



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS

FIZIKOS KATEDRA

Diana Naruševičiūtė

SAULĖS MODULIŲ ELEKTRINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS

THE INVESTIGATION OF ELECTRIC PROPERTIES OF SOLAR PANELS

Baigiamasis magistro darbas

Saulės elementų modulių inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621J91001

Technologijų studijų kryptis

Vilnius, 2015

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS
FIZIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)
prof. dr. Artūras Jukna
(Vardas, pavardė)

(Data)

Diana Naruševičiūtė

SAULĖS MODULIŲ ELEKTRINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS

THE INVESTIGATION OF ELECTRIC PROPERTIES OF SOLAR PANELS

Baigiamasis magistro darbas

Saulės elementų ir modulių inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas **621J91001**

Technologijų studijų kryptis

Vadovas

doc. dr. Gytis Mykolaitis

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

Andrius Stonkus

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

dr. Vaida Buivydienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2015

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų
sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo
organizavimo tvarkos aprašo 2011–2012 m. m.
1 priedas

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Diana Naruševičiūtė, 20064006

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Fundamentinių mokslų fakultetas

(Fakultetas)

Saulės elementų ir modulių inžinerija SEMIfm-13

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2015 m., birželio 2 d.
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema: „Saulės modulių elektrinių savybių tyrimas“, patvirtintas 2013 m. lapkričio 14 d. dekanų potvarkiu Nr. 376fm., yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: Andrius Stonkus VŠĮ „Perspektyvinių technologijų taikomųjų tyrimų institutas“. Mano darbo vadovas: doc. dr. Gytis Mykolaitis.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjusi.

(Parašas)

Diana Naruševičiūtė

(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Fundamentinių mokslų fakultetas

Fizikos katedra

ISBN ISSN

Egz. sk.

Data-....-....

Saulės elementų ir modulių inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Saulės modulių elektrinių savybių tyrimas**

Autorius **Diana Naruševičiūtė**

Vadovas doc. dr. **Gytis Mykolaitis**

Kalba

☒ X

lietuvių

☐ užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe analizuojamos saulės modulių elektrinės savybės, elektrinių charakteristikų degradacija ir modulių degradacijos priežastys.

Pirmoje dalyje atlikta mokslinės literatūros analizė, aprėpianti saulės elemento ir modulio elektrinius parametrus. Išnagrinėta fotolektrinių modulių degradacija, nustatyti pagrindiniai degradacijos tipai.

Remiantis išanalizuota mokslinė literatūra, antroje dalyje parengta matavimo metodika.

Trečiojoje dalyje atlikti saulės modulių voltamperinių charakteristikų matavimai standartinėmis testavimo sąlygomis ir esant vidutinėms ir žemoms apšvietoms, šlapio modulio izoliacijos varžos matavimai ir nustatyti modulių defektai.

Išnagrinėjus teorinius ir praktinius fotolektrinių modulių elektrinių parametrų degradacijos aspektus, pateikiamos baigiamojo darbo išvados ir rekomendacijos.

Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, saulės elemento ir fotolektrinio modulio elektrinių parametrų ir jų degradavimo analizė, matavimo metodika, eksperimentinė dalis, išvados ir rekomendacijos bei literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 64 p. teksto be priedų, 38 pav., 7 lent., 35 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: saulės elementas, saulės moduliai, elektriniai parametrai, degradacija.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Fundamental Sciences
Department of Physics

ISBN ISSN
Egz. sk.
Date-....-....

Solar cell and module engineering study programme master thesis

Title: **The investigation of electric properties of solar panels**

Language

☐

Lithuanian

☒

English

Annotation

Master thesis analyses the electrical properties of solar panels, degradation of electrical characteristics and causes of photovoltaic modules degradation.

In Chapter 1 is given analysis of solar cell and photovoltaic module electrical properties. Also, degradation of photovoltaic modules and types of degradation are investigated. Based on the analysis of the theoretical overview, in Chapter 2 the measurement techniques are prepared.

In Chapter 3 power measurement of solar modules at Standard Testing Conditions and low irradiance are performed. Also, wet leakage current test is carried out. Photovoltaic modules defects are indentified by electroluminescence measurement.

In Chapter 4 conclusions and recommendations are given after theoretical and practical analyses.

The Master work consists of 6 parts: introduction, the investigation of electric properties of solar cell and photovoltaic module and their degradation theoretical overview, testing methodology, experimental part, conclusions and suggestions, references.

Thesis consist of: 64 p. text without appendixes, 38 pictures, 7 tables, 35 bibliographical entries.

Keywords: solar cell, photovoltaic modules, electrical properties, degradation.

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS
FIZIKOS KATEDRA

Technologijų studijų kryptis

Saulės elementų ir modulių inžinerijos studijų programa,

valstybinis kodas 621J91001

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

prof. dr. Artūras Jukna

(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....Nr.
Vilnius

Studentei Dianai Naruševičiūtei

Baigiamojo darbo tema: „Saulės modulių elektrinių savybių tyrimas“.

patvirtinta 2013 m. lapkričio 14 d. dekanu potvarkiu Nr. 376fm.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2015 m. birželio 1 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

1. Išanalizuoti saulės modulių elektrinius parametrus ir jų degradaciją.
2. Parengti matavimo metodiką, padėsiančią išmatuoti saulės modulių voltamperines charakteristikas standartinėmis testavimo sąlygomis ir esant vidutinėms bei žemoms apšvietoms, nustatyti modulių izoliacijos varžas ir aptikti modulių defektus.
3. Atlikti matavimus.
4. Palyginti gautų matavimų rezultatus ir pasiūlyti saulės modulių degradavimo mažinimo sprendimus.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantas: Andrius Stonkus, VŠĮ „Perspektyvinių technologijų taikomųjų tyrimų institutas“.

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas
(Parašas)

doc. dr. Gytis Mykolaitis
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau:

.....
(Parašas)

Diana Naruševičiūtė

(Vardas, pavardė)

2013-11-22

(Data)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS
FIZIKOS KATEDRA

Technologijų studijų kryptis

Saulės elementų ir modulių inžinerijos studijų programa,

valstybinis kodas **621J91001**

PAŽYMA
APIE BAIGIAMĄJĮ MAGISTRO DARBĄ
.....Nr.
Vilnius

Studentė **Diana Naruševičiūtė**

Studentės studijų svertinis įvertinimų vidurkis.....balo.

Baigiamojo darbo tema: **Saulės modulių elektrinių savybių tyrimas.**

Katedros vedėjas

.....
(Parašas)

prof. dr. Artūras Jukna
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

VADOVO ATSLIEPIMAS
APIE BAIGIAMĄJĮ MAGISTRO DARBĄ

Magistrantė Diana Naruševičiūtė užsirekomendavo kaip stropi ir pareiginga studentė. Ji pati rodė iniciatyvą, buvo pakankamai savarankiška. Atlikta išsami literatūros apžvalga, mokslinių šaltinių parinkimas ir citavimas atitinka tokio pobūdžio darbams keliamus reikalavimus. Mokslinio tyrimo dalies lentelės, grafikai ir nuotraukos yra originalios ir atliktos preciziškai. Darbo kalba pakankamai sklandi ir aiški. Baigiamojo darbo užduotys atliktos pilnai. Suformuluotos darbo rezultatus atitinkančios išvados. Siūlau Dianos Naruševičiūtės baigiamąjį magistro darbą vertinti “puikiai” (10 balų).

Vadovas

.....
(Parašas)

doc. dr. Gytis Mykolaitis
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

TURINYS

IVADAS	13
1. Literatūros apžvalga.....	16
1.1. Saulės elemento elektriniai parametrai	16
1.1.1. Saulės elemento veikimas	16
1.1.2. Saulės elemento modeliai ir jų elektriniai parametrai	17
1.2. Fotoelektrinio modulio elektriniai parametrai	22
1.3. Saulės elemento ir fotoelektrinio modulio parametrų kitimą realiomis sąlygomis lemiantys veiksniai	28
1.4. Fotoelektrinių modulių degradacija	29
1.4.1. Pagrindiniai fotoelektrinių modulių degradacijos tipai	30
1.4.1.1. Fotoelektrinių modulių korozija	31
1.4.1.2. Fotoelektrinių modulių atsisluoskniavimai.....	31
1.4.1.3. Fotoelektrinių modulių spalvos pakitimai	32
1.4.1.4. Fotoelektrinių modulių lūžiai ir įtrūkimai	33
2. Fotoelektrinių modulių matavimo metodika ir aparatūra	33
2.1. Vizualinė patikra.....	33
2.2. Maksimalios galios nustatymas standartinėmis testavimo sąlygomis	34
2.3. Modulių veikimas esant vidutinėms ir žemoms apšvietoms	36
2.4. Elektroluminescencijos spektrų registravimas.....	36
2.5. Šlapio modulio srovės nuotekio testas.....	37
3. Fotoelektrinių modulių elektrinių parametrų tyrimas	38
3.1. Maksimalios galios tyrimas 2013 m. spalio-lapkričio mėn.	38
3.2. Elektroluminescencijos tyrimas 2013 m. spalio-lapkričio mėn.	40
3.3. Maksimalios galios tyrimas standartinėmis testavimo sąlygomis ir esant skirtingoms apšvietoms 2014 m. gegužės-spalio mėn.	44
3.4. Elektroluminescencijos tyrimas 2014 m. gegužės-spalio mėn.	49
3.5. Šlapio modulio srovės nuotekio testas 2014 m. gegužės-spalio mėn.	54
3.6. Išmatuotų modulių maksimalios galios palyginimas	55
IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS	59
LITERATŪROS SĄRAŠAS	62

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Šviesos poveikis saulės elemento voltamperinės charakteristikos kreivei (IV Curve, 2014).	17
2 pav. Saulės elemento voltamperinių charakteristikų priklausomybė nuo apšvietos.....	18
3 pav. Temperatūros įtaka saulės elemento voltamperinėms charakteristikoms	19
4 pav. Dviejų diodų ekvivalentinė elektrinė schema (Wolf, 2013)	20
5 pav. Vieno diodo ekvivalentinė elektrinė schema (Wolf, 2013)	21
6 pav. Fotoelektrinio modulio voltamperinės ir voltvatinės charakteristikos, P_{max} – maksimali galia, I_{SC} – trumpojo jungimo srovė, U_{OC} - atvirosios grandinės įtampa, P_{MP} – maksimalios galios taškas, I_{MP} – srovė maksimalios galios taške, U_{MP} – įtampa maksimalios galios taške.....	23
7 pav. Temperatūros įtaka fotoelektrinio modulio voltamperinėms charakteristikoms	27
8 pav. Fotoelektrinio modulio voltamperinių charakteristikų priklausomybė nuo apšvietos.....	28
9 pav. Saulės imitatoriaus tunelio schema su nuolydžio kampu	35
10 pav. Saulės imitatoriaus principinė veikimo schema.....	35
11 pav. Elektroluminescencijos kontrolės sistema.....	37
12 pav. Šlapio modulio izoliacijos varžos matavimo sistema.....	38
13 pav. Deklaruotų ir išmatuotų modulių elektrinių parametų skirtumų analizė.....	40
14 pav. Lūžiai (13, 46) modulyje Nr. 6	41
15 pav. Lūžis (48), metalizacijos (6), priemaišų (2, 3, 14, 21, 23, 27, 28, 41, 45, 46, 47) defektai modulyje Nr. 9.....	41
16 pav. Lūžis (29), priemaišų defektas (50) modulyje Nr. 10	42
17 pav. Metalizacijos defektai (24, 26, 27, 52, 53, 54, 56) modulyje Nr. 3	43
18 pav. Priemaišų defektai (14, 15, 16, 19, 39) modulyje Nr. 5.....	43
19 pav. 2014 m. išmatuotų modulių elektrinių parametų skirtumų analizė	45
20 pav. Modulio Nr. 10 voltamperinės charakteristikos	46
21 pav. Modulio Nr. 10 voltvatinės charakteristikos.....	46
22 pav. Modulio Nr. 10 voltamperinės charakteristikos esant skirtingoms apšvietoms	46
23 pav. Modulio Nr. 10 voltvatinės charakteristikos esant skirtingoms apšvietoms	47
24 pav. Modulio Nr. 10 galios priklausomybė nuo apšvietos	47
25 pav. Modulių maksimalios galios P_{max} , užpildos faktoriaus FF ir nuosekliosios varžos R_s pokyčių analizė.....	48
26 pav. Modulių lygiagrečiosios varžos R_{sh} priklausomybė nuo apšvietos.....	49
27 pav. Mikroįtrūkiai (3), priemaišų defektai (23, 53) modulyje Nr. 1	50
28 pav. Metalizacijos defektai (17, 21, 22, 45, 46, 47) modulyje Nr. 2	50

29 pav. Metalizacijos defektai (7, 24, 26, 27, 29, 30, 51, 52, 53, 54, 56) modulyje Nr. 3	51
30 pav. Lūžis (35), mikroįtrūkiai (18, 26, 33) modulyje Nr. 4.....	51
31 pav. Priemaišų defektai (14, 15, 16, 19, 23, 31, 39) modulyje Nr. 5.....	52
32 pav. Lūžiai (13, 33, 46) modulyje Nr. 6	52
33 pav. Lūžis (42) modulyje Nr. 8.....	53
34 pav. Lūžis (48), metalizacijos (6), priemaišų (2, 3, 14, 21, 23, 27, 28, 41, 45, 46, 47) defektai modulyje Nr. 9.....	53
35 pav. Lūžis (29), priemaišų defektas (50) modulyje Nr. 10	54
36 pav. Modulių Nr. 1, Nr. 2 ir Nr. 3 galios kitimas nuo 2012 m. iki 2014 m.....	57
37 pav. Modulių Nr. 4, Nr. 5, Nr. 6, Nr. 7 ir Nr. 8 galios kitimas nuo 2012 m. iki 2014 m.	58
38 pav. Modulių Nr. 9 ir Nr. 10 galios kitimas nuo 2012 m. iki 2014 m.	58

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Saulės imitatoriaus klasės (IEC 60904-9, 2007).....	34
2 lentelė. 2013 m. išmatuotų modulių elektrinių parametrų skirtumų analizė procentais	39
3 lentelė. 2014 m. išmatuotų modulių elektrinių parametrų skirtumų analizė procentais	44
4 lentelė. Šlapio modulio izoliacijos varžos matavimo rezultatai	54
5 lentelė. Deklaruotų ir 2013 m. išmatuotų modulių galios pokyčių analizė	55
6 lentelė. 2013 m. ir 2014 m. išmatuotų modulių galios pokyčių analizė	56
7 lentelė. Deklaruotų ir 2014 m. išmatuotų modulių galios pokyčių analizė	57

SANTRUMPOS

AM – atmosferos oro masė (*angl. air mass*)

EVA – etileno – vinilacetatas

FF – užpildos faktorius

G – apšvieta

IEC – Europos standartizacijos komitetas (*angl. International Electrotechnical Commission*)

I_{MP} – srovė maksimalios galios taške

I_{SC} – trumpojo jungimo srovė

LEEE-TISO – Energetikos, Ekologijos ir ekonomikos saulės ticino laboratorija (*angl. Laboratory of Energy, Ecology and Economy Solar-Ticino*)

NIST – Nacionalinis standartų ir technologijos institutas (*angl. National Institute of Standards and Technology*)

NOCT – nominalios elementų darbo temperatūros nustatymas (*angl. Nominal operating cell temperature*)

NREL – Nacionalinė atsinaujinančios energetikos laboratorija (*angl. National Renewable Energy Laboratory*)

P_{max} – galia maksimalios galios taške

PVB – polivinilbutiralis

R_s – nuosekioji varža

R_{sh} – lygiagrečioji varža

STC – standartinės testavimo sąlygos (*angl. Standard Testing Conditions*)

U_{MP} – įtampa maksimalios galios taške

U_{OC} – atvirosios grandinės įtampa

UV – ultravioletiniai spinduliai

IVADAS

Pasaulinio atšilimo grėsmė ir anglies kuro deginimo mastai didina poreikį vis plačiau naudoti atsinaujinančius energijos šaltinius. Saulės energijos naudojimas yra vienas iš būdų patenkinti elektros energijos poreikius ir mažinti brangstančio iškastinio kuro naudojimą bei aplinkos taršą. Plečiant saulės energetiką mažinamas energetinių žaliavų importas. Mažėja energetinė priklausomybė, didėja gyventojų užimtumas, kuriamos naujos darbo vietos. Fotoelektros pramonė siejama ir su naujų ekologiškai švarių energijos gamybos technologijų kūrimu bei tobulinimu. Nors saulės energija pagal instaliuotą galią yra trečias labiausiai naudojamas atsinaujinantis energijos šaltinis po hidroelektrinės ir vėjo energijos, tačiau didėjant konkurencingumui fotoelektros pramonė tampa viena iš sparčiausiai besivystančių aukštųjų technologijų sričių atsinaujinančios energijos sektoriuje.

