempius. Tada veikiantį pasvirusioje plokštumoje abc pilnojo įtempio vektorių p išreiškiame į tris ašis [15]:

$$p = n\sigma; \quad (6.3.3)$$

Išplėstinės formos pavidalas [15]:

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_1 \cdot \sigma_1 & n_2 \cdot \tau_{12} & n_3 \cdot \tau_{13} \\ n_2 \cdot \tau_{21} & n_2 \cdot \sigma_2 & n_2 \cdot \tau_{23} \\ n_3 \cdot \tau_{31} & n_3 \cdot \tau_{32} & n_3 \cdot \sigma_3 \end{pmatrix}; \quad (6.3.4)$$

Įrašę atitinkamas reikšmes, gauname [15]:

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_x \cdot \sigma_x & n_y \cdot \tau_{xy} & n_z \cdot \tau_{xz} \\ n_y \cdot \tau_{yx} & n_y \cdot \sigma_y & n_y \cdot \tau_{yz} \\ n_z \cdot \tau_{zx} & n_z \cdot \tau_{zy} & n_z \cdot \sigma_z \end{pmatrix}; \quad (6.3.5)$$

Normaliniai įtempiai pasvirusioje plokštumoje abc nustatomi iš pilnojo įtempio vektoriaus p projekcijos į normalę pagal tokią lygybę [15]:

$$\sigma_a = p^T \cdot n; \quad (6.3.6)$$

Į šią lygybę įrašius atitinkamus narius ir įvertinus tangentinių įtempių dualumo principą, gauname [15]:

$$\sigma_a = \sigma_{11} \cdot n_1^2 + \sigma_{22} \cdot n_2^2 + \sigma_{33} \cdot n_3^2 + 2 \cdot \sigma_{12} \cdot n_{12} + 2 \cdot \sigma_{13} \cdot n_{13} + 2 \cdot \sigma_{23} \cdot n_{23}; \quad (6.3.7)$$

Tangentiniai įtempiai pasvirusioje plokštumoje [15]:

$$\tau_a = \sqrt{p_a^2 - \sigma_a^2}; \quad (6.3.8)$$

čia: p_a – pilnojo įtempių vektoriaus modulis, kurio išraiška [15]:

$$p_a = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2}. \quad (6.3.9)$$

Modeliavimo eksperimente tirsime fotoelektrinio modulio mechaninius įtempius esant skirtingam nustatomam vėjo greičiui. Tyrimo metu gausime įtempių jėgų priklausomybes ir taip sudarysime valdymo charakteristikų parametrus.

6.4. Oro turbulencijos matematinis modelis

Nagrinėjama atveju norint ištirti konstrukcines įtempių apkrovas geriausia naudoti ekstremalios turbulencijos, staigaus vėjo gūsių ir krypties pasikeitimo modelius. Modelyje naudojamas turbulencijos oro judėjimo būdas, kuriam būdingas chaotiškumas ir tam tikrų sūkurių susidarymas. Perėjimą tarp tekėjimo būdo nusako bedimensinis dydis - Reinoldso skaičius [16].

$$e = \frac{\rho v_s^2 / L}{\mu v_s / L^2} = \frac{\rho v_s L}{\mu} = \frac{v_s L}{\nu}; \quad (6.4.1)$$

čia: v_s – tai oro greitis, m/s, L – charakteringas sistemos ilgis, m, μ – oro dinaminės klampos koeficientas, (N s m⁻²) arba (Pa s), $\nu = \mu/\rho$ – oro kinematinės klampos koeficientas, (m² s⁻¹), ρ – oro tankis, (kg m⁻³)

Šis turbulencijos modelis remiasi sūkurių klampumo koncepcija Reinoldso įtempių išraiškomis. Esant sudėtingiems srautams su svorio jėgomis ar sudėtingais įtempių laukais, ši prielaida tampa paprasta [17].

6.5. Ekstremalios turbulencijos modelis

Šis modelis sujungia vėjo greičio pasiskirstymą kintant aukščiui ir charakteristinį standartinį turbulencijos nuokrypį.

Standartinis turbulencijos nuokrypis skaičiuojamas pagal formulę [16]:

$$\sigma_v = C \cdot I_{ref} \cdot \left(0,072 \cdot \left(\frac{U_{average}}{C} + 3 \right) \cdot \left(\frac{U_{hub}}{C} - 4 \right) + 10 \right); \quad (6.5.1)$$

Vidutinis vėjo greitis [16]:

$$v_m(z) = U_{hub} \cdot \left(\frac{z}{h} \right)^{0,14}; \quad (6.5.2)$$

Turbulencijos intensyvumas [16]:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)}; \quad (6.5.3)$$

6.6. Staigaus vėjo gūσιο ir krypties pasikeitimo modelis

Šis modelis apibūdina staigų vėjo greičio padidėjimą ir jo krypties pasikeitimą per 10 sekundžių. Padidėjęs vėjo greitis apskaičiuojamas [16]:

$$v_m(z) = v(z) + v_{cg}; \quad (6.6.1)$$

čia: v_{cg} – vėjo greičio vertė 15 m/s.

Turbulencijos intensyvumas randamas pagal [16]:

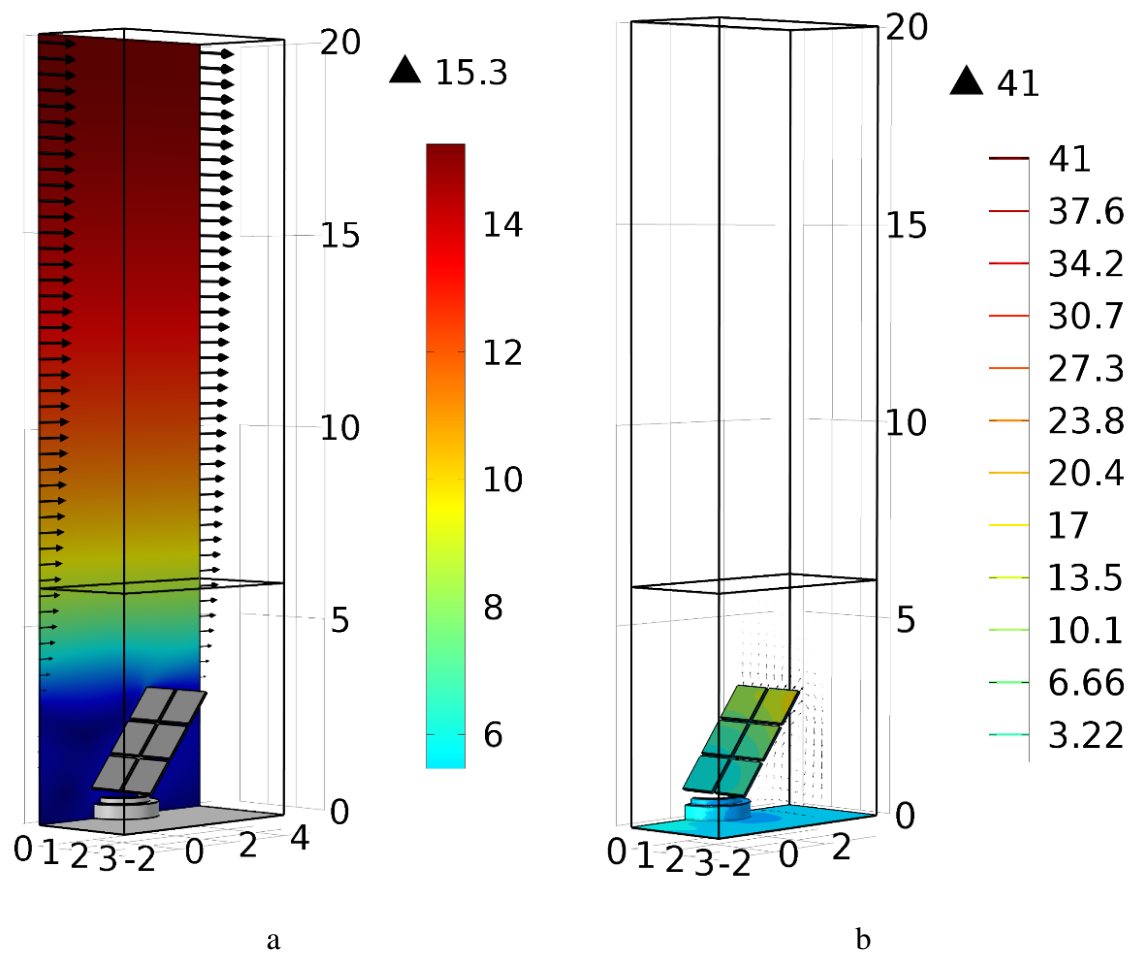
$$v_m(z) = U_{hub} \cdot \left(\frac{z}{h} \right)^{0,14}; \quad (6.6.2)$$

Vėjo gūσιο krypties pasikeitimo kampas atvirkščiai proporcingas vėjo greičiui [16]:

$$I_v(z) = \frac{1}{\ln(z/z_0)}; \quad (6.6.3)$$

6.7. Tyrimo rezultatai

Fotoelektrinio modulio modelis buvo ištirtas veikiant įvairiais vėjo greičiais. 25 a pav. pateikiamas vėjo stiprumo simuliuojamas modelis. Jame matematiškai formuojamas oro srauto stiprumas ir tokiu būdu nagrinėjama, kaip šios mechaninės jėgos veikia fotoelektrinį modulį. Modeliavimo pagrindinis tikslas buvo sužinoti, kokios yra gaunamos priklausomybės valdymo charakteristikoms sudaryti.



25 pav. Fotoelektrinio modulio matematinio modeliavimo rezultatai: a – vėjo stiprumo modelis; b – sukkelto vėjo spaudžiamų jėgų pasiskirstymo modelis

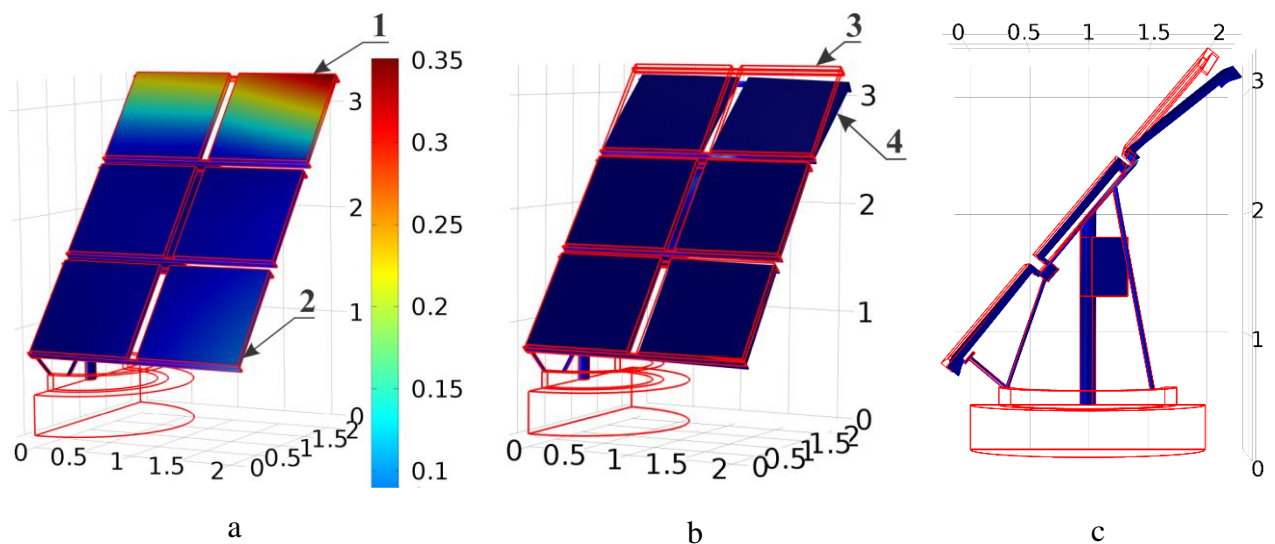
Fotoelektrinis modulis dedamas į stačiakampio formos trimatę erdvę, taip imituojujant apibrėžtą lauko teritoriją ir lauko sąlygas. Modelio dešinėje pusėje grafiškai pavaizduota spalvų gama su nustatomo vėjo greičio priklausomybėmis. Ši juosta su spalvų gama, nurodo rezultatą, kokios yra vėjo srauto greičio priklausomybės ir koks buvo pasiektas maksimalus vėjo greitis iki kritinės fotoelektrinio modulio veikiančių jėgų ribos. Kadangi fotoelektrinio modulio prototipas buvo suprojektuotas iš šešių skirtingų modulių paliekant tarp jų po 60 mm oro tarpus, tai didelę įtaką padaro visai mechaninei konstrukcijai, kadangi oro srauto sudaroma jėga pasiskirsto mažesniuose paviršiaus plotuose. Dėl skirtingo vėjo greičio ir aplinkos oro sąlygų formuojasi skirtingo dydžio slėgis tarpų kraštuose ir briaunose, tai lemia konstrukcinių medžiagų nusidėvėjimą.

1 lentelė

Įtempių pasiskirstymo priklausomybės nuo užduodamo vėjo greičio

Užduodamas vėjo greitis	Gaunamas mechaninis įtempis	Gaunamas paviršiaus poslinkis
6 m/s	1,4 N/m ²	0,1 mm
8 m/s	10,1 N/m ²	0,15 mm
10 m/s	20,2 N/m ²	0,2 mm
12 m/s	28 N/m ²	0,25 mm
14 m/s	37,6 N/m ²	0,3 mm
15,3 m/s	41 N/m ²	0,351 mm
>15,3 m/s	>41 N/m ²	Modulis pažeidžiamas

25 b pav. modelis iliustruoja spaudžiamų jėgų pasiskirstymą viso fotoelektrinio modulio atžvilgiu. Didžiausias pasiekiamas spaudžiamas įtempis siekia – 41 N/m², kuris susiformuoja fotoelektrinio modulio viršutiniame dešiniajame krašte. Tai yra viena iš silpnų šios konstrukcijos vietų, todėl veikiant stipriems vėjams, spaudžiamoji jėga palenkia viršutinį dešinįjį kraštą. 26 b ir 26 c pav. modelyje atvaizduojama, kaip veikiant oro srauto apkrovoms keičiasi fotoelektrinio modulio mechaninės savybės. Tyrimo metu palaipsniui buvo didinamas vėjo greitis, kuris fotoelektriniame modulyje sukuria veikiamas jėgas. Nustatyta, kad prie 15,3 m/s vėjo greičio, fotoelektrinis modulis gali būti negrįžtamai mechaniškai pažeistas. 26 pav. iliustruojami modelio rezultatai, kaip veikiant 15,3 m/s vėjo greičiui pasikeičia fotoelektrinio modulio mechaninės savybės ir atsiranda poslinkis. 26 c pav. modelyje pateikiamas vaizdas iš šono, pagal kurį gerai matomas 0,351 mm poslinkis.



26 pav. Fotelektrinio modulio mechaniniai įtempiai prie 15,3 m/s vėjo greičio: a – mechaninių įtempių pasiskirstymas spalvinėje legendoje; b – mechaninė deformacija, vaizdas iš priekio; c – mechaninė deformacija, vaizdas iš šono; 1 – didžiausias pasiektas mechaninis įtempis viršutiniame dešiniajame kampe; 2 – mažiausias pasiektas mechaninis įtempis dešiniajame apatiniame kampe; 3 – raudonu kontūru atvaizduojama modulio būseną neveikiant apkrovoms; 4 – fotelektrinio modulio įtempio poslinkis veikiant 15,3 m/s vėjo jėgai

Tyrimo rezultatai rodo, kad, pasiekus 15,3 m/s kritinį vėjo greitį, fotelektrinio modulio mechaninė konstrukcija pažeidžiama ir deformuojama neatstatomai, o pasiekus didesnę nei kritinį vėjo greitį – įvyksta mechaninis lūžis. Modeliavimo metodais nustatyta, kad esant dideliame vėjo greičiui fotelektrinis modulis turi būti staigiai pakreipiamas šonu nuo vėjo krypties.