Šiuo metu fotoelektros technologijų sektoriuje daugiausia dėmesio skiriama ne tik mažinti kainas ir pasiekti didesnį fotoelektrinių modulių efektyvumą, bet ir tuo pačiu tobulinti pačių modulių patikimumą, bei ilginti jų tarnavimo laiką. Esant dideliame energijos poreikiui fotoelektrinė sistema yra veiksminga tik tuomet, jei instaliuotos saulės jėgainės yra optimizuotos ir gerai prižiūrimos. Tikslingas fotoelektrinių modulių degradavimo priežasčių nustatymas tampa svarbiu tyrimu. Be to, saulės jėgainių savininkai bei būsimi investuotojai reikalauja tikslios informacijos apie fotoelektrinių modulių patikimumą bei veikimo laiką. Saulės elektrinių nuolatinė priežiūra ir testavimas yra itin svarbu, nes dėl modulių degradacijos atsiranda galios nuostoliai, o tai lemia investicijų grąžos sulėtėjimą. Tikslios informacijos trūkumas apie modulių elektrinių parametrų degradaciją didina finansinę riziką. Taigi būtina gerai žinoti ir suprasti fotoelektrinių modulių elektrines charakteristikas, ištirti jų degradavimą, bei įvertinti modulių patikimumą ir tarnavimo laiką. Visi šie faktoriai ir nulemia instaliuotų saulės jėgainių efektyvumą.

Problematika

Pagrindinė problema, sprendžiama baigiamajame darbe, – fotoelektrinių modulių elektrinių charakteristikų degradacija, mažinanti saulės jėgainių efektyvų veikimą ir pačių modulių veikimo laiką.

Baigiamojo darbo aktualumas

Šiuo metu Lietuvoje instaliuota virš 1850 saulės jėgainių. Jų tarnavimo laikas turėtų būti apie 20 – 25 metus. Saulės energijos specialistai skaičiuoja, kad, naudojant pažangias technologijas, įrengta ir į skirstomąjį tinklą įjungta jėgainė per 5 – 7 metus ne tik atsipirks, bet ir duos pelno. Deja, praktiškai pasitaiko nemažai atvejų, kai saulės elektrinės nebegeneruoja planuoto energijos kiekio.

Tai sukelia grėsmę jėgainių savininkų investicijų grąžai. Saulės jėgainių galios mažėjimas gali priklausyti nuo nekokybiškai pagamintų saulės elementų ir fotoelektrinių modulių, jų transportavimo, instaliavimo ir eksploatavimo sąlygų bei darbų atlikimo kokybės.

Baigiamojo darbo objektas – saulės modulių elektrinės charakteristikos.

Baigiamojo darbo tikslas – remiantis išmatuotų saulės modulių elektrinių parametrų testavimo ir analizės rezultatais, ištirti elektrinių charakteristikų degradaciją per metus ir pusę metų, nustatyti ir įvertinti modulių degradacijos priežastis.

Baigiamojo darbo tikslui pasiekti keliami uždaviniai

1. Išanalizuoti saulės elemento ir modulio elektrines charakteristikas.
2. Ištirti saulės modulio elektrinių charakteristikų degradaciją.
3. Parengti matavimo metodiką ir susipažinti su matavimo aparatūra.
4. Nustatyti fotoelektrinių modulių maksimalią galią standartinėmis testavimo sąlygomis, matuojant voltamperines charakteristikas saulės imitatoriumi, tirti modulių veikimą esant vidutinėms ir žemoms apšvietoms, atlikti modulių defektų paiešką elektroluminescencijos kontrolės sistema, atlikti šlapio modulio srovės nuotekio testą, matuojant modulių izoliacijos varžą.
5. Palyginti gautų matavimų ir eksperimentinių tyrimų rezultatus.
6. Pasiūlyti saulės modulių degradavimo mažinimo sprendimus.

Tyrimo metodai

Siekiant ištirti fotoelektrinių modulių elektrinių parametrų degradaciją, baigiamajame darbe naudojami teoriniai ir empiriniai tyrimo metodai.

- Mokslinės literatūros apžvalga – saulės elementų ir modulių elektrinių parametrų ir jų savybių degradavimo analizė. Išanalizuoti moksliniai straipsniai, publikacijos, konferencijų pranešimai, fotoelektrinių modulių testavimo standartai, oficiali fotoelektros sektoriaus statistika, metodikos, internetinė informacija ir kt.
- Eksperimentiniai tyrimai – matavimai, atlikti remiantis Europos standartizacijos komiteto (IEC, angl. *International Electrotechnical Commission*) patvirtintu “Antžeminių fotovoltinių (PV) modulių iš kristalinio silicio. Projektavimo įvertinimo ir tipo patvirtinimo IEC 61215:2005” standartu ir modulių defektų paieškos sistema (modulių maksimalios galios nustatymas standartinėmis testavimo sąlygomis, modulių veikimo esant vidutinėms ir žemoms apšvietoms, modulių defektų paieškos ir šlapio modulio srovės nuotekio tyrimai, naudojant saulės imitatorių “Pasan SunSim AAA+”, elektroluminescencijos kontrolės ir izoliacijos varžos matavimo sistemas).

Baigiamojo darbo mokslinis naujumas

Fotoelektros pramonėje moduliai testuojami remiantis IEC 61215:2005 standartu. Kadangi Lietuvoje vis dar nėra akredituotos laboratorijos, galinčios teikti sertifikuotas testavimo paslaugas, todėl privalu periodiškai stebėti Lietuvoje instaliuotų modulių, veikiančių saulės jėgainėse, elektrinių parametrų pokyčius ir tirti jų degradaciją per metus ar pusę metų. Svarbiausias uždavinys nustatyti, kaip kinta instaliuotų modulių elektrinės charakteristikos, remiantis tarptautiniame IEC 61215:2005 standarte aprašytais matavimo procedūromis.

Asmeninis autorės indėlis

Baigiamojo darbo autorė taikomųjų tyrimų laboratorijoje „ProtechLab“ atliko fotoelektrinių modulių voltamperinių charakteristikų matavimus standartinėmis testavimo sąlygomis, elektroliuminescencijos spektrų registravimo matavimus, šlapio modulio srovės nuotekio testus ir tyrė modulių veikimą esant vidutinėms ir žemoms apšvietoms.

Baigiamajame darbe numatyti ir gauti rezultatai – nustatytos pagrindinės priežastys, lemiančios fotoelektrinių modulių maksimalios galios mažėjimą ir pateikti pasiūlymai, padėsiantys išvengti defektų, atsirandančių moduluose, ir prailginti modulių veikimo laiką.

Baigiamojo darbo struktūra

Darbą sudaro įvadas, literatūros apžvalga, matavimo metodika, tyrimo rezultatai, išvados ir rekomendacijos, bei naudotas literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 64 puslapiai, jame yra 7 lentelės ir 38 paveikslai. Bibliografinį aprašą sudaro 35 šaltiniai.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Saulės elemento elektriniai parametrai

Tikslus elektros energijos gamybos našumo prognozavimas gali pagerinti saulės jėgainių veikimo efektyvumą (Bai, 2014). Projektuotojai gali prognozuoti skirtingų tipų modulių gaminamos energijos kiekius, o inžinieriai optimizuoti fotoelektrinės sistemos veikimą, imituojant galios atidavimą iš saulės jėgainės aplinkos sąlygomis. Kadangi fotoelektrinių modulių gamintojų deklaruoti ir pateikti modulių elektriniai parametrai, išmatuoti standartinėmis testavimo sąlygomis (esant 1000 W/m^2 spektriniam srauto tankiui, 25°C modulio paviršiaus temperatūrai ir AM 1,5 spektrui), paprastai skiriasi nuo modulių elektrinių charakteristikų, išmatuotų aplinkos sąlygomis, tikslus ir patikimas fotoelektrinio modulio galios apskaičiavimo modelis būtinas. Modelis su gamintojo pateiktais duomenimis ir aplinkos parametrais naudojamas imituoti kristalinio silicio saulės elemento bei fotoelektrinio modulio voltamperines charakteristikas aplinkos sąlygomis. Plačiai naudojami voltamperinės charakteristikos kreivės prognozavimo metodai, tokie kaip dviejų diodų su septyniais parametrais, vieno diodo su keturiais arba penkiais parametrais, randami mokslinėje literatūroje (Ma, 2014).

1.1.1. Saulės elemento veikimas

Norint suprasti saulės elemento veikimą, svarbu žinoti jo medžiagos savybes ir kritusios šviesos parametrus. Saulės elementas, sudarytas iš p tipo ir n tipo silicio, efektyviai sugeria ir konvertuoja šviesos energiją į nuolatinės srovės elektros energiją. Elektromagnetinio lauko kvantai – fotonai, turintys energijos daugiau nei puslaidininkio draustinės juostos plotis, dalyvauja energijos virsmų procese, tai yra gali sukurti elektronų ir skylių poras. Dėl šios priežasties saulės šviesos spektrinė sudėtis yra svarbus faktorius, lemiantis efektyvaus saulės elemento konstrukcines medžiagas. Fotono energija apskaičiuojama pagal formulę:

$$E_{\lambda} = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1)$$

čia: E_{λ} – fotono energija (J), h – Planko konstanta ($6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$), c – šviesos greitis ($3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$), λ – fotono bangos ilgis (m). Kada saulės šviesa (fotonai) pasiekia saulės elementą, elektronai sužadunami į laidumo juostą puslaidininko medžiagoje. Sugerto šviesos fotono energija perduodama krūvių nešėjams – elektronams ir skylutėms. Vidinį elektrinį lauką sukuria p - n sandūra. Atsiradusi papildoma krūvininkų pora, susilpnina vidinį elektrinį lauką dėl lauko ekranavimo reiškinių. Vidinis elektrinis laukas atskiria teigiamai įelektrintas skylutes nuo neigiamai įelektrintų elektronų saulės

elemente. Nors skylutės, esančios p srityje, ir elektronai - n srityje traukia vienas kitą, dauguma iš jų gali rekombinuotis tiksliai kertant išorinę grandinę dėl vidinės potencinės energijos barjero. Grandinėje srovė tekės tuomet, kai saulės elementas bus apšviestas ir prie jo bus prijungta apkrova (Meral, 2011).

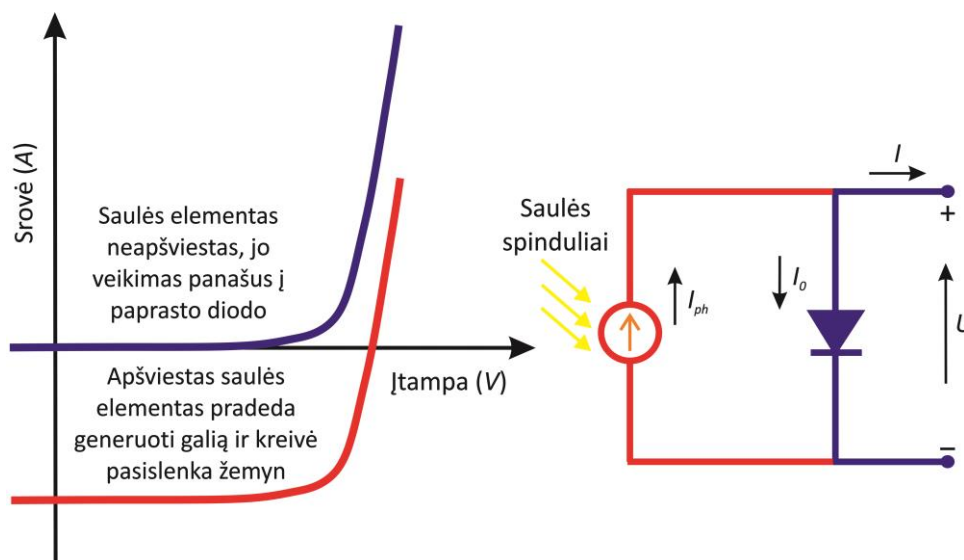
1.1.2. Saulės elemento modeliai ir jų elektriniai parametrai

Paprasčiausias saulės elemento modelis susideda iš elektros srovės šaltinio ir lygiagrečiai sujungto diodo. Kai saulės elementas neapšviestas, jo veikimas panašus į paprasto diodo ir aprašomas Šoklio lygtimi:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (2)$$

čia: I – srovė tekanti per diodą (A), I_0 – diodo atgalinė soties srovė (A), q – elektrono krūvis ($1,381 \cdot 10^{-19}$ C), U – diode krentanti įtampa (V), k – Bolcmano konstanta ($1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K), T – sandūros temperatūra (K), n – diodo idealumo faktorius, apibūdinantis nukrypimą nuo idealios diodo charakteristikos. Idealumo faktorius n svyruoja nuo 1 iki 2 (tam tikrais atvejais gali būti ir didesnis), priklauso nuo gamybos proceso ir puslaidininkio medžiagos. Dažniausiai priimta laikyti, kad n apytiksliai lygus 1.

Apšvietus elementą (1 pav.), srovės šaltinis kuria fotosužadintų krūvininkų sugeneruotą srovę, lygią trumpojo jungimo srovei ($I_{ph}=I_{SC}$), kuri nustatoma jungiant teigiamą ir neigiamą elemento kontaktus, tai yra užtrumpinant elektrodų kontaktus ir gaunant įtampos vertę lygią nuliui (Ciulla, 2014).



1 pav. Šviesos poveikis saulės elemento voltamperinės charakteristikos kreivei (IV Curve, 2014)

Paprastai trumpojo jungimo srovė priklauso nuo saulės elemento paviršiaus ploto, fotonų skaičiaus (nuo saulės apšvietos intensyvumo), krentančios šviesos bangos ilgio, medžiagos optinių savybių (sugerties ir atspindžio koeficientų), krūvininkų gyvavimo trukmės. Kai elementas neprijungtas, kontaktai lieka atviri. Išmatavus įtampą tarp kontaktų, gaunama atvirosios grandinės įtampa, kai srovė lygi nuliui. Atvirosios grandinės įtampa paprastai priklauso nuo medžiagos draustinės juostos tarpo, saulės elemento diodo atgalinės soties srovės ir srovės, tekančios apšvietus elementą. Soties srovė atsiranda dėl pavienių krūvininkų, kurie atsitiktinai generuojami nuskurdintajame sluoksnyje. Taip pat didėjant temperatūrai, elemento įtampa krenta palaipsniui (Singh, 2013). Saulės elemento voltamperinė charakteristika aprašoma formule, nusakančia srovės ir įtampos sąryšį:

$$I = I_{ph} - I_0 = I_{SC} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (3)$$

čia: I – elementu tekanti srovė (A), I_{ph} – šviesos sugeneruota srovė (A), I_{SC} – trumpojo jungimo srovė, lygi fotonų sugeneruotai elektros srovei (A), I_0 – diodo atgalinė soties srovė, kuri esant pastoviai temperatūrai nekintantis dydis (A), U – elemento įtampa (V) (Wolf, 2013). Remiantis šiuo matematiniu modeliu išvedami pagrindiniai saulės elementą apibūdinantys parametrai: trumpojo jungimo srovė ir atvirosios grandinės įtampa:

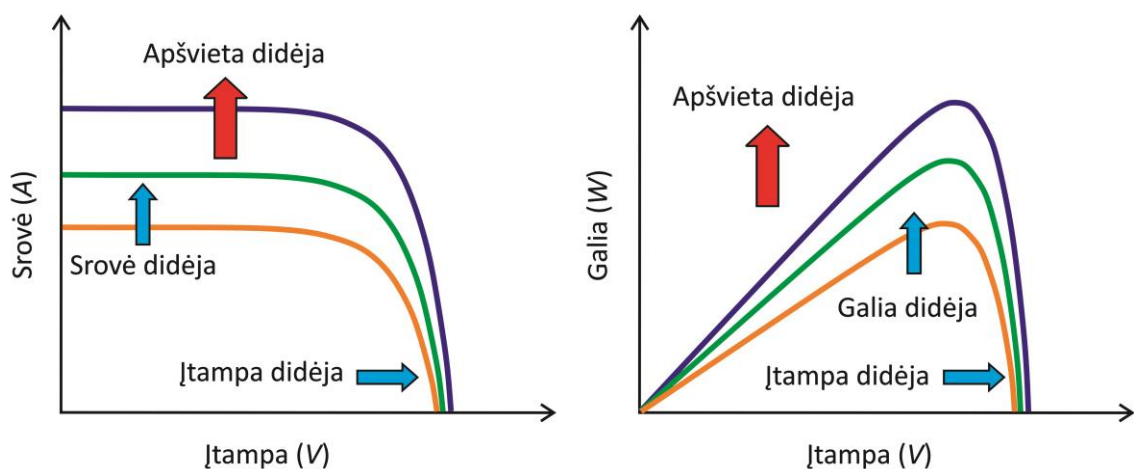
- Esant trumpojo jungimo sąlygomis: $U=0, I=I_{SC}$:

$$I_{SC} = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (4)$$

- Esant atvirosios grandinės sąlygomis: $I=0, U=U_{OC}$:

$$U_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right), \quad (5)$$

Didėjant apšvietai, didėja ir saulės elemento įtampa bei srovė (2 pav.).



2 pav. Saulės elemento voltamperinių charakteristikų priklausomybė nuo apšvietos

Tai lemia generuojamos galios, priklausančios nuo krentančios saulės šviesos ant elemento paviršiaus ir elemento temperatūros, didėjimą (Singh, 2013; Ma, 2014).