6.8. Tiesiaieigės sraigtinės pavaros modeliavimas ir tyrimas

Gamybos pramonės robotizuotose sistemose dažnai susiduriama su tiesiaiegiais elektros varikliais. Šie varikliai naudojami norint išgauti tiesinį (linijinį) judesį gaminant produktus konstrukcinių elementų surinkimo postuose, taškinio suvirinimo robotizuotose sistemose ir bet kur kitur, kur reikia paimti, perkelti ar pritvirtinti konstrukcines detales. Tiesiaieigės pavaros supaprastina mechaninę konstrukciją, lengvesnis jų pritaikymas ir panaudojimo būdas. Dažnai tiesiaiegiai elektros varikliai naudojami taupant elektros energijos sąnaudas. Mechatroninėse sistemose dažniausiai yra naudojamos skaitinės, krumplinės ir sraigtinės pavaros. Visos šios pavaros turi skirtingą veikimo principą, todėl jų pritaikymas taip pat skiriasi. Tiesiaieigė skaitinė pavara naudoja plokščią arba krumpliuotą diržą, tokios pavaros dažniausiai naudojamos pozicinio valdymo funkcijoms atlikti. Krumplinės pavaros susideda iš krumpliaračio, varančio krumpliuotą juostą, tokias pavaras galima

naudoti didelio judesio intervalo mašinose, taip pat judantiems elementams ir mazgams nustatyti įvairiose mechatroninėse sistemose. Sraigtinėje pavaroje elektros variklio varomas sraigtas keičia sukamąjį variklio judesį į tiesiaieigį veržlės judesį [18, 19].

Nagrinėjant mokslinę literatūrą, randama informacija, jog fotoelektriniams moduliams valdyti dažniausiai taikomi nuolatinės srovės servo varikliai arba nuolatinės srovės žingsniniai varikliai. Tai ganėtinai geras pasirinkimas, kadangi šio tipo varikliai turi dideles valdymo galimybes. Šiuolaikinė servo variklio valdymo grandinė susideda iš impulsų pločio generatoriaus, posūkio kampo daviklio, PID ar PI regulatoriaus, kompensacinių stabilizatorių, elektros pavaros ir elektros variklio valdymo grandinių. Šie sprendimai gali pagerinti fotoelektrinio modulio valdymo sistemos stabilumą kompensuojant įvairius nuostolius. Valdymo sistemų panaudojimo būdai ženkliai pagerino fotoelektrinių modulių efektyvumą. Tačiau servo variklių, ar žingsninių variklių panaudojimo būdai ganėtinai sudėtingi, reikia nemažai dėmesio skirti mechaninei konstrukcijai, papildomai tenka parinkinėti reduktorių, kad būtų mažinamas greitis ir didinama jėga. Tiesiaiegių sraigtinių elektros pavarų panaudojimo būdas palengvina mechaninės konstrukcijos uždavinius, tačiau šiai dienai fotoelektrinių modulių saulės sekimo sistemose naudojami retai. Pagrindinė priežastis matyt dėl sudėtingos konstrukcijos ir brangaus aptarnavimo, kadangi nuolatinės srovės variklis turi kontaktinius šepečius, kuriuos reguliariai reikia keisti ir prižiūrėti. Ši priežastis nėra palanki atsižvelgiant į tai, kad fotoelektrinio modulio tarnavimo laikas gali siekti iki 30 metų, todėl iškyla klausimas kiek kartų teks vykdyti remonto darbus dėl tokio tipo pavarų. Šiuo metu rinkoje yra nemažai gamintojų, kurie elektros pavaras reprezentuoja kaip aukšto lygio patikimą produktą, kuris pasižymi ilgaamžiškumu ir nedidelėmis eksploatacinėmis išlaidomis. Šiame skyriuje yra nagrinėjimas tiesiaieigės sraigtinės pavaros modeliavimas „Matlab Simulink“ programinės įrangos priemonėmis. Tiesiaieigė pavara yra parenkama pagal „Transmotec“ katalogą, grafinė iliustracija pateikiama 27 pav.



27 pav. Nuolatinės srovės variklio tiesiaieigė sraigtinė elektros pavara [32]

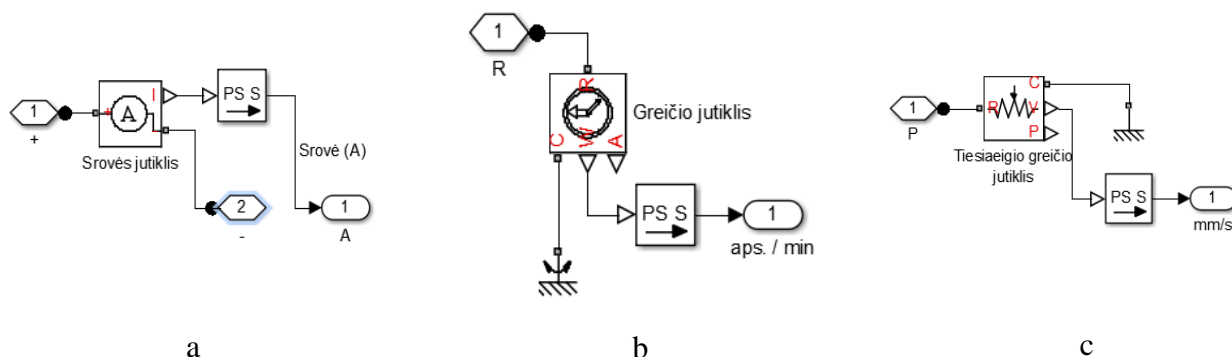
Modeliuojamas modelis parodo, kaip plėtoti ir pritaikyti tokio tipo pavaras pagal reikiamus poreikius. Tiesioginės elektros pavaros techniniai parametrai suvedami remiantis gamintojo katalogo duomenimis. Techninių parametru duomenys pateikiami 10 lentelėje.

10 lentelė

Nuolatinės srovės tiesiaieigės sraigtinės elektros pavaros techniniai parametrai

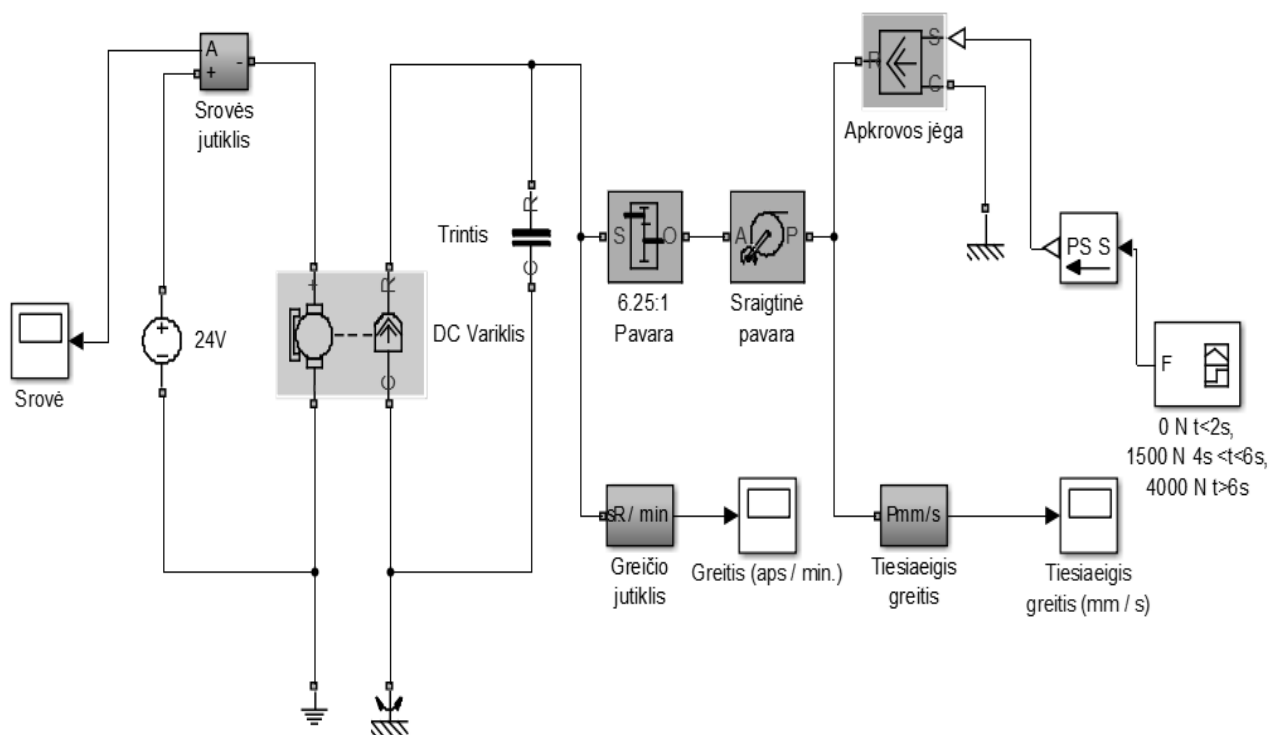
Variklio pavaros santykis	25,6 : 1
Vardinė įtampa	24 V
Dinaminės apkrovos jėga	1000 N
Statinė apkrovos jėga	4000 N
Variklio pavaros greitis neveikiant apkrovai	26 mm / s
Variklio pavaros greitis veikiant pilnai apkrovai	19 mm / s
Variklio apsisukimo greitis be apkrovos	3250 aps. /min
Variklio vartojama srovė veikiant pilnai apkrovai	5 A
Variklio nominalioji srovė	0,45 A