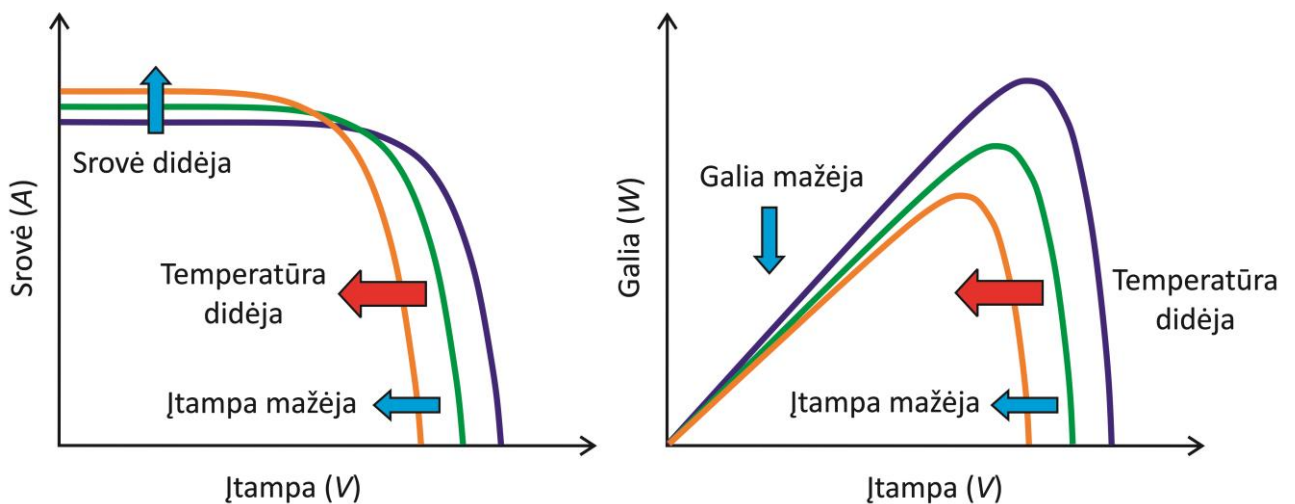
Galios priklausomybė nuo srovės ir įtampos apskaičiuojama:

$$P_{\max} = I_{MP}U_{MP} = I_{SC}U_{OC}FF, \quad (6)$$

čia: $P_{\max}$ – maksimali saulės elemento galia (W), I_{MP} – srovė maksimalios galios taške (A), U_{MP} – įtampa maksimalios galios taške (V), U_{OC} – atvirosios grandinės įtampa (V), FF – užpildos faktorius (%). FF parametras, apibūdinantis maksimalią generuojamą galią, išreiškiamas:

$$FF = \frac{I_{MP}U_{MP}}{I_{SC}U_{OC}}, \quad (7)$$

Saulės elemento veikimas itin priklauso nuo temperatūros (Skoplaki, 2009), kurią įtakoja saulės apšvieta, aplinkos temperatūra ir vėjo greitis (Bai, 2014). Didėjant temperatūrai (3 pav.), nežymiai didėja generuojama srovė, bet atsiradusi rekombinacija, mažina saulės elemento įtampą bei galią.



3 pav. Temperatūros įtaka saulės elemento voltamperinėms charakteristikoms

Taigi dominuojantis poveikis saulės elementų veikime yra aplinkos temperatūros ir rekombinacijos rezultatas, mažinantis elemento efektyvumą (Skoplaki, 2009), kurio koeficientas gali būti apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\eta_{cell} = \frac{P_{\max}}{P_0} = \frac{I_{SC}U_{OC}FF}{P_0}, \quad (8)$$

čia: η_{cell} – elemento efektyvumo koeficientas, P_0 – saulės elemento paviršiaus plotui tenkanti šviesos energija (W).

Norint tiksliai nustatyti saulės elementų temperatūrą, moduliui veikiant standartinėmis testavimo sąlygomis, naudojamas nominalios elementų darbo temperatūros nustatymo (NOCT,

angl. *Nominal operating cell temperature*) metodas, esant 800 W/m^2 apšvietai, 20°C aplinkos temperatūrai, 1 m/s vėjo greičiui, 45° polinkio kampui į horizontą (LST EN 61215, 2005). Įvertinant šių parametų įtaką elementui, galima apskaičiuoti darbinę elemento temperatūrą (Luque, 2003):

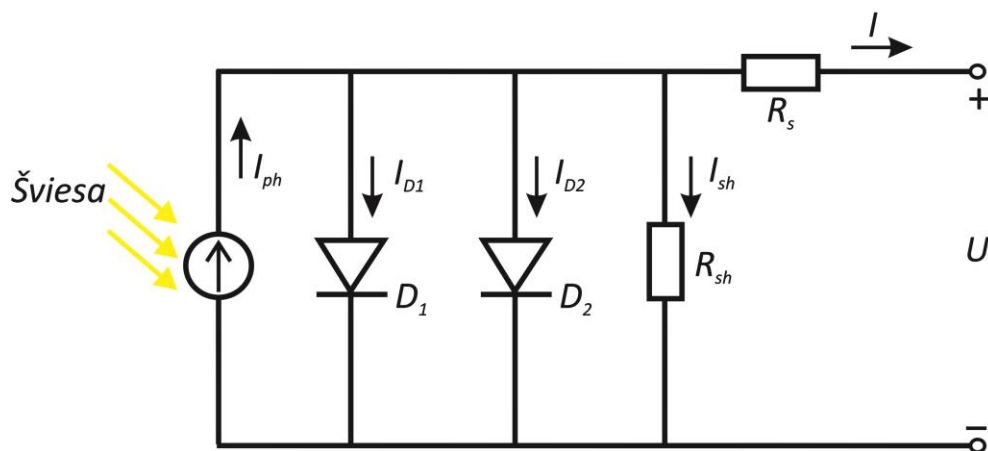
$$T_{\text{cell}} = T_{\text{ambient}} + G \frac{\text{NOCT} - 20^\circ\text{C}}{800 \text{ Wm}^{-2}}, \quad (9)$$

čia: T_{cell} – saulės elemento temperatūra ($^\circ\text{C}$), T_{ambient} – aplinkos temperatūra ($^\circ\text{C}$), G – apšvieta (W/m^2).

Paprasčiausias saulės elemento modelis neapibūdina visų veiksnių, lemiančių elemento našumą. Šiam tikslui naudojami tikslesni modeliai. Mokslinėje literatūroje autoriai plačiai aprašo vieno ir dviejų diodų modelius. Nors pačiu tiksliausiu modeliu laikomas dviejų diodų modelis (4 pav.), sudarytas iš ekvivalentinės grandinės su dviem diodais, tačiau šis modelis gana sudėtingas ir reikalaujantis daug laiko skaičiavimams, nes sprendžiama dviejų eksponentinių narių lygtis su septyniais nežinomais parametrais: I_{ph} , I_{01} , n_1 , I_{02} , n_2 , R_s , R_{sh} (Ma, 2014). Modelis aprašomas formule:

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} = I_{ph} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_s)}{n_1 kT} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_s)}{n_2 kT} \right) - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}}, \quad (10)$$

čia: I_{01} – pirmojo diodo difuzijos soties srovė (A), n_1 – pirmojo (difuzijos) diodo idealumo faktorius, R_s – nuosekioji varža (Ω), I_{02} – antrojo diodo rekombinacijos soties srovė (A), n_2 – antrojo (rekombinacijos) diodo idealumo faktorius, R_{sh} – lygiagrečioji varža (Ω). Lyginant su vieno diodo modeliu, dviejų diodų modelis tiksliau apibūdina p - n sandūrą ir atsižvelgia į nuosekliosios ir lygiagrečiosios varžų poveikius. Be to, šio modelio pirmasis diodas apibūdina krūvininkų (elektronų ir skylių) difuzijos procesą, o antrasis diodas krūvininkų rekombinaciją. Kiekvienas diodas charakterizuojamas skirtinga elektros varža ir įtampos kritimu (Di Vincenzo, 2013).

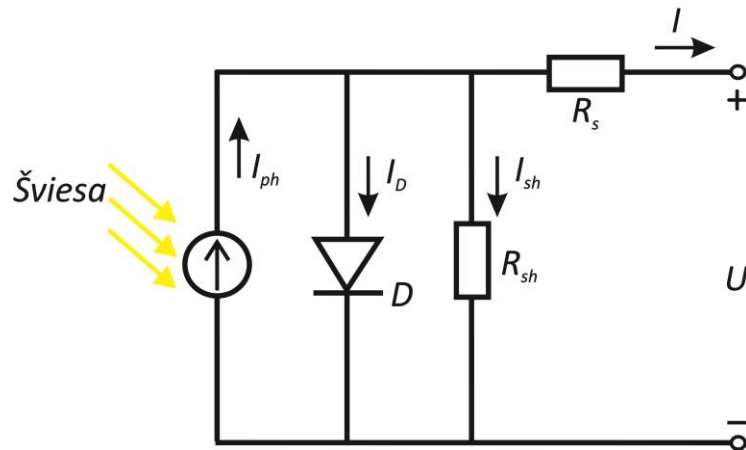


4 pav. Dviejų diodų ekvivalentinė elektrinė schema (Wolf, 2013)

Supaprastinant skaičiavimus daugelyje literatūros šaltiniuose pateikiamas kristalinio silicio modulio vieno diodo modelis, remiantis prielaida, kad nėra rekombinacijos nuostolių nuskurdintoje srityje. Rekombinacijos ir difuzijos srovės sutapatinamos remiantis diodo idealumo faktoriumi n . Vieno diodo modeliai skirstomi į dvi kategorijas. Jei lygiagrečioji varža laikoma begaline, modelis priskiriamas keturių parametrų modeliui, sudarytam iš šviesos sugeneruotos srovės, diodo atgalinės soties srovės, nuosekliosios varžos bei diodo idealumo faktoriaus (Ma, 2014). Matematinis vieno diodo modelis išreiškiamas formule:

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right], \quad (11)$$

Nustata, kad keturių parametrų modelis, kuris neįskaito lygiagrečiosios varžos poveikio, netinkamas eksperimentinių voltamperinių charakteristikų duomenų atvaizdavimui. Norint gauti tikslesnius duomenis, neapsunkinant skaičiavimų, naudojamas vieno diodo penkių parametrų modelis (5 pav.), susidedantis iš šviesos sugeneruotos srovės, diodo atgalinės soties srovės, nuosekliosios ir lygiagrečiosios varžų bei diodo idealumo faktoriaus (Wolf, 2013).



5 pav. Vieno diodo ekvivalentinė elektrinė schema (Wolf, 2013)

Šis De Soto (2006) išvystytas modelis, aprašantis saulės elemento netiesinę charakteristiką, gali tiksliai apibūdinti voltamperinės charakteristikos kreivę esant skirtingomis aplinkos sąlygomis. Matematinis vieno diodo modelis penkių parametrų saulės elementui grindžiamas Šoklio diodo lygtimi:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}}, \quad (12)$$

Saulės elemente veikia nuoseklioji (R_s) ir lygiagrečioji (R_{sh}) varžos, dėl kurių atsiranda galios nuostoliai. Nuoseklioji varža, kurią sąlygoja tūrinės p ir n sričių ir kontaktų varžos, neturi įtakos atvirosios grandinės įtampai, tačiau sumažina trumpojo jungimo srovę. Lygiagrečioji varža,

vardinama šunto varža, priklauso nuo silicio paviršiaus nehomogeniškumo. Paprastai ši varža atsiranda dėl gamybos defektų, o ne dėl saulės elemento struktūros. Lygiagrečioji varža sumažina atvirosios grandinės įtampą ir aprašo srovės nuotekį. Taigi, norint gauti kuo efektyvesnį saulės elementą, generuojantį maksimalią galią, reikia didinti lygiagrečiąją ir mažinti nuosekliają varžas (Singh, 2013).

1.2. Fotoelektrinio modulio elektriniai parametrai

Analizuojant fotoelektrinius modulius, svarbu taikyti tokią modeliavimo sistemą, kuri galėtų prognozuoti fotoelektrinio modulio fizikinę elgseną, voltamperinės charakteristikos kreivę bei modulio generuojamą galią, keičiant saulės apšvietą ir temperatūrą (Huld, 2011). Pati paprasčiausia ekvivalentinė grandinė, naudojama saulės elementui, gali būti pritaikoma ir bet kuriam fotoelektriniam moduliui, sudarytam iš daug elementų, taip pat modulių masyvui. Išvedama fotoelektrinio modulio matematinio modelio lygtis:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qU}{nkTN_s} \right) - 1 \right], \quad (13)$$

čia: I – modulio generuojama srovė (A), U – modulio generuojama įtampa (V), N_s – nuosekliai sujungtų elementų skaičius modulyje, I_0 – saulės elemento atgalinė soties srovė (A), I_{ph} – šviesos sugeneruota srovė (A). Vieno diodo su penkiais parametrais matematinio modelio lygtis fotoelektriniam moduliui aprašoma:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q}{nkT} \left(\frac{U_M}{N_s} + I_M R_s \right) \right) - 1 \right] - \frac{1}{R_{sh}} \left(\frac{U_M}{N_s} + I_M R_s \right), \quad (14)$$

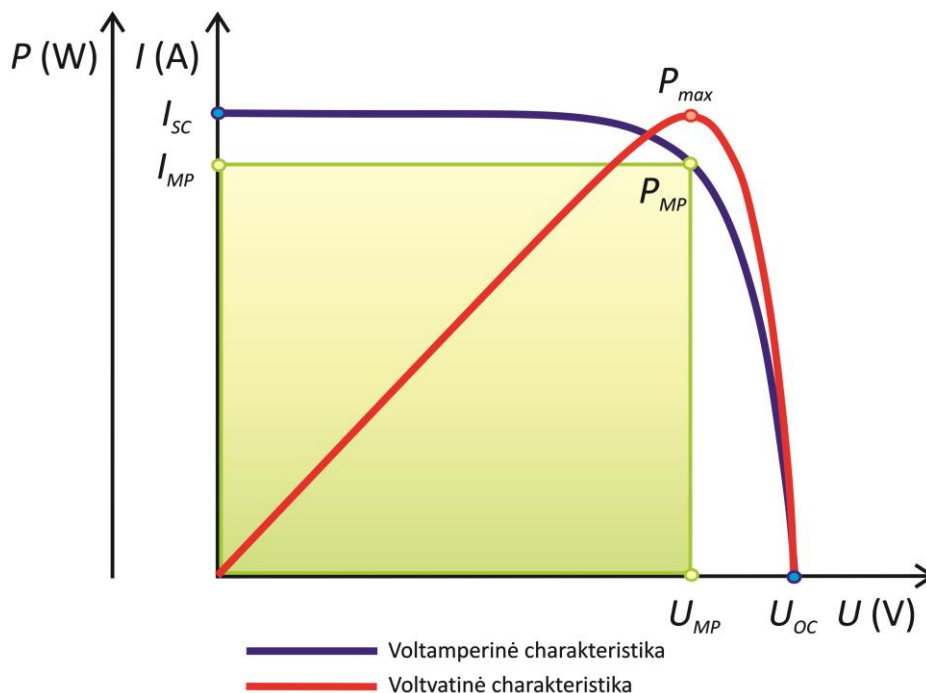
čia: I_M – modulio srovė (A), U_M – modulio įtampa (V), R_s – nuoseklioji modulio varža (Ω), R_{sh} – lygiagrečioji modulio varža (Ω) (Ma, 2014). Remiantis fotoelektrinio modulio matematiniu modeliu yra išvedama lygtis modulių masyvui:

$$I = I_{ph} N_p - I_0 N_p \left[\exp \left(\frac{qU}{nkTN_s} \right) - 1 \right], \quad (15)$$

čia: I – modulių masyvo generuojama srovė (A), U – modulių masyvo generuojama įtampa (V), N_p – lygiagrečiai sujungtų modulių skaičius (Singh, 2013). Vieno diodo su penkiais parametrais matematinio modelio lygtis modulių masyvui aprašoma:

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{q}{nkT} \left(\frac{U_A}{N_s} + \frac{I_A}{N_p} R_s \right) \right) - 1 \right] - \frac{N_p}{R_{sh}} \left(\frac{U_A}{N_s} + \frac{I_A}{N_p} R_s \right), \quad (16)$$

čia: I_A – modulių masyvo srovė (A), U_A – modulių masyvo įtampa (V). Saulės elemento, fotoelektrinio modulio ir modulių masyvo matematiniai moduliai ganėtinai panašūs. Šie modeliai gali būti tiesiogiai pritaikyti Matlab/Simulink ir kitose elektromagnetinio trumpalaikio simuliacijos programose ir tada gaunamos voltamperinės ir voltvatinės charakteristikos (Ma, 2014), kurios pateiktos 6 pav.



6 pav. Fotoelektrinio modulio voltamperinės ir voltvatinės charakteristikos, P_{max} – maksimali galia, I_{SC} – trumpojo jungimo srovė, U_{OC} – atvirosios grandinės įtampa, P_{MP} – maksimalios galios taškas, I_{MP} – srovė maksimalios galios taške, U_{MP} – įtampa maksimalios galios taške

Pateiktame grafike (6 pav.) pavaizduoti trys pagrindiniai taškai: trumpojo jungimo srovė (I_{SC}), atvirosios grandinės įtampa (U_{OC}) ir maksimali galia (P_{max}). Fotoelektrinio modulio voltamperinės charakteristikos kreivė, gali būti modeliuojama penkiais nežinomaisiais (I_{ph} , I_0 , n , R_s , R_{sh}) ir gamintojo deklaruotais ir pateiktais fotoelektrinio modulio parametrais, įskaitant trumpojo jungimo srovę (I_{SC}), atvirosios grandinės įtampą (U_{OC}), įtampą maksimalios galios taške (U_{MP}), srovę maksimalios galios taške (I_{MP}) ir maksimalios galios tašką (P_{MP}), kurie gauti, matuojant fotoelektrinį modulį standartinėmis testavimo sąlygomis (STC, *angl. Standard Testing Conditions*). Aplinkos sąlygomis ir standartinėmis testavimo sąlygomis išmatuotos modulio voltamperinės charakteristikos skiriasi. Todėl penkių parametrų (I_{ph} , I_0 , n , R_s , R_{sh}) vertės irgi skiriasi (Bai, 2014). Fotoelektrinė srovė tiesiogiai priklauso nuo saulės apšvietos, elemento temperatūros ir trumpojo jungimo srovės temperatūrinio koeficiento (α). Tikslī srovės vertė veikiama šviesos spektro (Di Vincenzo, 2013). Realiomis matavimo sąlygomis I_{ph} apskaičiuojama:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{ph,ref} + \alpha(T - T_{ref})), \quad (17)$$

čia: G_{ref} , $I_{ph,ref}$ ir T_{ref} – saulės apšvieta (W/m^2), šviesos sugeneruota srovė (A) ir elemento temperatūra (K) standartinėmis testavimo sąlygomis, G , I_{ph} ir T – atitinkami parametrai realiomis sąlygomis, α – trumpojo jungimo srovės temperatūrinis koeficientas standartinėmis testavimo sąlygomis ($\%/K$). Bai (2014) pažymi, kad diodo idealumo faktorius n keičiasi nežymiai kintant apšvietai ir saulės elemento temperatūrai. Taigi n yra pastovus dydis esant skirtingiems spektriniamis srauto tankiams ir elemento temperatūrai. n priklausomybė nuo temperatūros išreiškiama:

$$\frac{n}{n_{ref}} = \frac{T}{T_{ref}}, \quad (18)$$

čia: n_{ref} – diodo idealumo faktorius standartinėmis testavimo sąlygomis, n – diodo idealumo faktorius realiomis sąlygomis. Diodo atbulinės soties srovė (I_0), priklausanti nuo saulės elemento temperatūros, gali būti apskaičiuota:

$$\frac{I_0}{I_{0,ref}} = \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left(\frac{1}{k} \left(\frac{E_g}{T} \Big|_{T_{ref}} - \frac{E_g}{T} \Big|_T \right) \right), \quad (19)$$

čia: $I_{0,ref}$ ir T_{ref} – atbulinė soties srovė (A) ir elemento temperatūra (K) standartinėmis testavimo sąlygomis, I_0 ir T – atitinkami parametrai realiomis sąlygomis, E_g – medžiagos draudžiamosios juostos plotis (kristalinio silicio saulės elemento 1,121 eV). Esant realiomis sąlygomis draudžiamosios juostos pločio priklausomybė nuo elemento temperatūros išreiškiama:

$$\frac{E_g}{E_{g,Tref}} = 1 - 0,0002677(T - T_{ref}), \quad (20)$$

čia: $E_{g,Tref}$, T_{ref} – medžiagos draudžiamosios juostos plotis (eV) ir elemento temperatūra (K) standartinėmis testavimo sąlygomis, E_g , T – medžiagos draudžiamosios juostos plotis ir elemento temperatūra realiomis sąlygomis (Bai, 2014).

Fotoelektriniame modulyje, kuriame elementai sujungti nuosekliai, nuosekliosios varžos (R_s) poveikis didelis. Varžos dydis priklauso nuo nuosekliai sujungtų elementų, apšvietos ir temperatūros (Ma, 2014). Bai (2014) pažymi, kad R_s didėja, didėjant saulės elemento temperatūrai ir mažėja, mažėjant apšvietai. Nuoseklioji varža įtakoja voltamperinės charakteristikos kreivės formą ties maksimalios galios tašku. Kadangi fotoelektrinis modulis turi maksimalios galios taško sekimo (MPPT) funkcijas, R_s įtaka modulio voltamperinės charakteristikos kreivei negali būti ignoruojama. Nuosekliosios varžos priklausomybė nuo temperatūros ir apšvietos aprašoma formule:

$$\frac{R_s}{R_{s,ref}} = \frac{T}{T_{ref}} \left(1 - \kappa \ln \frac{G}{G_{ref}} \right), \quad (21)$$

čia: $R_{s,ref}$, T_{ref} , G_{ref} – nuosekloji varža (Ω), elemento temperatūra (K) ir apšvieta (W/m^2) esant standartinėms testavimo sąlygoms, R_s , T , G – nuosekloji varža, elemento temperatūra ir apšvieta realiomis sąlygomis, κ – vertė lygi 0,217 (De Soto, 2006).

Lygiagrečiosios varžos (R_{sh}) poveikis fotoelektriniame modulyje, kuriame elementai sujungti nuosekliai, nėra žymus, tačiau modulyje, kuriame elementai sujungti lygiagrečiai, varžos poveikis pastebimas (Bai, 2014). Pagal De Soto (2006) R_{sh} aprašo nuotekio srovę ir priklauso nuo temperatūros. Varža lemia voltamperinės charakteristikos kreivės nuolydį trumpojo jungimo taške. Kuo didesnė varža, tuo plokštesnis nuolydis (įgauna horizontalės formą) trumpojo jungimo taške. Remiantis Nacionalinio standartų ir technologijos instituto (NIST, *angl. National Institute of Standards and Technology*) eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad varža didėja, kai apšvieta mažėja. Varžos priklausomybė nuo apšvietos, išreiškiama formule:

$$\frac{R_{sh}}{R_{sh,ref}} = \frac{G}{G_{ref}}, \quad (22)$$

čia: $R_{sh,ref}$, G_{ref} – lygiagrečioji varžą (Ω) ir apšvieta (W/m^2) esant standartinėms testavimo sąlygoms, R_{sh} , G – lygiagrečioji varža ir apšvieta realiomis sąlygomis.

Fotoelektrinio modulio veikimas ir voltamperinės charakteristikos itin priklauso nuo modulio darbinės temperatūros, aplinkos temperatūros, saulės apšvietos ir saulės elemento temperatūros (Huld, 2011). Modulio paviršiaus temperatūra ir elemento temperatūra aprašoma priklausomybe:

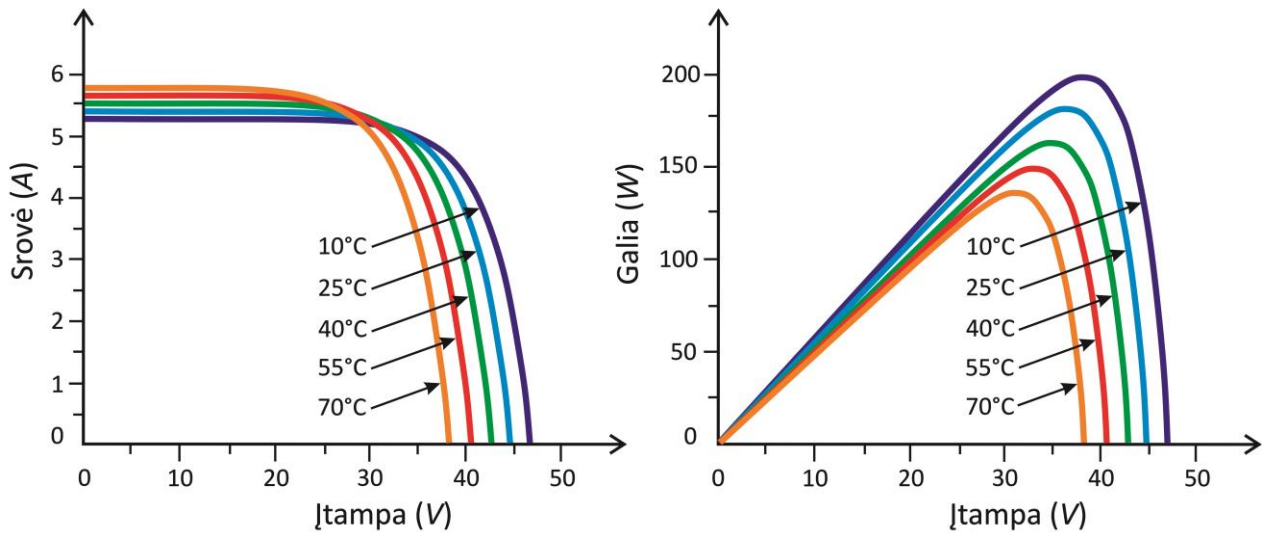
$$T_c = T_m + \frac{G}{G_{ref}} \Delta T, \quad (23)$$

čia: T_c – saulės elemento darbinė temperatūra (K), T_m – modulio paviršiaus temperatūra (K), ΔT – pastovus temperatūros skirtumas tarp elemento ir modulio paviršiaus ($3^\circ C$), G – apšvieta, G_{ref} – apšvieta standartinėms testavimo sąlygoms (Ma, 2014). Vienas iš šiluminių procesų, kurie labiausiai veikia modulio darbinės temperatūros vertę, yra konvekcinių ir spinduliavimo šilumos mainai tarp modulio ir supančios aplinkos. Pastebėta, kad konvekcinių šilumos perdavimo koeficientas priklauso nuo vėjo greičio, bet mažiau priklauso nuo vėjo krypties ir praktiškai visai nepriklauso nuo oro temperatūros. Vertinant spindulinius šilumos mainus, darbinė temperatūra labai priklauso nuo modulį dengiančio stiklo skaidrio, atspindžio ir sugerties koeficientų (Ciulla, 2014). Kiti svarbūs veiksniai, lemiantys modulio darbinę temperatūrą, yra aplinkos temperatūra, modulio montavimo tipas, vėjo greitis bei kryptis (Huld, 2011). Modulio darbinė temperatūra tiesiogiai

įtakoja elektrinius parametrus (srovę, įtampą, galią) ir saulės elemento efektyvumą (Ciulla, 2014). Kadangi vieno saulės elemento generuojama įtampa yra apie 0,5 V, dėl to elementai jungiami nuosekliai, norint padidinti įtampą ir lygiagrečiai, norint padidinti srovę. Elementus jungiant nuosekliai, generuojama srovė nekinta (idealiu atveju, kai elementai idealiai vienodi) ir lygi vieno elemento generuojamai srovei, o įtampa lygi visų nuosekliai sujungtų elementų įtampų sumai. Dauguma rinkoje esančių fotoelektrinių modulių sudaryti nuo 36 iki 72 nuosekliai sujungtų elementų. Standartiniai fotoelektriniai moduliai sudaryti iš 60 nuosekliai sujungtų elementų. Neatsižvelgiant į elementų jungimo schemą, modulio generuojama galia yra lygi visų modulyje sujungtų elementų generuojamų galių sumai. Paprastai gaminamų modulių galių diapazonas svyruoja nuo 50 W iki 200 W, srovė - nuo 3 A iki 8 A ir įtampa – nuo 20 V iki 40 V. Gamintojai dažniausiai pateikia modulio voltamperinės charakteristikos parametrus (maksimalią galią, trumpojo jungimo srovę, atviros grandinės įtampą, srovę maksimalios galios taške, įtampą maksimalios galios taške), gautus atliekant matavimus standartinėmis testavimo sąlygomis (Luque, 2003). Modulio galia priklauso ne tik nuo jo darbinės temperatūros, bet ir nuo saulės energijos kiekio, krintančio į modulio paviršių. Fotoelektrinio modulio veikimas blogėja lauko sąlygomis ilgalaikio eksploatavimo metu, o tai savo ruožtu paveikia visą modulio gyvavimo trukmę ir generuojamos galios vertę. Fotoelektrinio modulio generuojama galia išreiškiama netiesine saulės apšvietos funkcija (Huld, 2011) bei srovės ir įtampos sandauga (Skoplaki, 2009):

$$P_{\max} = I_{MP}U_{MP} = I_{SC}U_{OC}(FF), \quad (24)$$

čia: $P_{\max}$ – maksimali fotoelektrinio modulio galia (W), I_{MP} – srovė maksimalios galios taške (A), U_{MP} – įtampa maksimalios galios taške (V), I_{SC} – modulio trumpojo jungimo srovė (A), U_{OC} – atvirosios grandinės įtampa (V), FF – užpildos faktorius (%). Ši lygtis išreiškia srovę ir įtampą maksimalios galios taške, modulio voltamperinės charakteristikos kreivėje. Užpildos faktorius apibūdina maksimalų fotoelektrinio modulio generuojamą galingumą (Skoplaki, 2009). Didėjant aplinkos temperatūrai trumpojo jungimo srovė nežymiai didėja, o atvirosios grandinės įtampa ir užpildos faktorius mažėja. Atitinkamai galia irgi mažėja (Ciulla, 2014). Temperatūros įtaka fotoelektrinio modulio voltamperinės charakteristikoms pateikta 7 pav.



7 pav. Temperatūros įtaka fotoelektrinio modulio voltamperinėms charakteristikoms

Didėjant temperatūrai siaurėja draudžiamosios juostos plotis ir mažėja p - n sandūros potencinio barjero aukštis, o tai savo ruožtu lemia atvirosios grandinės įtampos mažėjimą. Taip pat temperatūros didėjimas turi neigiamos įtakos krūvininkų gyvavimo trukmėms (jas trumpina), o tai sąlygoja charakteristikų blogėjimą. Modulio elektrinių savybių pablogėjimą aukštose temperatūrose taip pat lemia šiluminis krūvininkų generavimas, nes dėl temperatūros termiškai sužadinti elektronai pradeda įtakoti modulio elektrines savybes (Skoplaki, 2009; Ciulla, 2014).

Modulio trumpojo jungimo srovė tiesiškai priklauso nuo apšvietos (Singh, 2013) ir nežymiai didėja, didėjant saulės elemento temperatūrai, nes sumažėja draustinės juostos tarpas. Srovės pokytį apibūdina trumpojo jungimo srovės temperatūrinis koeficientas (α). Taigi I_{SC} priklausomybė nuo apšvietos ir elemento temperatūros apskaičiuojama:

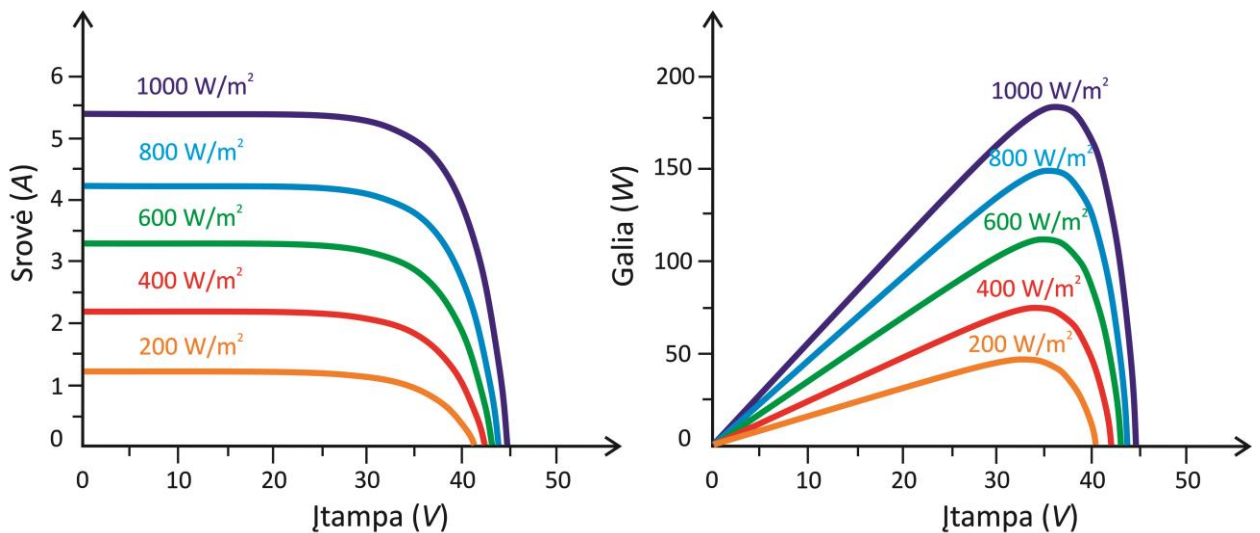
$$I_{SC}(T_{cell}, G) = I_{SC(STC)} \frac{G}{1kWm^{-2}} [1 + \alpha(T_{cell} - T_{ref})], \quad (25)$$

čia: T_{cell} – saulės elemento temperatūra ($^{\circ}C$), T_{ref} – temperatūra lygi $25^{\circ}C$ standartinėmis testavimo sąlygomis, G – apšvieta (W/m^2), $I_{SC(STC)}$ – trumpojo jungimo srovė standartinėmis testavimo sąlygomis (Luque, 2003). Atviros grandinės įtampa logaritmiškai priklauso nuo apšvietos (Singh, 2013) ir atvirkščiai proporcinga temperatūrai. Šį kitimą nusako atvirosios grandinės įtampos temperatūrinis koeficientas (β). U_{OC} priklausomybė apskaičiuojama:

$$U_{OC}(T_{cell}, G) = U_{OC(STC)} - \beta(T_{cell} - T_{ref}), \quad (26)$$

čia: $U_{OC(STC)}$ – atvirosios grandinės įtampa standartinėmis testavimo sąlygomis.

Fotoelektrinio modulio voltamperinių charakteristikų priklausomybė nuo apšvietos pateikta 8 pav.