Norėdami paleisti modelio simuliaciją, įvedame elektros pavaros parametrus, kurie pateikiami 10 lentelėje. Dėl tikslesnio variklio suderinimo įvedamas trinties koeficientas. Variklio apvijų varža apskaičiuojama pagal omo dėsnį: $24V / 5A = 4,8\Omega$. „Matlab Simulink“ naudojamojoje aplinkoje nustatomi lygiaverčiai grandinių parametrai naudojant trinties jėgos bloką. Norint įsitikinti, ar visi parametrai įvesti teisingai, galima paleisti simuliacijos režimą neveikiant jokioms jėgoms ir apkrovoms.



28 pav. Jutiklių jungimo schemas: a – srovės jutiklio jungimo schema; b – greičio jutiklio jungimo schema; c – tiesiaieigės pavaros greičio jutiklio jungimo schema

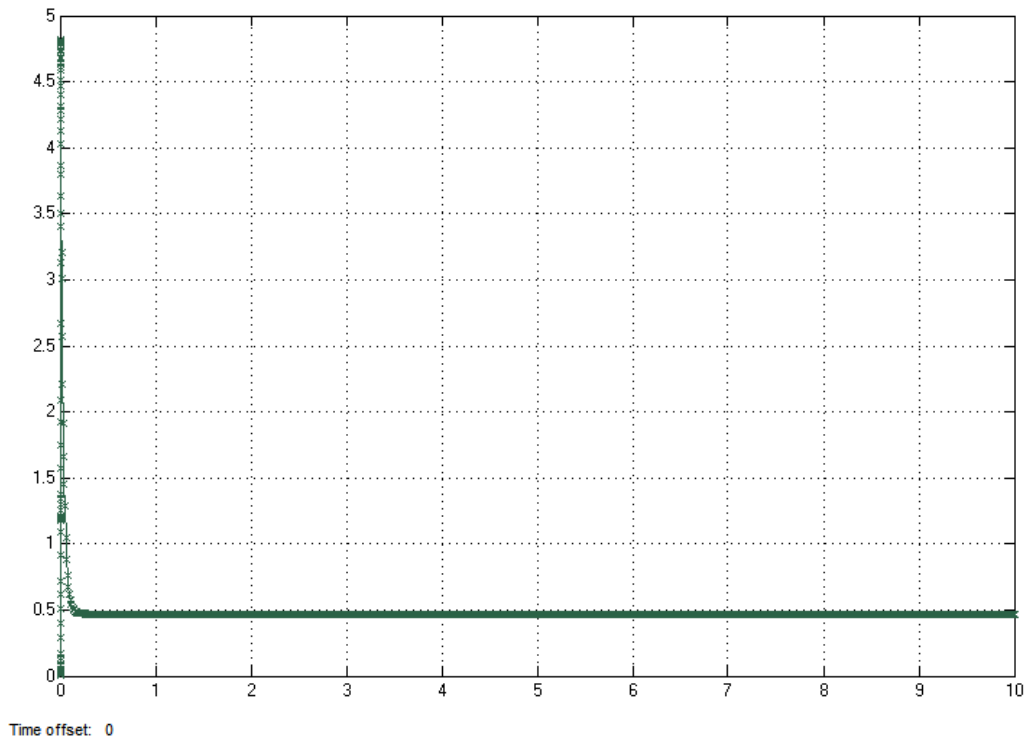
Jeigu pavaros judėjimo greitis – 26 mm / s, variklio apsisukimo greitis – 3250 aps. / min. ir pavaros apkrovos srovės vertė atitinka nominaliąją srovės vertę, vadinasi, konfigūracija tiksli. Tyrimo metu bus nagrinėjami greičio ir srovės priklausomybės veikiant įvairiomis apkrovomis. Tam, kad skaičiavimo rezultatai būtų tikslesni, modelyje naudojamas srovės , variklio greičio apsisukimų ir tiesiaieigės pavaros greičio jutikliai. Jutiklių jungimo schemas pateikiamos 28 pav., Modelis susideda iš nuolatinės srovės elektros variklio, 6.25:1 tipo sraigtinės pavaros ir imituojamos apkrovos jėgos. Tarp elektros variklio ir maitinio šaltinio jungiamas srovės jutiklis, kuriuo atlikinėsime eksperimentinius srovių matavimus. Norint gauti tikslesnius tyrimo rezultatus, greičio jutiklis jungiamas po elektros variklio įvesto trinties koeficiento. 29 pav. pateikiamas sumodeliuotas tiesiaieigės sraigtinės pavaros modelis.



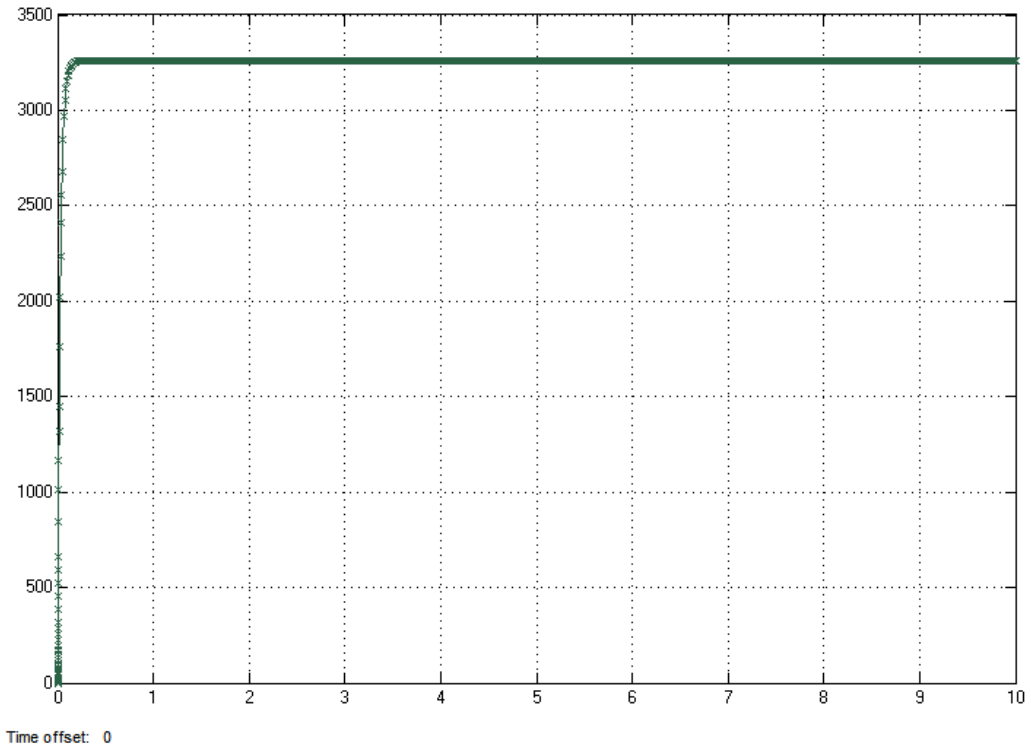
29 pav. Nuolatinės srovės variklio tiesiaieigės sraigtinės elektros pavaros modelis

6.9. Tyrimo rezultatai

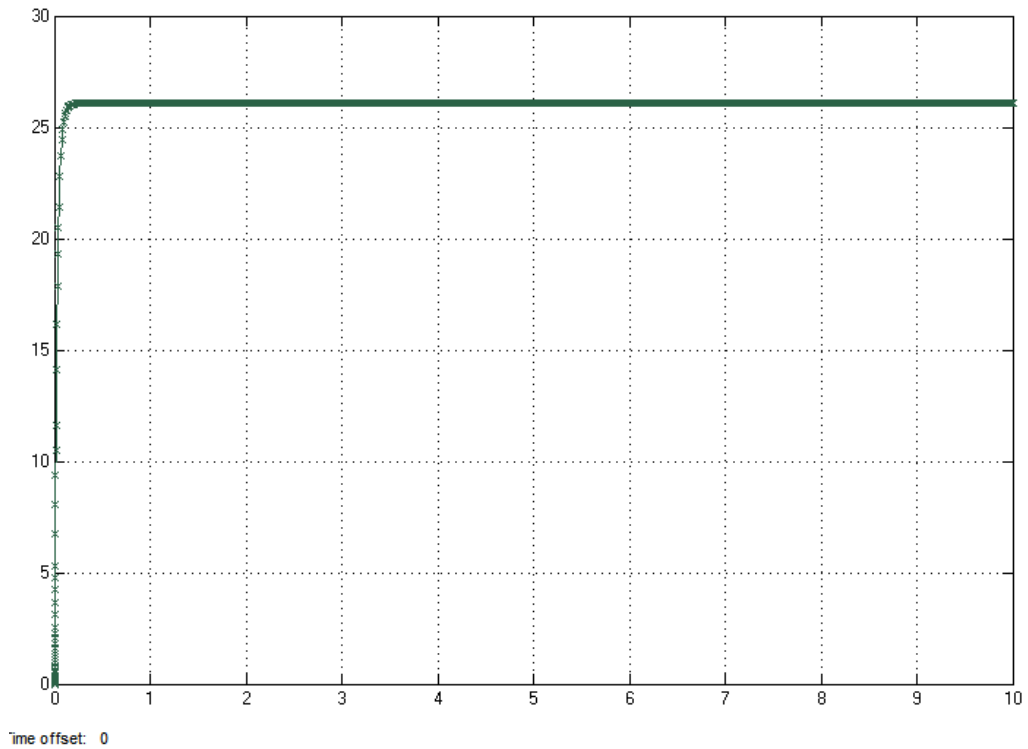
Atlikus tiesiaieigės pavaros modeliavimo operacijas Matlab Simulink aplinkoje ir įvedus reikiamus parametrus, buvo atliekami eksperimentiniai tyrimai. Kad įsitikintume, jog modelis veikia teisingai, atliekame matavimo eksperimentus dirbant pavarai laisvu režimu, neveikiant jokioms apkrovoms. Matavimai buvo atliekami panaudojant Matlab Simulink „Scope“ instrumentines priemones.



30 pav. Paleidimo momentas ir srovės nuo laiko priklausomybė neveikiant apkrovoms, $t=10s$



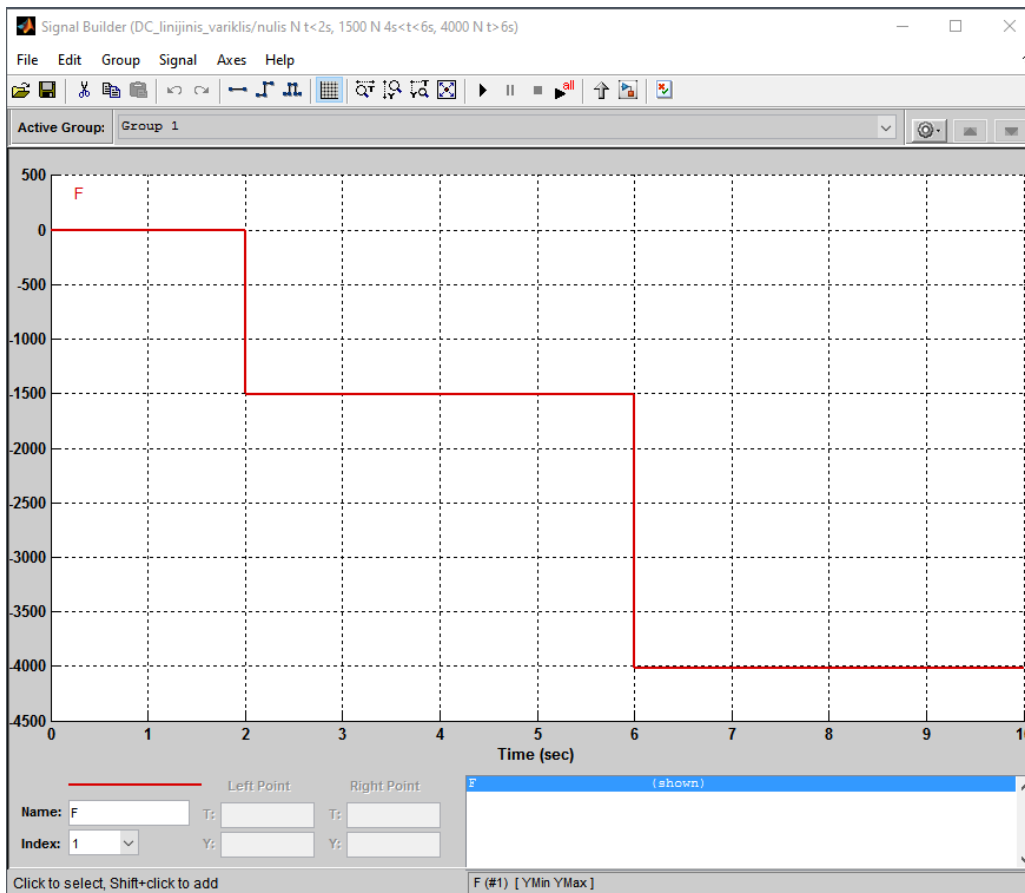
31 pav. Elektros variklio maksimalaus sūkio dažnio nuo laiko priklausomybė neveikiant apkrovoms, $t=10 s$



32 pav. Tiesiaeigės pavaros maksimalaus greičio priklausomybė nuo laiko neveikiant apkrovoms,
 $t=10$ s