8 pav. Fotoelektrinio modulio voltamperinių charakteristikų priklausomybė nuo apšvietos

Paprastai fotoelektrinio modulio efektyvumas priklauso nuo temperatūros ir saulės šviesos spektro, kuris savo ruožtu priklauso nuo saulės aukščio virš horizonto ir meteorologinių sąlygų (spektro poveikis) (Huld, 2011). Tiesinė priklausomybė apskaičiuojama:

$$\eta(T_{cell}, G) = \eta_{(STC)} [1 - \gamma (T_{cell} - T_{ref})] \quad (27)$$

čia: $\eta(T_{cell}, G)$ – modulio elektrinis efektyvumas, $\eta_{(STC)}$ – modulio elektrinis efektyvumas standartinėmis testavimo sąlygomis, γ – temperatūrinis koeficientas, apibrėžiamas kaip santykinis modulio efektyvumo sumažėjimas padidėjus elemento temperatūrai 1 °C. γ priklauso ne tik nuo fotoelektrinio modulio medžiagos bet ir nuo T_{ref} , ir išreiškiama:

$$\gamma = \frac{1}{T_0 - T_{ref}}, \quad (28)$$

čia: T_0 – temperatūra, kuriai esant fotoelektrinio modulio efektyvumas nukrenta iki nulio (K) (Luque, 2003; Skoplaki, 2009).

1.3. Saulės elemento ir fotoelektrinio modulio parametrų kitimą realiomis sąlygomis lemiantys veiksniai

Realiomis darbinėmis sąlygomis išmatuoti saulės elementų ir fotoelektrinių modulių parametrai kinta dėl daugelio aplinkos faktorių ir dėl to atsiranda galios nuostoliai. Pagrindiniai galios nuostolius lemiantys faktoriai gali būti suskirstyti į keturias pagrindines kategorijas:

- Kampinis saulės šviesos pasiskirstymas. Dėl saulės judėjimo dangaus skliaute ir išsklaidytos spinduliuotės, šviesa krenta į fotoelektrinio modulio paviršių ne normalės kryptimi.

- Spektrinė saulės šviesos sudėtis. Kadangi saulės šviesos spektras nuolat kinta dėl saulės judėjimo, oro sąlygų ar netgi oro užterštumo ir t.t., generuojamos galios vertė irgi nuolat kinta.
- Apšvietos lygis. Esant saulės elementų pastoviai darbinei temperatūrai, fotoelektrinio modulio efektyvumas ir galia mažėja, mažėjant apšvietai. Galios sumažėjimas atsiranda dėl logaritminės atvirosios grandinės įtampos priklausomybės nuo fotosrovės (Luque, 2003).
- Saulės elemento temperatūra. Dėl aplinkos temperatūros pokyčių ir šviesos intensyvumo, saulės elementai fotoelektriniame modulyje kaista. Esant aukštai temperatūrai, efektyvumas mažėja, tai irgi lemia galios nuostolius (Bai, 2014).

1.4. Fotoelektrinių modulių degradacija

Fotoelektra plačiai taikoma įvairiose srityse ir užima svarbią vietą atsinaujinančios energijos rinkoje. Per pastarąjį dešimtmetį fotoelektros sektorius labai išaugo (Ndiaye, 2013). Ypač per 2013 metus instaliuota galia pasiekė apie 37 GW pasaulyje (EPIA, 2014). 2014 m. sausio 1 d. Lietuvos elektros sistemoje saulės elektrinių prijungtų prie skirstomojo tinklo bendra įrengtoji galia sudarė 68 MW (Litgrid, 2014).

Efektyvus ir ilgalaikis saulės jėgainių veikimas yra vienas iš pagrindinių faktorių, garantuojančių sėkmingą fotoelektros sektoriaus vystymą rinkoje. Per ilgą laiko tarpą didėjantys energijos našumo nuostoliai kelia vis didesnę susirūpinimą ne tik atsinaujinančios energetikos sektoriui, bet ir saulės jėgainių savininkams bei kitoms suinteresuotoms šalims. Svarbu laiku indentifikuoti fotoelektrinių modulių degradacijos priežastis. Modulių voltamperinių charakteristikų degradacijos supratimas leidžia nustatyti šias priežastis bei suteikia naudingos informacijos projektuojant saules jėgaines.

Informacija apie fotoelektrinių modulių degradaciją randama nuo 1970 metų (Ndiaye, 2013). 2002 metais Nacionalinė atsinaujinančios energetikos laboratorija (NREL, *angl. National Renewable Energy Laboratory*) apskaičiavo, kad metinė 4 monokristalinių ir polikristalinių modulių galios degradacija sudaro 0,71 %. Tyrimo metu moduliai eksploatuoti lauko sąlygomis, po to sendinami, esant 40 W/m^2 ir 50 W/m^2 UV apšvietai. Modulių degradacija susijusi su trumpojo jungimo srovės nuostoliais. Atvirosios grandinės įtampos ir užpildos faktoriaus sumažėjimas nežymus (Osterwald, 2002). 2012 metais NREL pateikė 12 monokristalinių ir polikristalinių modulių tyrimų duomenis. Gauti rezultatai parodė, kad fotoelektrinių modulių vidutinis maksimalios galios sumažėjimas, mažiau nei 0,5 % per metus, priklauso nuo trumpojo jungimo srovės sumažėjimo, kurį lemia atsisluoksniavimai, spalvų pakitimai, saulės elementų lūžiai, taip pat

šviesos sukelta degradacija bei nešvarumai. Didelis modulių maksimalios galios sumažėjimas, daugiau nei 0,5 % per metus, itin priklauso nuo užpildos faktoriaus degradavimo, atsižvelgiant į nuosekliosios varžos padidėjimą ar lygiagrečiosios varžos sumažėjimą bei saulės elementų nesuderinamumo padidėjimą. Fotoelektrinio modulio viduje vieni elementai degraduoja greičiau ir atsiranda išsibarstymas. Modulio veikimas priklauso nuo blogiausio elemento veikimo. Atvirosios grandinės įtampos kritimas pakankamai nežymus, lyginant su trumpojo jungimo srovės mažėjimu. Dešimties modulių maksimali įtampa sumažėjo 0,5 % per metus (Smith, 2012).

Energetikos, Ekologijos ir ekonomikos saulės ticino laboratorija (LEEE-TISO, *angl. Laboratory of Energy, Ecology and Economy Solar-Ticino*), įsikūrusi fotoelektrinių modulių testavimo centre Šveicarijoje, paskelbė, kad per pirmuosius kristalinio silicio fotoelektrinių modulių eksploatavimo metus galios degradacija svyravo nuo 0,7 % iki 9,8 % ir per antruosius eksploatavimo metus nuo 0,7 % iki 4,9 % (Ndiaye, 2013). Skoczek (2009) išmatavo 204 kristalinio silicio fotoelektrinius modulius (53 skirtingus modulių tipus) eksploatuotus lauko sąlygomis. Moduliai pagaminti iš skirtingų polimerinių laminatų (EVA, PVB) ir pagrindų („Tedlar“, „Tedlar“/aliuminis, stiklas, silikonas, poliesteris, poliesteris/aliuminis). Tyrimai pradėti 1983 m. Jungtinių Tyrimų centre (*angl. Joint Reseach Center*), šiaurės Italijoje, esant vidutiniam subtropiniam klimatui (nuo -10°C iki 35°C temperatūrai, >90 % santykinei drėgmei). Nustatyta, kad tikrai 17,6 % iš instaliuotų modulių (35 moduliai iš 204 tirtų modulių) neatitiks numatyto tarnavimo laiko. Dideli nuostoliai (>20 %) susiję su užpildos faktoriaus nuostoliais, atsiradusiais dėl nuosekliosios varžos padidėjimo. Vidutiniai nuostoliai (<20 %) galėjo būti susiję su trumpojo jungimo srovės nuostoliais, atsiradusiais dėl optinių savybių degradacijos. Ilgalaikiai nuostoliai svyravo tarp 0,2 % ir 1,0 % per metus.

1.4.1. Pagrindiniai fotoelektrinių modulių degradacijos tipai

Degradacija yra laipsniškas fotoelektrinių modulių, jų komponentų savybių pablogėjimas, turintis neigiamą poveikį modulių ar jų masyvo visapusiškam veikimui, gebėjimui generuoti maksimalią galią ir t.t. (Ndiaye, 2013). Remiantis Wohlgemuth (2005), gamintojai traktuoja fotoelektrinį modulį nusidėvėjusiu, kada jo galia pasiekia mažiau nei 80 %, skaičiuojant nuo pradinės generuojamos galios. Fotoelektrinis modulis degraduoja dėl tokių veiksnių, kaip temperatūra, drėgmė, apšvieta, mechaninis poveikis (Osterwald ir McMahon, 2009; Munoz, 2011). Kiekvienas iš šių išvardytų faktorių gali sukelti vieną ar keletą modulio degradacijos tipų: koroziją, spalvos pakitimus, atsiskuoksniavimus bei saulės elementų įtrūkius ir lūžius (Vazquez ir Ignacio, 2008; Munoz, 2011). NREL (Bosco, 2010) pateikia pagrindinius indentifikuotus kristalinio silicio fotoelektrinių modulių degradacijos tipus: sujungimų pažeidimai, saulės elementų defektai,

korozija, polimerinio laminato atsisluoksniavimai ir spalvos pakitimai, stiklo defektai, kontaktų dėžutės defektai bei sulituotų juostelių defektai (litavimo brokas).

1.4.1.1. Fotoelektrinių modulių korozija

Drėgmė, patenkanti per laminato kraštus, sukelia koroziją (Kempe, 2005). Koroduodamos saulės elementų litavimo juostelės sukelia nuostolius, nes didėja srovės nuotėkiai. Korozija taip pat pablogina adheziją tarp elementų ir metalinio rėmo (Munoz, 2011).

Wohlgemuth ir Kurtz (2011) studijavo drėgmės ir temperatūros įtaką fotoelektrinio modulio degradacijai. Atlikę pagreitinoto sendinimo eksperimentus, remiantis IEC 61215:2005 testavimo standartu, nustatė, kad korozija atsiranda po 1000 h modulio laikymo klimatinėje kameroje, esant 85°C temperatūrai ir 85 % santykinei drėgmei.

Kiti tyrimai (Realini, 2003; Vazquez ir Ignacio, 2008) teigia, kad korozijos ir spalvos pakitimai yra vyraujantys fotoelektrinio modulio degradacijos tipai. Carlson (2003) bendradarbiaudamas su NREL, po atliktų modulių tyrimų, nustatė, kad stikle esantis natrio, kuris reaktyvus drėgmei, yra pagrindinis veiksnys sukeliantis koroziją modulių kraštuose. Osterwald (2002) teigė, kad modulio degradacija atsiranda dėl deguonies, sukeliančios koroziją silicio sandūroje. Kempe (2005) įrodė, kad drėgmė modulyje koreliuoja su degradacijos greičiu, ypač karštosiose ir drėgnose geografinėse zonose, tokiose kaip Majamyje, Floridoje. Dėl santykinai greitos vandens difuzijos etileno - vinilacetato kopolimere (EVA) drėgmės įsiskverbimas modulyje išlieka per visą jo tarnavimo laiką, net jei modulis sudarytas iš dvigubos stiklo konstrukcijos. Pagal Kempe (2005), vienintelis būdas užkirsti kelią drėgmės prasiskverbimui tinkamas užsandarinimas naudojant tarpiklius, pasižyminčius mažos difuzijos savybėmis ir turinčius savo sudėtyje didelį kiekį sausiklių.

1.4.1.2. Fotoelektrinių modulių atsisluoksniavimai

Esant blogai adhezijai vyksta atsisluoksniavimas, atsirandantis tarp polimerinio laminato ir saulės elementų ar saulės elementų ir priekinio stiklo. Tai pakankamai didelė problema, sukelianti dvejopą poveikį: šviesos atspindžio padidėjimą ir vandens prasiskverbimą į modulio konstrukcijos vidų (Munoz, 2011).

Skoczek (2008) tyrė fotoelektrinių modulių degradaciją, susijusią su modulio atskirų sluoksnių adhezija, eksperimentais paremtais IEC 61215:2005 testavimo standartu. Jis nustatė, kad atsisluoksniavimai, pasitaikantys modulio kraštuose, laikomi didžiausiais, nes sukelia ne tik galios nuostolius, bet ir elektros keliamą pavojų visai instaliacijos sistemai.

Atsisluoksniavimai dažniausiai pasitaiko esant karštam ir drėgnam klimatui, nes atsiradusi drėgmė fotoelektriniame modulyje sukelia įvairius cheminius ir fizikinius degradavimo procesus, tokius kaip metalų koroziją modulio struktūroje (Ndiaye, 2013).

Jansen ir Delahoy (2003) tvirtina, kad atsisluoksniavimai gali atsirasti dėl druskų kaupimosi ir drėgmės atsiradimo modulyje.

1.4.1.3. Fotoelektrinių modulių spalvos pakitimai

Fotoelektrinio modulio spalvos pakitimai paprastai atsiranda dėl polimerinių plėvelių (EVA, PVB), pasižyminčių skirtingomis savybėmis, degradacijos modulyje arba blogos adhezijos tarp stiklo ir saulės elementų. Spalvos pokyčiai - atsiradusios rusvos dėmės modulyje, arba paties modulio pageltonavimas, įtakoja šviesos pralaidumą saulės elementuose, o tai lemia modulio generuojamos galios sumažėjimą (Ndiaye, 2013). Oreski ir Wallner (2009) teigia, kad pagrindinės priežastys, sukeliančios EVA polimerinės plėvelės degradaciją yra ultravioletinių spindulių ir vandens sąveika, esant temperatūrai aukštesnei nei 50 °C. Spalvos pakitimai gali atsirasti įvairiose modulio vietose.

Kojima ir Yanagisawa (2004) tyrė polimerinės plėvelės spalvos pakitimus fotoelektriniame modulyje. Jie sendino modulius dirbtinėje šviesoje ir tyrė ultravioletinės spinduliuotės (bangų ilgis nuo 280 nm iki 380 nm) įtaką moduliui. Esant 4000 W/m² apšvietai, saulės elementai greitai degraduoja dėl padidėjusio jautrumo apšvietai po 400 h sendinimo ir dėl padidėjusio pralaidumo UV spinduliuotės bangoms. Atsiradę EVA plėvelės spalvos pakitimai (geltonos dėmės), sukelia fotoelektrinių modulių galios nuostolius (Berman ir Faiman, 2007). Tačiau po 500 h modulio sendinimo, esant 1000 W/m² apšvietai, kai šviesos bangų ilgių srityje nuo 280 nm iki 380 nm, plėvelėje neatsiranda jokių spalvos pokyčių.

Wohlgemuth ir Kurtz (2011) atliko UV spinduliuotės testus esant 60 °C temperatūrai. Jie nustatė, kad polimerinio laminato spalvos pakitimai atsiranda, kai UV spinduliuotė pasiekia 15 kWm⁻², esant bangų ilgių diapazonui tarp 280 nm ir 385 nm.

Osterwald (2002) teigia, kad lėta modulio degradacija esant ilgam laiko tarpui tiesiškai koreliuoja su fotoelektrinio modulio sendinimu UV apšvietoje. Kristalinio silicio fotoelektrinių modulių EVA polimerinės plėvelės degradacija yra aprašoma daugelyje literatūros šaltinių (Kempe, 2006; Kempe, 2010). Realini (2003) nuo 1982 iki 2003 metų atliko eksperimentus, kurie leido stebėti ir lyginti fotoelektrinių modulių charakteristikas ir polimerinės plėvelės spalvos pakitimus. Spalvos pakitimai mažina modulio trumpojo jungimo srovę, kurios dydis kinta nuo 6 % iki 8 % žemiau nominalios vertės daliniams fotoelektrinio modulio paviršiaus spalvos pakitimams ir nuo

10 % iki 13 % visiškam pakitimui. Modulio maksimali galia irgi mažėja, esant modulio paviršiaus spalvos pakitimams.

1.4.1.4. Fotoelektrinių modulių lūžiai ir įtrūkimai

Stiklo įbrėžimai, įskėlimai ir dūžiai svarbūs fotoelektrinio modulio degradacijos požymiai. Daugeliu atveju jie atsiranda modulių instaliacijos, eksploatavimo ir ypač transportavimo metu (Wohlgemuth ir Kurtz, 2011). Įskilęs ar sudužęs modulis gali generuoti galią, bet iškyla elektros keliamas pavojus ir padidėja tikimybė drėgmei patekti į modulio konstrukcijos vidų.

Siekiant sutaupyti silicio medžiagos resursus ir sumažinti saulės elementų gamybos kainą, gamintojai keičia elementų storį ir paviršiaus plotą. Per pastaruosius metus saulės elementų storis sumažėjo nuo 300 μm iki mažiau nei 200 μm , o kartais ir mažiau nei 100 μm . Be to sumažinus saulės elementų storį, elemento paviršiaus plotas padidėjo iki 210x210 mm^2 (Dallas, 2007). Dėl to saulės elementas tampa jautresnis išorinei aplinkai ir trapesnis sandėliuojant bei transportuojant. Pamatyti saulės elementų įtrūkius ant jau eksploatuojamo modulio plikomis akimis praktiškai neįmanoma. Defektus galima nustatyti tik naudojant specialius prietaisus (Ndiaye, 2013).