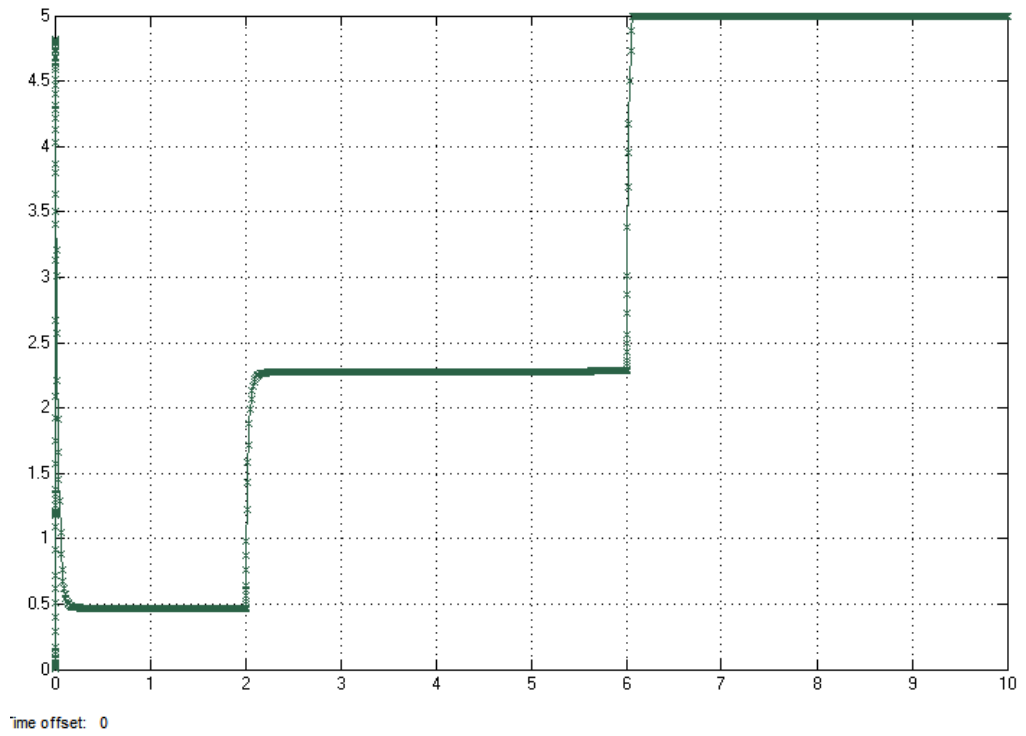
Eksperimentinių matavimų tyrimų metu buvo išsiaiškinta, kad tiesiaeigės pavaros paleidimo momentu vartojama elektros srovė siekė $\sim 4,8$ A. Variklis paleidžiamas ir nusistovi nominalioji srovė siekianti $\sim 0,45$ A (30 pav.), variklio apsisukimo greitis be apkrovos siekia ~ 3250 aps. / min (31 pav.), tiesiaeigės pavaros maksimalus judėjimo greitis yra ~ 26 mm/s (32 pav.) ir tai atitinka gamintojo nurodytas technines specifikacijas.

Antrasis eksperimentinis tyrimas bus vykdomas apkraunant tiesiaėigę pavara veikiančiomis nustatytomis tam tikromis jėgomis.

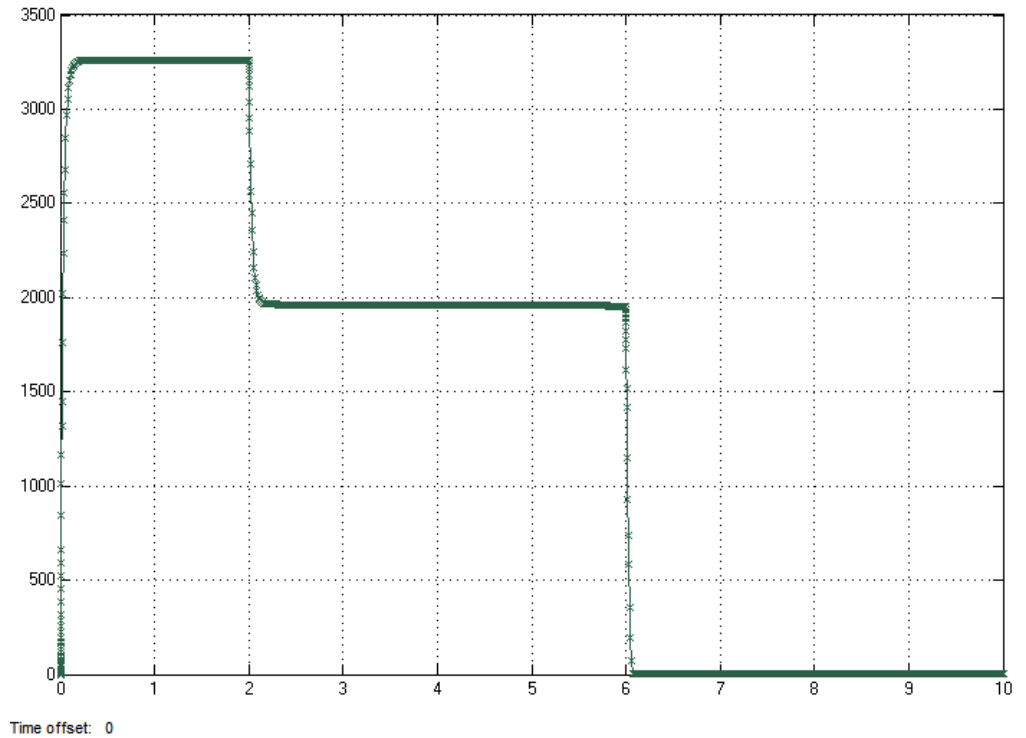


33 pav. Parenkamos atsitiktinės apkrovų vertės signalų kūrimo aplinkoje

Apkrovų signalų generavimo aplinkoje nustatome apkrovų vertes tokia tvarka: 2 s neveikia jokia jėga, praėjus šiam laiko intervalui nustatoma 1500 N apkrovos jėga, kuri turi nesikeisti per 4 s laiko, praėjus užduotam laiko intervalui nustatoma maksimali 4000 N jėga. Teoriškai duodant maksimalią apkrovą, pavara turi vartoti 5A srovę, eksperimento metu tai mes patikrinsime.

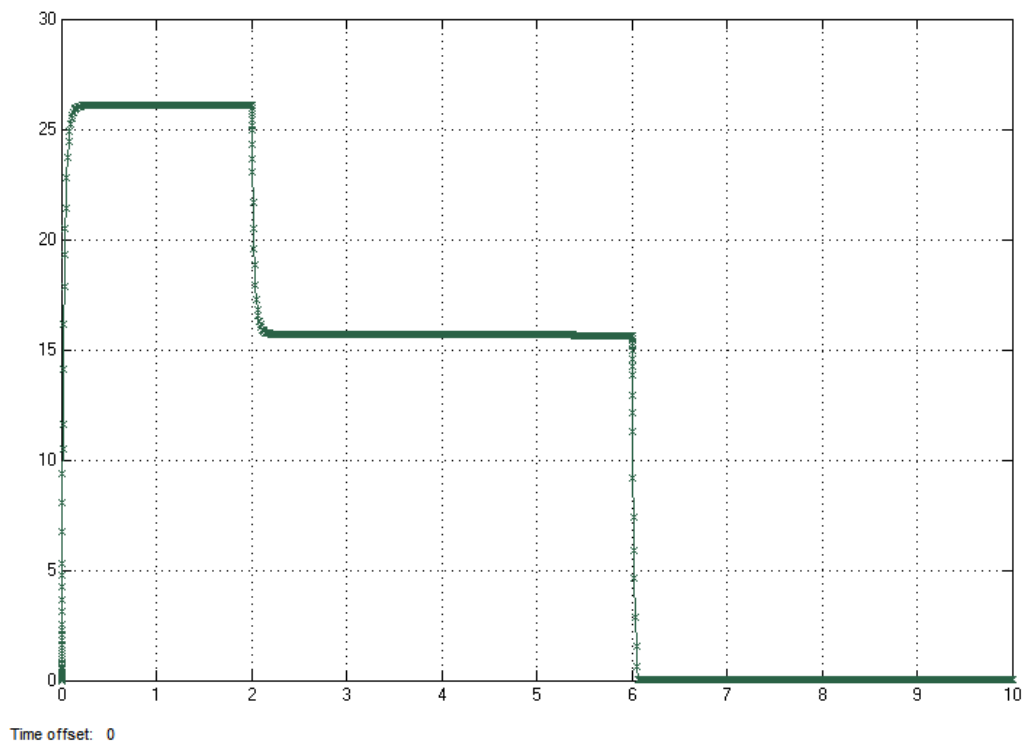


34 pav. Paleidimo momentas ir srovės nuo laiko priklausomybė veikiant apkrovoms, $t=10s$



35 pav. Elektros variklio greičio priklausomybė veikiant apkrovoms, $t=10 s$

Išsaugojus nustatytas apkrovų jėgas ir paleidus modelio simuliacijos režimą, buvo atliekami eksperimentiniai matavimai. Remiantis matavimų duomenimis matome, kad veikiant 1500 N apkrovai, elektros variklio greitis sumažėja iki 2000 aps. /min. (35 pav.), tiesiaieigės pavaros greitis sumažėja iki 16 mm / s (36 pav.). Remiantis 34 pav. duomenimis, veikiant 1500 N jėgai vartojama elektros srovė siekia 2,3 A.