2. Fotoelektrinių modulių matavimo metodika ir aparatūra

Šiame skyriuje aprašyta tyrimų ir testavimo procedūra, kuri atliekama tiriant fotoelektrinių modulių voltamperinių charakteristikų matavimus. Remiantis IEC 61215:2005 testavimo standartu, nusakančiu fotoelektrinių modulių elektrinius parametrus, numatyta atlikti šiuos kokybę bei fotoelektrines savybes išreiškiančius tyrimus:

- 1) Vizualinę patikrą;
- 2) Maksimalios galios nustatymą standartinėmis testavimo sąlygomis;
- 3) Modulių veikimą esant vidutinėms ir žemoms apšvietoms;
- 4) Elektroliuminescencijos spektrų registravimą;
- 5) Šlapio modulio srovės nuotekio testą.

2.1. Vizualinė patikra

Atliekama vizualinė kontrolė remiantis Nacionalinės atsinaujinančios energetikos laboratorijos (NREL) rekomendacijomis. Patikros metu stengiamasi nustatyti, ar nėra vizualiai pastebimų defektų. Fotoelektriniai moduliai atsargiai iš abiejų pusių apžiūrimi ant apžiūrai pritaikyto stalo. Patikra atliekama gerai apšviestose patalpose. Bendroji patalpos apšvieta ne mažesnė nei 1000 lx. Ieškomi konstruktyvo, stiklo bei saulės elementų pažeidimai, lūžiai, įbrėžimai, jungčių ir kontaktų dėžutės defektai, litavimo brokas, polimerinio laminato atsisluoksniavimai,

atskirų sluoksnių adhezija ir spalvos pakitimai. Rasti defektai fotografuojami fotoaparatu arba optine sistema, skirta defektų fotografavimui.

2.2. Maksimalios galios nustatymas standartinėmis testavimo sąlygomis

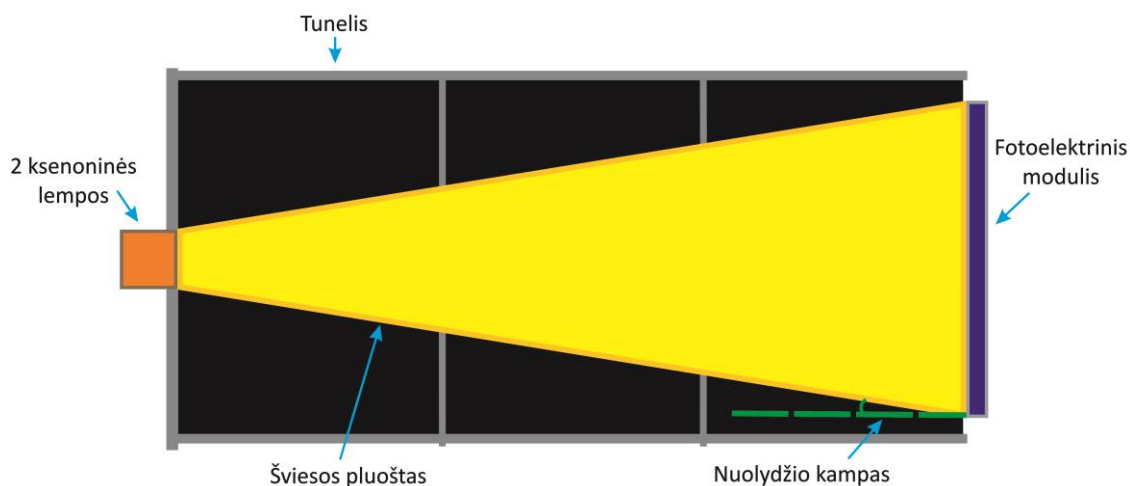
Tyrimui pasirinkti trys 240 W, penki 235 W ir du 245 W galios polikristaliniai fotoelektriniai moduliai. Modulių voltamperinės charakteristikos gali būti matuojamos dviem būdais: matavimai natūralioje šviesoje ir imituojant saulės šviesą laboratorinėmis sąlygomis. Nagrinėjamas matavimas, imituojant saulės šviesą. Šio darbo metu siekiama įvertinti fotoelektrinių modulių voltamperines charakteristikas. Visa tai leidžia plačiau tarpusavyje palyginti išmatuotų modulių elektrinių parametrų (galios, srovės, įtampos ir t.t.) pokyčius su gamintojo deklaruotomis ir pateiktomis voltamperinėmis vertėmis. Naudojamas “Pasan SunSim AAA+” klasės impulsinis saulės imitatorius, skirtas imituoti natūralią saulės šviesą laboratorinėmis sąlygomis ir nustatyti maksimalią fotoelektrinio modulio galią, matuojant voltamperines charakteristikas. Prietaisas turi atitikti IEC 60904-9 standarto reikalavimus, kuriais remiantis saulės imitatorius skirstomas į A, B ir C klases, ir klasifikuojamas pagal spektro atitikimą, apšvietos nehomogeniškumą ir laikiną nestabilumą.

1 lentelė. Saulės imitatoriaus klasės (IEC 60904-9, 2007)

Klasifikacija	Spektro atitikimas	Apšvietos nehomogeniškumas	Laikinas nestabilumas	
			Ilgalaikis	Trumpalaikis
Klasė A	0,75 – 1,25	2 %	0.5 %	2 %
Klasė B	0,6 – 1,4	5 %	2 %	5 %
Klasė C	0,4 – 2,0	10 %	10 %	10 %
Pasan AAA+	0,875-1,125	1 %	0 %	1 %

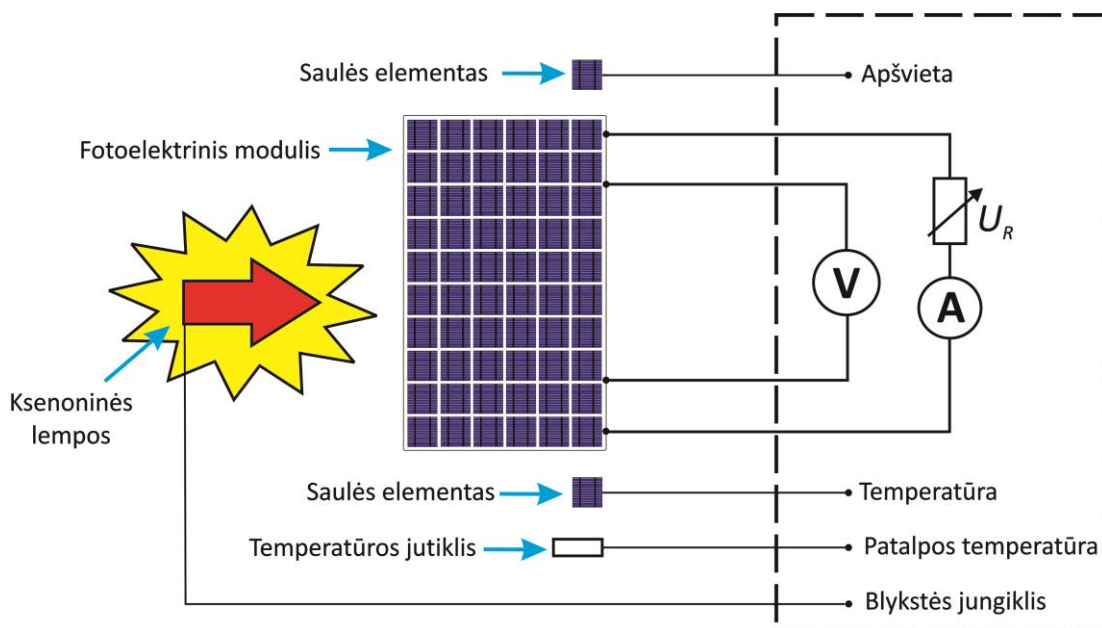
Matavimo atsikartojamumas priklauso nuo imituojamos saulės spektro stabilumo. Šviesos pasiskirstymo vienodumas (homogeniškumas) testavimo zonoje turi būti žinomas ir periodiškai tikrinamas. Matavimo tikslumas turi būti irgi periodiškai tikrinamas tomis pačiomis testavimo sąlygomis. Fotoelektrinių modulių voltamperinės charakteristikos matuojamos standartinėmis testavimo sąlygomis, esant 1000 W/m^2 spektriniam srauto tankiui, 25°C modulio paviršiaus temperatūrai ir AM 1,5 spektriniam pasiskirstymui. AM 1,5 (AM, *angl. air mass*) aprašo, kokį atstumą, kirsdama $48,2^\circ$ kampu atmosferą, šviesa turi praeiti pasiekdama Žemę.

Imitatoriaus šviesos nuolydžio kampas $<15^\circ$, remiantis ASTM E927-05 standartu. Saulės imitatoriaus tunelio schema, su nuolydžio kampu, pateikta 9 pav.



9 pav. Saulės imitatoriaus tunelio schema su nuolydžio kampu

Impulsiniuose saulės imitatoriuose saulės modulio voltamperinės charakteristikos dažniausiai matuojamos naudojant ksenonines lempas kaip apšvietos šaltinį. Prie modulio prijungiama elektrinė apkrova, sinchronizuota su ksenoninės lempos valdymo sistema. Impulso metu, elektronškai keičiant apkrovos varžą, registruojamos įtampos ir srovės vertės. Įprasta impulso trukmė yra apie 12 ms. Duomenys pradedami registruoti tik tada, kai pasiekiami ir stabilizuojama reikiama apšvietos vertė. Standartiškai tai trunka apie 2 ms. Vadinasi, matavimas ir duomenų registravimas trunka apie 10 ms. Priklausomai nuo matavimo sąlygų registruojama ir sukaupiama ne mažiau 2000 matavimo taškų. Įtampos ir srovės matavimo tikslumas ne mažesnis nei $\pm 0,2 \%$, remiantis IEC 60904-1 standartu. Saulės imitatorius fiksuoja įtampą ir srovę, skaičiuoja maksimalią galią, nuosekliają ir lygiagrečiąją varžas bei kitus parametrus. Saulės imitatoriaus principinė veikimo schema pateikta 10 pav.



10 pav. Saulės imitatoriaus principinė veikimo schema

Saulės imitatoriuje apšvietos ir temperatūros matavimams naudojami du etaloniniai kristalinio silicio saulės elementai. Etaloninių elementų ir modulių temperatūros matavimo tikslumas $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, atsikartojamumas $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Paprastai patalpos temperatūra skiriasi nuo modulio paviršiaus temperatūros, dėl to prieš atliekant matavimus yra perskaičiuojami srovės, įtampos ir galios temperatūriniai koeficientai.

$$\alpha = \alpha_T \frac{I_{SC}}{100 \cdot N_p \cdot A}, \quad (29)$$

$$\beta = \beta_T \frac{U_{OC}}{100 \cdot N_s}, \quad (30)$$

čia: α – modulio trumpojo jungimo srovės temperatūrinis koeficientas (vertė svyruoja nuo 10 iki $20\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2\text{K}$), α_T – gamintojo pateiktas trumpojo jungimo srovės temperatūrinis koeficientas, I_{SC} – modulio trumpojo jungimo srovė (A), N_p – lygiagrečiai sujungtų saulės elementų skaičius, A – vieno saulės elemento plotas, β – modulio atvirosios grandinės įtampos temperatūrinis koeficientas (vertė svyruoja nuo $-1,9$ iki $2,1\text{ mV}/\text{cm}^2\text{K}$), β_T – gamintojo pateiktas atvirosios grandinės įtampos temperatūrinis koeficientas, U_{OC} – modulio atvirosios grandinės įtampa (V), N_s – nuosekliai sujungtų saulės elementų skaičius. Galios temperatūrinis koeficientas δ yra kombinacija α , β ir κ . Kadangi nuosekliosios varžos koeficientas $\kappa=0\text{ m}\Omega/\text{K}$, todėl galios koeficiento galima neįvertinti.

Įtampos nuostoliai dėl papildomų varžų kabeliuose ir jungtyse nematuojami, tačiau į juos atsižvelgiama, vertinant bendras atsitiktines paklaidas.

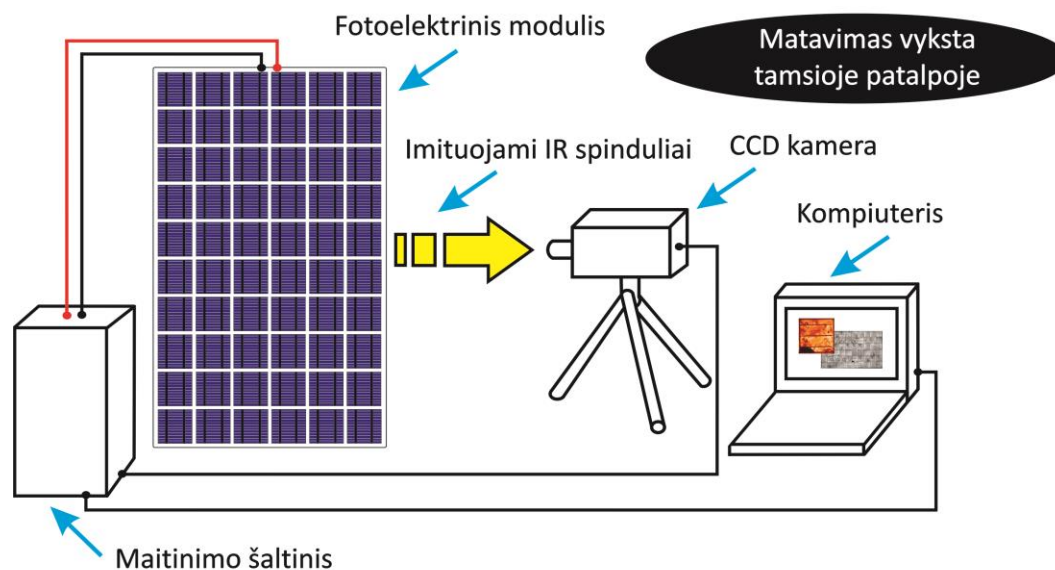
2.3. Modulių veikimas esant vidutinėms ir žemoms apšvietoms

Tyrimo metu siekiama išsiaiškinti fotoelektrinių modulių veikimą, esant vidutinėms ir žemoms apšvietoms. Naudojamas “Pasan SunSim AAA+” klasės impulsinis saulės imitatorius, skirtas matuoti modulių voltamperines charakteristikas. Spektrinis srauto tankis keičiamas neutraliais filtrais: $700\text{ W}/\text{m}^2$, $500\text{ W}/\text{m}^2$, $200\text{ W}/\text{m}^2$. Patalpos temperatūra palaikoma $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Įtampos ir srovės matavimo paklaida ne didesnė nei $\pm 0,2\text{ }\%$. Etaloninių elementų ir modulių temperatūros matavimo tikslumas $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, atsikartojamumas $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.4. Elektroluminescencijos spektrų registravimas

Naudojama “Lumisolar Outdoor” sistema iš “Greteyes”, skirta registruoti elektroluminescencijos spektrą ir atlikti fotoelektrinių modulių kokybės bei būklės patikrą. Matavimas atliekamas tamsioje patalpoje. Nuolatinė srovė leidžiama fotoelektriniu moduliu. Vizualizuojami plika akimi nematomi defektai ir fiksuojamas elektroluminescencijos intensyvumas CCD kamera. Silicio liuminescencija aptinkama infraraudonųjų spindulių diapazone, esant bangų

ilgiams nuo 950 nm iki 1300 nm, nematomiems plika akimi. Elektroluminescencijos matavimo sistema pateikta 11 pav.

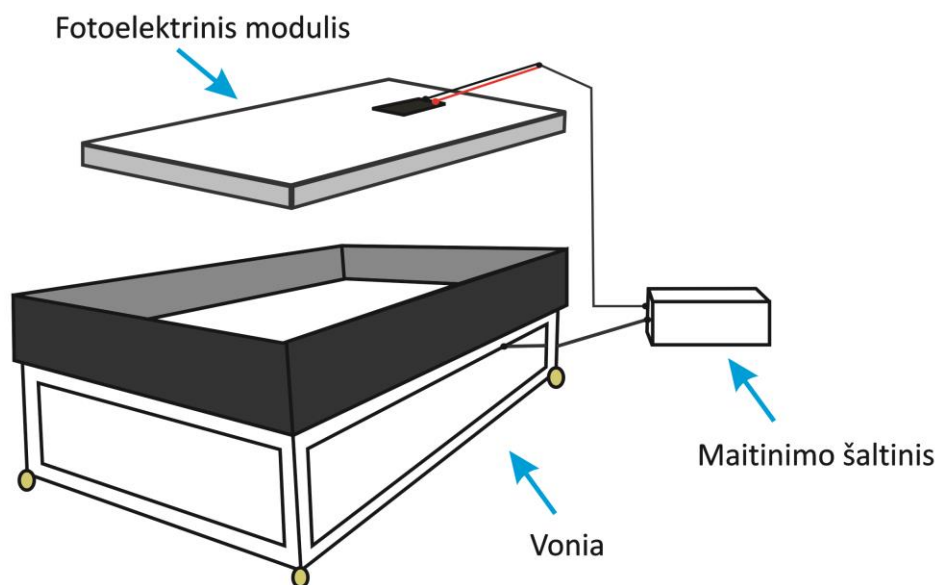


11 pav. Elektroluminescencijos kontrolės sistema

Matavimo metu nustatomi modulio gamybos, transportavimo, montavimo metu padaryti arba eksploatacijos metu atsiradę defektai: saulės elementų įtrūkimai, mikroįtrūkiai, lūžiai, metalizacijos defektai (elektrodų spausdinimo defektai), užtrumpinimai, degradacija ties didžiuoju elektrodų tinkleliu, saulės elementų grupės kontakto trūkiai, kontaktų tinklelio formavimo defektai, kristalo netolygumai ir priemaišų defektai.

2.5. Šlapio modulio srovės nuotekio testas

Matavimas atliekamas, siekiant nustatyti fotoelektrinio modulio izoliacijos varžą esant drėgnoms aplinkos sąlygoms (sniegui sningant, lietai lyjant, esant rūkui). Tikrinama ar modulio kontaktinės dalys ir jungiamieji laidai gerai izoliuoti, ir ar bus atsparūs korozijai bei įžeminimui. Eksperimento metu modulis merkiamas į vandens rezervuarą taip, kad tik kontaktų dėžutė matytųsi vandens paviršiuje. Kontaktų dėžutė apipurškiama vandeniu. Vandens varža turi būti ne didesnė nei $3500 \Omega\text{cm}$, vandens paviršiaus įtempis ne didesnis nei $0,03 \text{ Nm}^{-1}$, vandens temperatūra $22^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$. Prie modulio prijungiamas nuolatinės srovės šaltinis. Įtampa pajungiama 2 min. ir negali viršyti 500 V ar gamintojo nurodytos maksimalios modulio įtampos. Nustatoma izoliacijos varža, kurios matavimo tikslumas $\pm 5 \%$. Šlapio modulio izoliacijos varžos matavimo sistema pateikta 12 pav.



12 pav. Šlapio modulio izoliacijos varžos matavimo sistema

Modulio, kurio plotas mažesnis nei $0,1 \text{ m}^2$, izoliacijos varža turi būti ne mažesnė nei $400 \text{ M}\Omega$. Modulio, kurio plotas didesnis nei $0,1 \text{ m}^2$, izoliacijos varža turi būti ne mažesnė nei $40 \text{ M}\Omega\text{m}^{-2}$.

3. Fotoelektrinių modulių elektrinių parametų tyrimas

Fotoelektrinių modulių elektrinių parametų tyrimai atlikti pagal numatytos metodikos reikalavimus, procedūros eigą bei naudojantis 2.2-2.5 paragrafuose aprašyta įranga. Šiame skyriuje pateikiami dešimties standartinių polikristalinių modulių, sudarytų iš 60 nuosekliai sujungtų saulės elementų, matavimų rezultatai.

3.1. Maksimalios galios tyrimas 2013 m. spalio-lapkričio mėn.

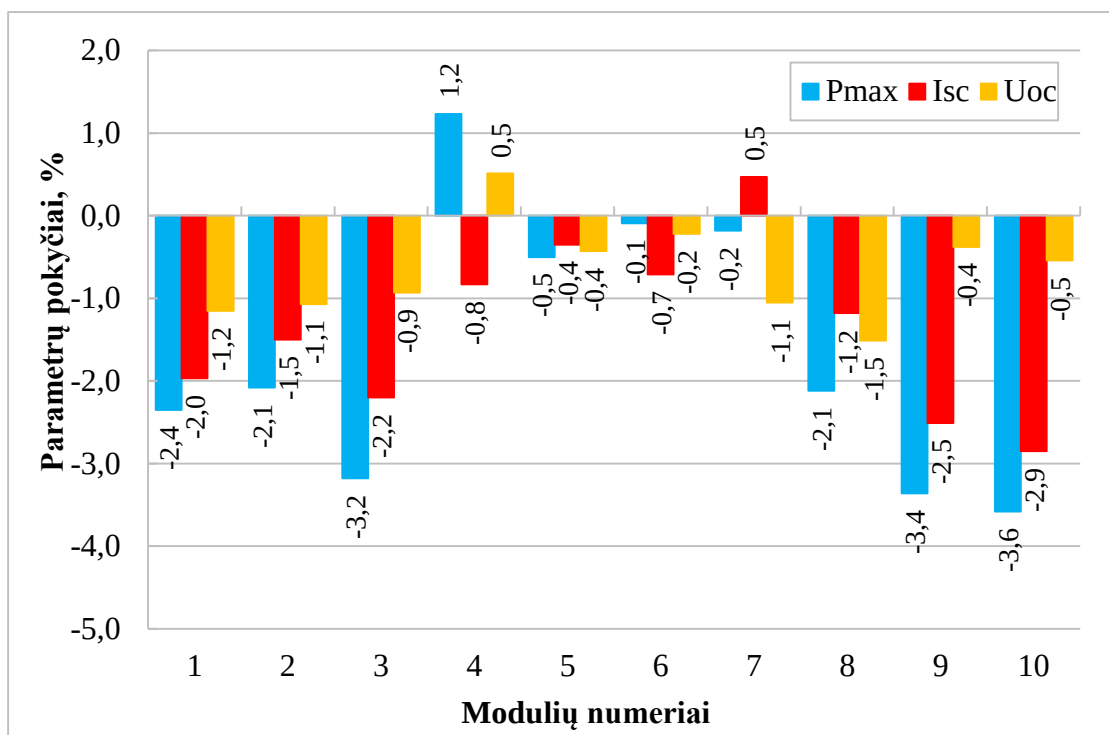
Maksimalios galios matavimai atlikti saulės imitatoriumi naudojant dešimt polikristalinių fotoelektrinių modulių, atvežtų iš 2012 m. instaliuotų ir iki dabar veikiančioje saulės jėgainėje Lietuvoje. Siekiant nustatyti saulės jėgainės efektyvumą ir modulių maksimalios galios pokyčius, bandiniai periodiškai tikrinami. 2013 m. spalio-lapkričio mėn. atlikti matavimai ir gauti rezultatai (maksimali galia P_{max} , trumpojo jungimo srovė I_{SC} , atvirosios grandinės įtampa U_{OC} , srovė maksimalios galios taške I_{MP} ir įtampa maksimalios galios taške U_{MP}) lyginami su modulių gamintojų deklaruotomis vertėmis. Nustatyta, kad modulių P_{max} , I_{SC} , U_{OC} , I_{MP} vidurkliai sumažėjo 1,6 %, 1,4 %, 0,7 %, 1,8 % per daugiau nei vienerius metus (2 lentelė). Maksimalios galios kritimą, nuo -0,1 % iki -3,6% (2 lentelė), įtakoja trumpojo jungimo srovės I_{SC} sumažėjimas (13 pav.).

Žinoma, kad I_{SC} degradaciją dažniausiai lemia sumažėjęs šviesos pralaidumas, atsisluoksniavimas, spalvos pakitimai, saulės elementų lūžiai, saulės šviesa ir nešvarumai.

2 lentelė. 2013 m. išmatuotų modulių elektrinių parametų skirtumų analizė procentais

Band. Nr.	Modulio serijinis numeris	Modulio gamintojas	Deklaruota galia, W	P_{max} , %	I_{SC} , %	U_{OC} , %	I_{MP} , %	U_{MP} , %	Matav. data, trukmė
1	8333969	Yingli Energy YL240P-29b	240 W (-0~+5 W)	-2,4	-2,0	-1,2	-2,6	-0,2	2013-10 >1 metai
2	8333269	Yingli Energy YL240P-29b	240 W (-0~+5 W)	-2,1	-1,5	-1,1	-1,8	-0,3	2013-10 >1 metai
3	8333547	Yingli Energy YL240P-29b	240 W (-0~+5 W)	-3,2	-2,2	-0,9	-3,1	-0,1	2013-10 >1 metai
4	1333236	Rise Solartech SR-P660235	235 W (-0~+3 W)	1,2	-0,8	0,5	-1,1	2,2	2013-10 >1 metai
5	1333458	Rise Solartech SR-P660235	235 W (-0~+3 W)	-0,5	-0,4	-0,4	-0,8	0,1	2013-10 >1 metai
6	1333359	Rise Solartech SR-P660235	235 W (-0~+3 W)	-0,1	-0,7	-0,2	-1,3	1,1	2013-10 >1 metai
7	1333184	Rise Solartech SR-P660235	235 W (-0~+3 W)	-0,2	0,5	-1,1	-0,4	0,1	2013-10 >1 metai
8	1333259	Rise Solartech SR-P660235	235 W (-0~+3 W)	-2,1	-1,2	-1,5	-1,9	-0,3	2013-10 >1 metai
9	1333219	Rise Solartech SR-P660245	245 W (-0~+3 W)	-3,4	-2,5	-0,4	-2,6	-0,9	2013-11 >1 metai
10	1333496	Rise Solartech SR-P660245	245 W (-0~+3 W)	-3,6	-2,9	-0,5	-2,6	-1,1	2013-11 >1 metai
Vidurkis				-1,6	-1,4	-0,7	-1,8	0,1	-

13 pav. pateikta išmatuotų fotoelektrinių modulių elektrinių parametų analizė per daugiau nei vienerius metus. Matyti akivaizdus P_{max} , I_{SC} , U_{OC} sumažėjimas.



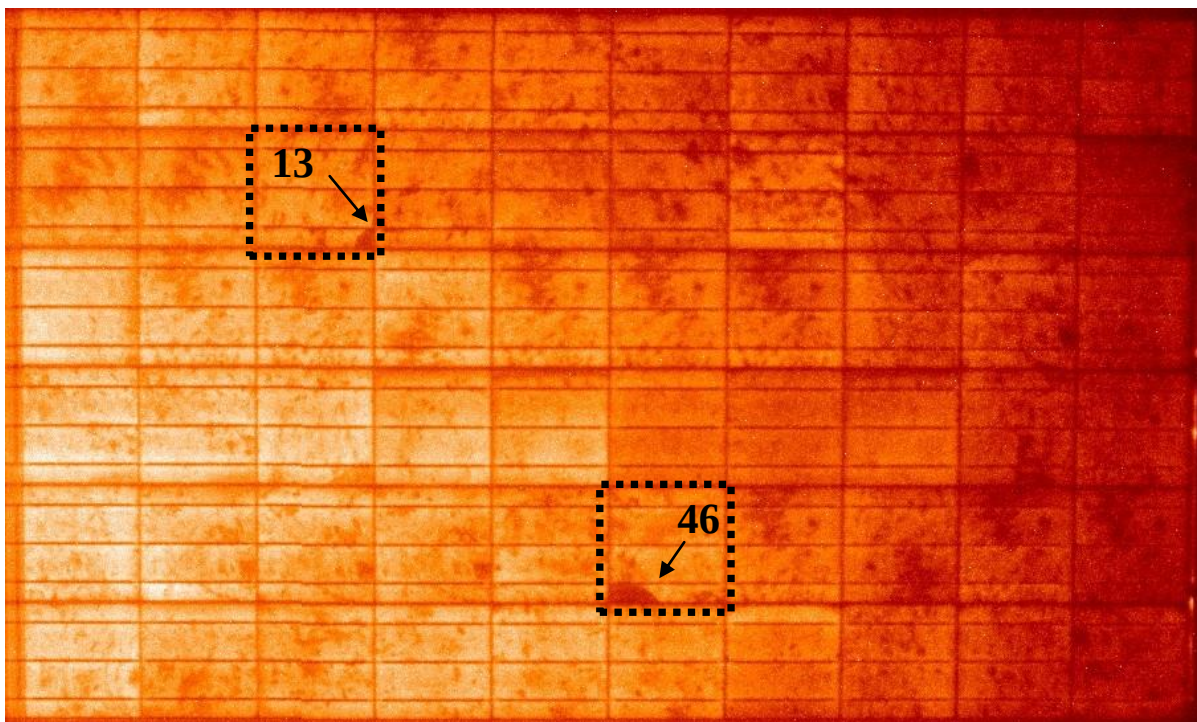
13 pav. Deklaruotų ir išmatuotų modulių elektrinių parametrų skirtumų analizė

Nustatyti didžiausi galios nuostoliai moduluose Nr. 1, Nr. 2, Nr. 3, Nr. 8, Nr. 9 ir Nr. 10.

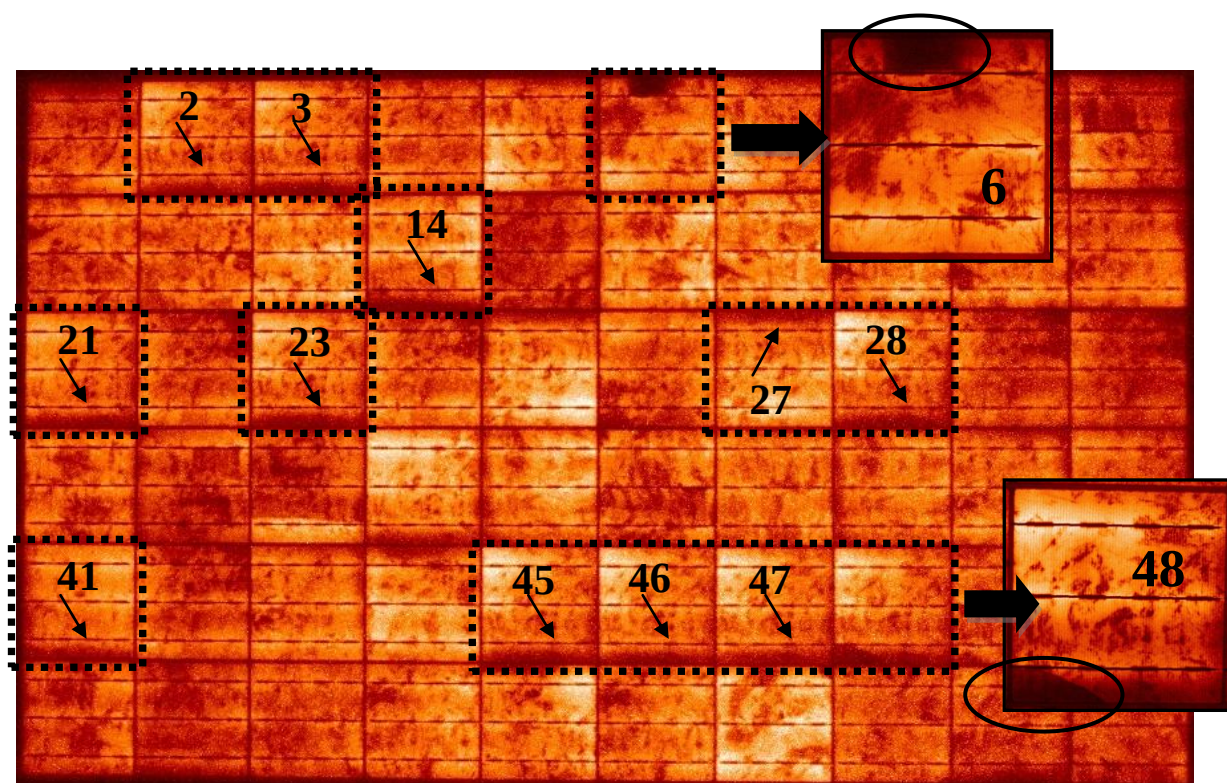
3.2. Elektroluminescencijos tyrimas 2013 m. spalio-lapkričio mėn.

Siekiant susieti fotoelektrinių modulių galios mažėjimo priklausomybę su defektų atsiradimu, atlikti elektroluminescencijos spektro registravimo tyrimai. Moduluose Nr. 6, Nr. 9 ir Nr. 10 aptikti lūžio defektai (14, 15 ir 16 pav.). Lūžiai gali atsirasti saulės elementų ir fotoelektrinių modulių gamybos metu, dėl litavimo proceso sukeltos apkrovos elementams bei modulių laminavimo procese. Kita šių defektų atsiradimo priežastis yra nesaugus modulių transportavimas ir instaliavimas. Jų metu susidaro ir mikroįtrūkimai, kurie laikui bėgant didėja ir lemia lūžių susiformavimą elementuose. Galiausiai eksploatavimo metu modulis veikiamas mechaninių vėjo ir sniego apkrovų, dėl kurių ir atsiranda lūžiai.

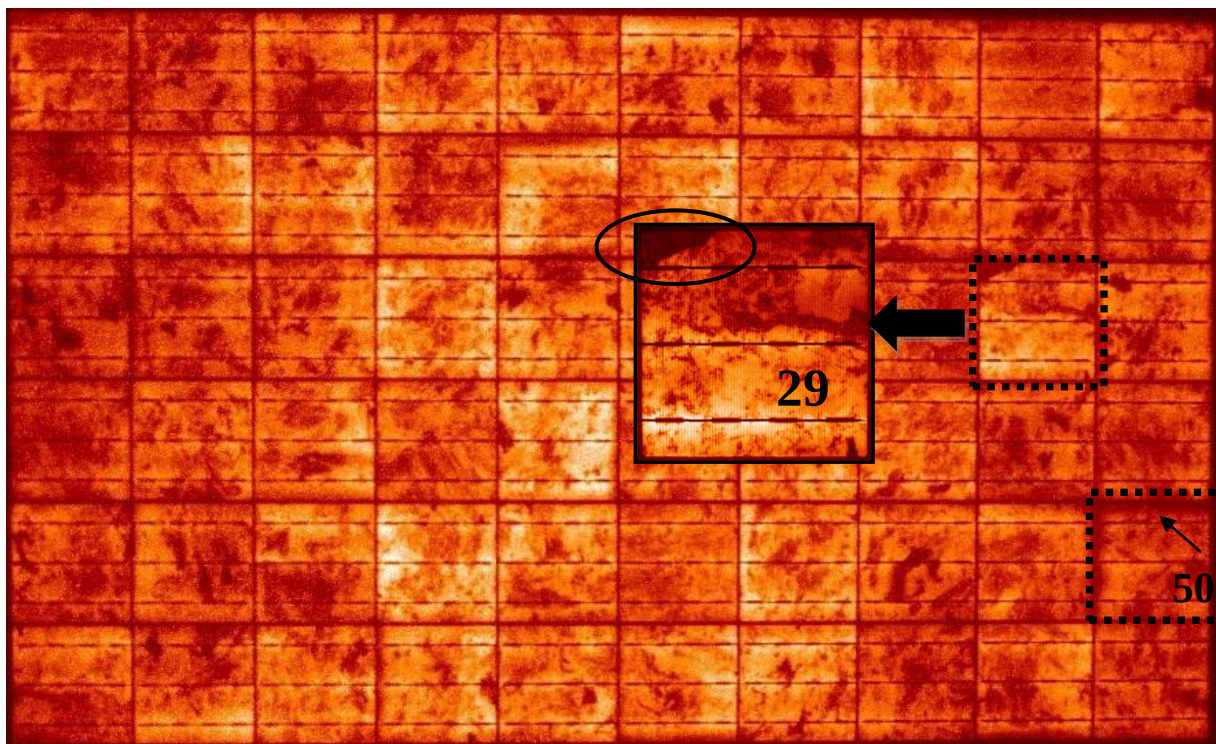
Defektai, aptikti saulės elementuose: 13, 46, 48, 29 (14, 15 ir 16 pav.), sukelia krūvininkų rekombinaciją ir mažina trumpojo jungimo srovę I_{SC} , o tai sukelia galios nuostolius moduluose Nr. 6, Nr. 9 ir Nr. 10. Didžiausia I_{SC} ir P_{max} degradacija pasižymi moduliai Nr. 9 ir Nr. 10 (2 lentelė), kuriuose ir indentifikuoti lūžiai.