36 pav. Tiesiaieigės pavaros greičio priklausomybė veikiant apkrovoms, $t=10$ s

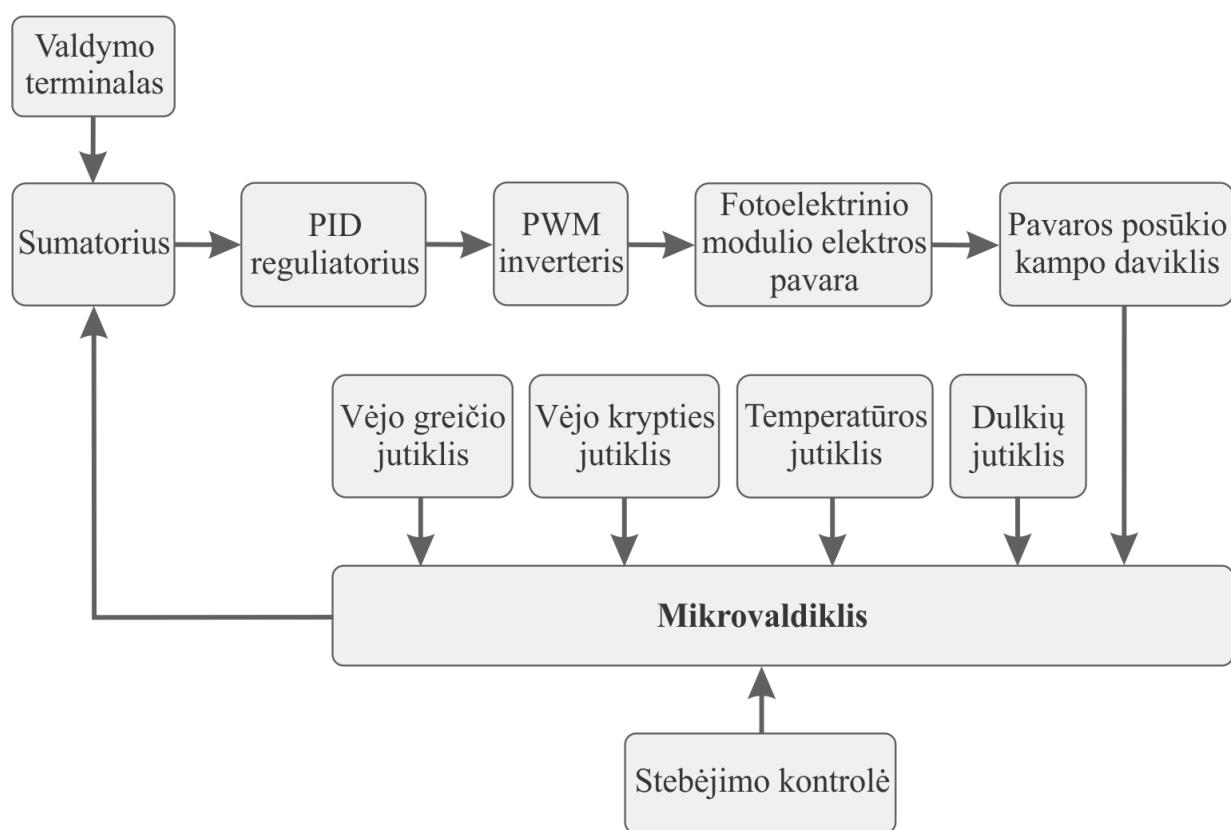
Eksperimentinių matavimų tyrimų metu tiesiaieigei pavarai buvo nustatoma maksimali 4000 N jėga, iš 35 pav. matyti, kad elektros variklis sustojo kartu su elektros pavara, 34 pav. elektros srovės matavimo rezultate matyti, kad veikiant maksimaliai apkrovai, srovė siekia 5A kaip ir numato gamintojas.

6.10. Fotoelektrinio modulio valdymo sistema

Vykdam tiriamąjį projektą pastebėta, kad taikant šiuolaikines automatizuotas valdymo technologijas, didžiosios dalies problemų galima išvengti. Sudarius sisteminį valdymo algoritmą, įmanoma išvengti stipraus vėjo daromos žalos, o patobulinus saulės sekimo valdymo sistemą formuojamais vėjo srautais galima aušinti fotoelektrinio modulio paviršių. Algoritmas turi būti su

grįžtamaisiais ryšiais, t. y., kai pašalinama viena kliūtis ar trikdys, grįžtama į pradinę padėtį. Į šį valdymo algoritmą visai nesudėtinga būtų integruoti ir automatizuotą vandens plovimo sistemą, kadangi aplinkoje esančios įvairios dulkės užteršia modulio paviršiaus plotą, o tai mažina fotoelektrinio modulio efektyvumą.

Siekiant padidinti fotoelektrinių modulių panaudojimo efektyvumą mikrotinkle, sudaryta automatinė valdymo sistema, kuri pateikiama 37 pav. Automatinė valdymo sistema sudaryta iš valdymo kontūrų. Pirmas valdymo kontūras fotoelektrinį modulį valdo elektros pavara. Šis valdymo kontūras užtikrina apytikslį orientavimą į saulės judėjimo kryptį. Siekiant išvengti fotoelektrinio modulio sugadinimo esant štorminiam vėjui, sudarytas antras valdymo kontūras, kuriuo per elektros pavarą galimas pasukimas šonu į vėjo kryptį. Dinaminėms charakteristikoms užtikrinti naudojamas PID reguliatorius.



37 pav. Fotoelektrinių modulių automatinės valdymo sistemos blokinė schema

Esant stipriam saulės apšvietimui ir aukštai aplinkos temperatūrai, fotoelektrinio modulio efektyvumas nukrenta 30%. Fotoelektrinio modulio efektyvumui pagerinti elektros pavara modulis pasukamas šonu į vėjo kryptį neatsižvelgiant į kitus poveikius valdymo sistemoms. Vėjui nurimus ir identifikavus saugų vėjo greitį, sistema fotoelektrinį modulį nukreipia į saulės judėjimo kryptį statmenai spinduliams. Sistemai identifikuojant, jog fotoelektrinio modulio paviršiaus plotas yra

didesnės ribinės temperatūros, o vėjo greitis saugus, valdymo kontūras fotoelektrinį modulį nukreipia šonu į vėjo kryptį. Temperatūrai sumažėjus iki fotoelektrinio modulio efektyvumui nepavojingos ribos, vykdomas sisteminis atstatymas ir modulis nukreipiamas į saulės judėjimo kryptį statmenai spinduliams. Tokio tipo sistemoms tikslinga naudoti stebėjimo kontrolę, kad atsiradus sisteminiams trikdžiams apie tai būtų pranešama operatoriams.

6.11. Skyriaus išvados

1. Sudarytas fotoelektrinio modulio modelis padėjo nustatyti elektros pavaros pagrindines automatinės valdymo sistemos charakteristikas. Nustatyta, kad kritinis vėjo greitis mechaniniams įtempiams siekia 15,3 m/s.
2. Matlab Simulink instrumentinėmis priemonėmis sumodeliuota tiesiaeigė sraigtinė elektros pavara. Atlikti eksperimentiniai matavimai parodė, kad apkraunant elektros pavarą statinėmis apkrovos jėgomis pereinamieji procesai vyksta milisekundžių laiko intervaluose.
3. Tiesiaeigių sraigtinių pavarų taikymas automatizuotose fotoelektriniuose moduluose, valdymo sistema galėtų spręsti staigių judesių ir pasisukimų formuojamus algoritmus.
4. Fotoelektrinių modulių automatinio valdymo sistema sudaro sąlygas gauti maksimalų elektros energijos tiekimą ir apsaugą nuo avarinių situacijų dėl didelio vėjo greičio.
5. Darbe siūlomos valdymo priemonės padidina fotoelektrinių modulių panaudojimo galimybes klimato kaitos problemoms spręsti.

7. IŠVADOS IR REZULTATAI

1. Literatūros analizės metu paaiškėjo, kad didžiausias galios efektyvumas pasiekiamas mikrotinkle, kombinuojant kelis atsinaujinančius energijos šaltinius. Kad tikslingai pasiskirstytų visi elektros energijos gamybos srautai, būtina patikima valdymo sistema, kuri prisitaikytų prie įvairių darbo režimų ir sąlygų.
2. Literatūros analizės metu paaiškėjo, kad didžiausias galios efektyvumas pasiekiamas su monokristaliniais fotoelektriniais moduliais. Tačiau dėl tiesioginio orientavimo į saulės judėjimo kryptį karštomis vasaros dienomis efektyvumas mažėja dėl viršijamos leistinos temperatūrinės ribos.
3. Efektyvesnis saulės sekimo sistemos sprendimas naudojant programuojamus loginius valdiklius, kai automatinė valdymo sistema tam tikrais valandų intervalais pakreipia fotoelektrinį modulį į saulės judėjimo kryptį.
4. Sudarytas fotoelektrinio modulio modelis padėjo nustatyti elektros pavaros pagrindines automatinės valdymo sistemos charakteristikas. Atlikus tiesiaieigės elektros pavaros eksperimentinius matavimus paaiškėjo, kad pritaikius valdymo sistemų algoritmus galima formuoti staigius fotoelektrinio modulio judesius sprendžiant stiprių vėjų ir uraganų keliamas problemas.
5. Darbe siūloma fotoelektrinių modulių valdymo sistema sudaro nepertraukiamą elektros energijos tiekimą ir apsaugą nuo avarinių situacijų dėl didelio vėjo greičio. Valdymo sistemų priemonės padidina fotoelektrinių modulių panaudojimo galimybes.

8. LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Gytis Petrauskas, Vytautas Adomavičius. (2012) Saulės energijos naudojimas elektrai gaminti. KTU leidykla "Technologija" p. 28, 29, 30.
2. Andrius Platakis. Fotovoltinių keitiklių tiekiamos energijos kokybės tyrimas ir gerinimas. Vilniaus Gedimino ir technikos universitetas. Daktaro disertacija, technologijos mokslai, 2014.
3. Saulės energijos išteklių pasiskirstymo duomenų bazė. Prieiga per internetą: <http://solargis.info/>
4. Shruti Sharma, Kamlesh Kumar Jain, Ashutosh Sharma. (2015). Solar cells: In Research and applications – A Review. Materials Sciences and Applications, 2015, 6, p. 1147-1152.
5. Zuzana Dobrotkova, AI Goodrich, Miller Mackay, Cedric Philibert, Giorgio Simbolotti, Professor Wenhua. (2012). Solar Photovoltaics. Renewable energy technologies: Cost Analysis Series. International Renewable Energy Agency. Volume 1: Power Sector, Issue 4/5. p. 4-11.
6. Dr. P. Jayakumar. (2009). Solar Energy. Resource Assessment Handbook. Asian and Pacific Centre for Transfer of Technology Of the United Nations – Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP)
7. International Energy Agency. Technology Roadmap: Solar photovoltaic Energy.
8. http://www.manoekonamai.lt/wp-content/uploads/2015/01/Alternatyvioji_energija_elektros_gamybai_Giminija.pdf
9. Vytautas Adomavičius. (2013). Mažosios atsinaujinančiųjų išteklių energijos sistemos. Lietuva: KTU leidykla „Technologija“.
10. Albertas Nargėlas. (2006). Informacinės technologijos ir elektros energetikos sistemų ateitis. Energetika. Nr. 1. 20p. ISSN: 0235-7208. Lietuvos mokslų akademijos leidykla.
11. Mehdi Dalia, Jamel Belhadj, Xavier Roboam. „Hybrid solarewind system with battery storage operating in grid-connected and standalone mode: Control and energy managementExperimental investigation“. Energy 35 (2010) 2587-2595.
12. Wei Du, Student Member, Qirong Jiang, Micah J. Erickson and Robert H. Lasseter. „Voltage-Source Control of PV Inverter in a CERTS Microgrid“. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 29, NO. 4, AUGUST 2014.
13. Salah Abdallah, Salem Nijmeh. „Two axes sun tracking system with PLC control“. Energy Conversion and Management 45 (2004) 1931-1939.
14. Solar panel in periodic flow. Prieiga per internetą: <https://www.comsol.com/model/solar-panel-in-periodic-flow-12205> [žiūrėta 2016-04-06].

15. Prieiga per internetą:
http://techno.su.lt/~sabaliauskas/atsparumas/itempiai_deformacijos.pdf
16. Apkrovos ir jų dariniai: Jūrų vėjo jėgainių projektavimas. Prieiga per internetą:
<http://www.konstruktoriu-klubas.lt/index.php/lt/pagrindinis-lt/27-lietuvi-kalba/specialieji-statiniai/100-juriniu-vejo-jegainiu-projektavimas-2-dalis> [žiūrėta 2016-04-06].
17. Molekulinė fizika. Skysčių klampumas. Prieiga per internetą:
www.fbml.ff.vu.lt/sites/default/files/I_knyga_-_5_skyrius_all_.pdf
[žiūrėta 2016-04-06].
18. Algimantas Juozas Poška, Zita Savickienė, Saulius Lisauskas. Tiesiaieigės mechatroninės sistemos. Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla (2008).
19. Pastovios srovės mašinos. Prieiga per internetą:
<http://www.esparama.lt/documents/10157/490675/Pastovios+sroves+masinos.pdf/a54d73e4-305a-4fc7-870f-98beaa8e1c9a>

Grafinės iliustracijos

20. Monokristalinio fotoelektrinio modulio iliustracija:
http://img.archiexpo.com/images_ae/photo-mg/49676-2042261.jpg
21. Polikristalinio fotoelektrinio modulio iliustracija:
http://www.webportal-solfex.co.uk/imagecache/c133305e-dd90-4c2b-9876-a50f00888728_408x800.jpg
22. Amorfinio ir mikromorfinio fotoelektrinio modulio iliustracija:
http://ample-sun.en.alibaba.com/product/448197613-212434143/100W_a_si_thin_film_solar_module_for_selling_in_China.html
23. Kadmio telūrido fotoelektrinio modulio iliustracija:
http://3.bp.blogspot.com/-2PjVbxyfDmY/U2-JkEc4ThI/AAAAAAAAAHh4/t7kOPVotF0Q/s1600/modu%25C5%2582_fotowoltaiczny_CdTe.jpg
24. CIGS vario indžio selenido fotoelektrinio modulio iliustracija
<http://www.asat.pl/solar/qcells/panel1.jpg>
25. Organinio fotoelektrinio modulio iliustracija:
http://www.homedepot.com/catalog/productImages/600/98/985eaf56-dccc-4ddf-ae3b-31b5d57df8f9_600.jpg

26. Organinio fotoelektrinio modulio panaudojimo būdas kalnuotose vietovėse:
<http://www.freshdesignpedia.com/wp-content/uploads/solar-panels-and-photovoltaic/solar-plant-and-photovoltaic-lang-stripes.jpg>
27. Organinio fotoelektrinio modulio panaudojimo būdas komerciniuose pastatuose:
http://www.pvdatabase.org/images_db/OpTIC_centre.jpg
28. Dažais įjautrinto fotoelektrinio modulio iliustracija:
<https://www.solarquotes.com.au/img/dye-sensitised-solar-panel.jpg>
29. Dažais įjautrinto fotoelektrinio modulio panaudojimo būdas komerciniuose pastatuose:
<https://juanbisquert.files.wordpress.com/2014/04/fig3.jpg?w=510>
30. Koncentruoto fotoelektrinio modulio iliustracija:
<http://gigaom2.files.wordpress.com/2011/05/amonix-project.jpg>
31. Saulės modulių optimalaus pasvirimo kampo nustatymas:
<http://www.staltika.lt/saules-energijos-sistemas/fotovoltines-elektrines/saules-elektriniu-irengimo-ypatumai-2/>
32. Tiesiaieigės sraigtinės elektros pavaros iliustracija:
<http://www.actuators-electric.co.uk/wp-content/uploads/IDM8-single.jpg>