14 pav. Lūžiai (13, 46) modulyje Nr. 6



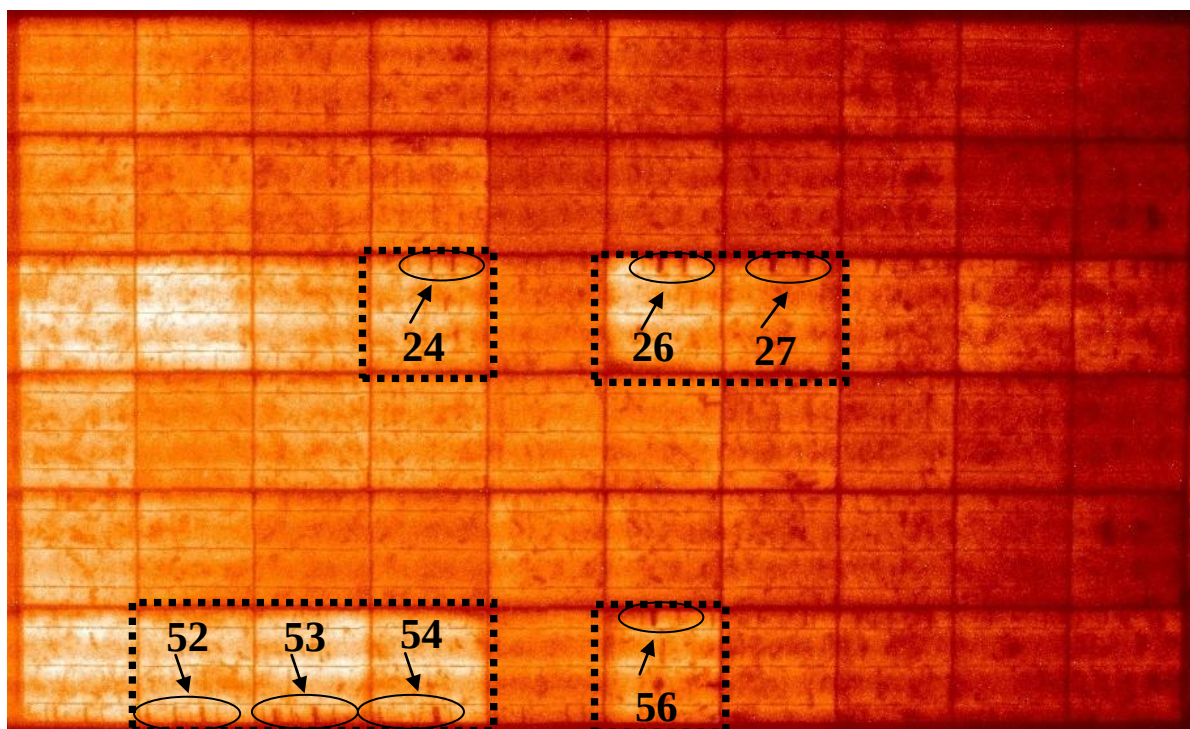
15 pav. Lūžis (48), metalizacijos (6), priemaišų (2, 3, 14, 21, 23, 27, 28, 41, 45, 46, 47) defektai modulyje Nr. 9



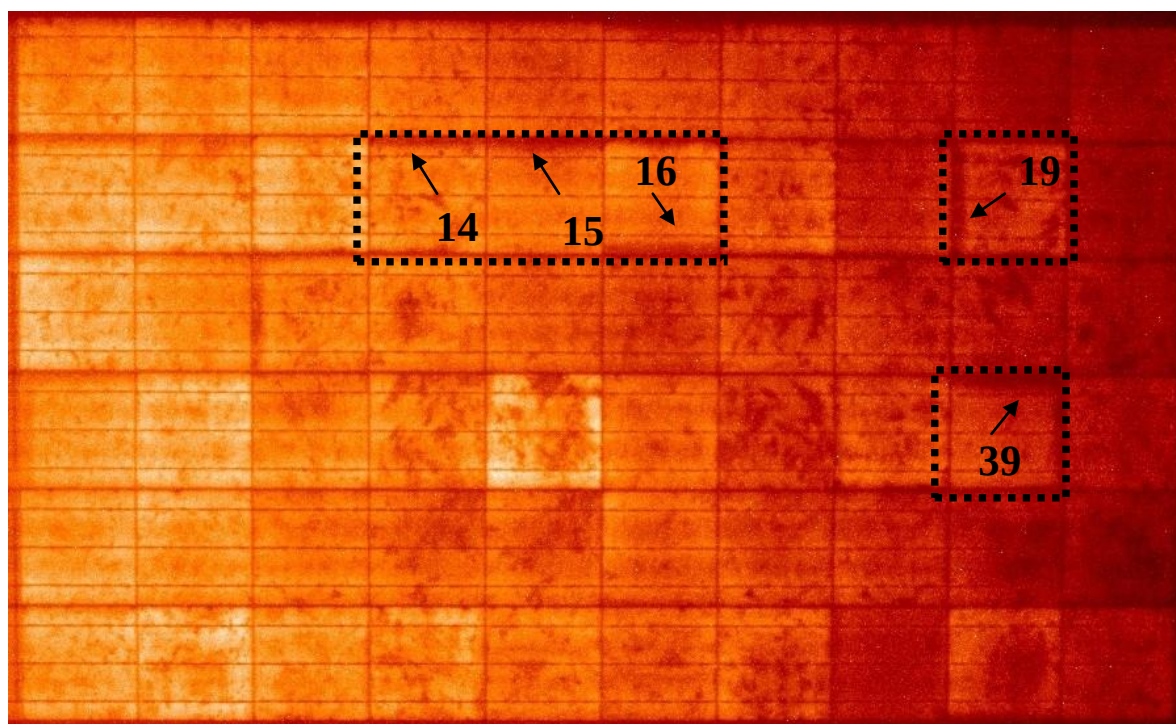
16 pav. Lūžis (29), priemaišų defektas (50) modulyje Nr. 10

Atlikus fotoelektrinių modulių kokybės patikrą elektroluminescencijos spektro registravimo sistema, pastebėti metalizacijos defektai moduluose Nr. 3 ir Nr. 9 (15 ir 17 pav.). Metalizacijos defektai dažniausia atsiranda saulės elementų kontaktų formavimo procese ir priklauso nuo saulės elementų litavimo bei, iš dalies, nuo fotoelektrinių modulių laminavimo procesų. Jei kontaktų formavimo procese kontaktų tinklelis tam tikroje srityje nutrūksta, išorinis elektrinis laukas negali pasiekti $p-n$ sandūros. Matuojant elektroluminescenciją toje srityje, nutrūkęs tinklelis atvaizduojamas tamsia ir plačia sritimi, kuria negali tekėti srovė. Praktikoje metalizacijos defektai sumažina krūvininkų generaciją, tiesiogiai įtakoja spektrinį atsaką ir mažina saulės elemento efektyvumą. Taip pat ir fotoelektrinio modulio generuojamą galią. Jei kontaktų formavimo procese tinklelis nutrūksta keliose vietose, defektai turi mažai įtakos moduliui. Jei tokie tinklelio defektai pasireiškia dažnai ir kiekvienoje tinklelio eilėje, tai sukelia modulių galios nuostolius. Esant nekokybiškam litavimo procesui pagrindinis kontaktas atšoka nuo tinklelio kontakto. To pasekoje modulyje atsiranda dideli galios nuostoliai. Aptikus tokius kontaktų defektus, patartina atlikti litavimo sistemos patikrą ir naudojamo lydmetalo kokybę. Pavieniai metalizacijos defektai nėra kritiniai galios atžvilgiu. Priešingai, labai ryškūs metalizacijos defektai, dažniausiai atsiranda dėl nekokybiško litavimo proceso, sukelia galios nuostolius. Jeigu šie defektai atsiranda tose pačiose saulės elementų pozicijose, tai reiškia, kad defektų priežastys yra elementų gamybos procese.

Metalizacijos defektai modulyje Nr. 3 (17 pav.) neitin ryškūs ir labai paplitę po visą modulio plotą, todėl jų įtaka saulės elementų efektyvumui ir modulio maksimalios galios sumažėjimui nedidelė. Modulyje Nr. 9 (15 pav.) pastebėtas tik vienas metalizacijos defektas, bet jis didelis ir ryškus, todėl gali sukelti galios nuostolius.



17 pav. Metalizacijos defektai (24, 26, 27, 52, 53, 54, 56) modulyje Nr. 3



18 pav. Priemaišų defektai (14, 15, 16, 19, 39) modulyje Nr. 5

Moduliuose Nr. 5, Nr. 9 ir Nr. 10 indentifikuoti priemaišų defektai (15, 16 ir 18 pav.). Siekiant gauti legiruotą silicį, naudojamas difuzijos procesas, į silicio lydalą įterpiant reikiamas priemaišas. Pagrindinės priemaišos boras ir fosforas, o natūralios priemaišos: varis, geležis, nikelis, anglis, chromas, magnis, manganas, titanas, cinkas, zirkonis ir t.t. Dėl didelės koncentracijos, priemaišos sukelia defektus ir mažina saulės elementų efektyvumą. Priemaišų defektų atsiradimas susijęs su sumažėjusiu difuzijos ilgiu.

Priemaišų defektai modulyje Nr. 5 yra indentifikuoti penkiuose saulės elementuose: 14, 15, 16, 19 ir 39 (18 pav.). Jų poveikis modulio elektriniams parametrams mažas. Modulyje Nr. 10 aptiktas tiksliai vienas priemaišų defektas (16 pav.). Jis neįtakoja modulio generuojamos galios mažėjimo. Modulyje Nr. 9, matyti vienuolika defektų (15 pav.), mažinančių saulės elementų efektyvumą ir lemiančių modulio galios kritimą.

Moduliuose Nr. 1, Nr. 2, Nr. 4, Nr. 7 ir Nr. 8 nepastebėti jokie defektai.

3.3. Maksimalios galios tyrimas standartinėmis testavimo sąlygomis ir esant skirtingoms apšvietoms 2014 m. gegužės-spalio mėn.

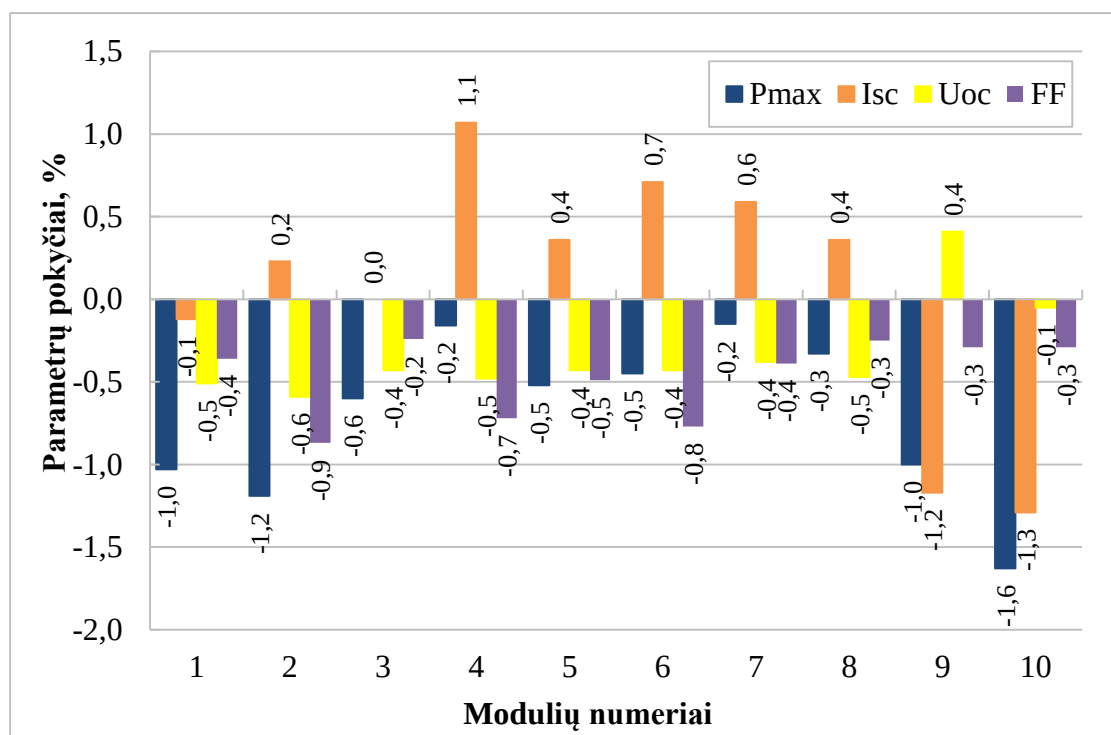
Kadangi moduliai Nr. 9 ir Nr. 10 pasižymi didžiausiais galios nuostoliais, todėl siekiant periodiškai tirti jų I-V parametrų pakitimus, matavimai atlikti 2014 m. gegužės mėn., praėjus pusei metų nuo eksperimentų atliktų 2013 m. lapkričio mėn. Šių modulių maksimalios galios kritimas nuo -1,0 % iki -1,6 % susijęs su trumpojo jungimo srovės I_{SC} sumažėjimu (3 lentelė).

3 lentelė. 2014 m. išmatuotų modulių elektrinių parametrų skirtumų analizė procentais

Band. Nr.	P_{max} , %	I_{SC} , %	U_{OC} , %	I_{MP} , %	U_{MP} , %	FF , %	R_s , %	R_{sh} , %	Matavimo data
1	-1,0	-0,1	-0,5	0,3	-1,3	-0,4	1,1	54,4	2014-10
2	-1,2	0,2	-0,6	0,1	-0,7	-0,9	1,4	-80,6	2014-10
3	-0,6	0	-0,4	0,4	-1,0	-0,2	0,4	-3,2	2014-10
4	-0,2	1,1	-0,5	1,0	-1,1	-0,7	1,0	6,7	2014-10
5	-0,5	0,6	-0,4	0,1	-0,5	-0,5	2,0	-3,5	2014-10
6	-0,5	0,7	-0,4	0,6	-1,0	-0,8	0,6	-30,7	2014-10
7	-0,2	0,6	-0,4	0,6	-0,8	-0,4	1,0	107,7	2014-10
8	-0,3	0,4	-0,5	0,4	-0,7	-0,3	0,6	69,1	2014-10
Vidurkis	-0,6	0,4	-0,5	0,4	-0,9	-0,5	1,0	15,0	-
9	-1,0	-1,2	0,4	-1,1	0,2	-0,3	9,0	-30,1	2014-05
10	-1,6	-1,3	-0,1	-0,9	-0,8	-0,3	9,5	26,9	2014-05
Vidurkis	-1,3	-1,2	0,2	-1,0	-0,3	-0,3	9,3	1,6	-

Modulių Nr. 1-8 antri matavimai atlikti po metų, 2014 m. spalio mėn. Gauti rezultatai rodo (3 lentelė), kad modulių P_{max} , U_{OC} , U_{MP} , FF vidurčiai sumažėjo 0,6 %, 0,5 %, 0,9 %, 0,5 %, o I_{SC} ir I_{MP} padidėjo 0,4 % per metus. Analizuojant modulių elektrinių parametrų pokyčius, matyti (3 lentelė), kad P_{max} sumažėjo nuo -0,2 % iki -1,2 %, I_{SC} padidėjo nuo 0,2 % iki 1,1 %, I_{MP} padidėjo nuo 0,1 % iki 1,0 %, U_{OC} sumažėjo nuo -0,4 % iki -0,6 % ir U_{MP} sumažėjo nuo -0,5 % iki -1,3 %. Daroma prielaida, kad viena iš maksimalios galios sumažėjimo priežasčių yra aukšta temperatūra. Didėjant aplinkos temperatūrai, blogėja modulio elektrinės savybės, to pasekoje U_{OC} ir FF mažėja, bet I_{SC} didėja.

Modulių Nr. 1-8 elektrinių parametrų analizė po metų ir modulių Nr. 9-10 po pusės metų pateikta 19 pav.

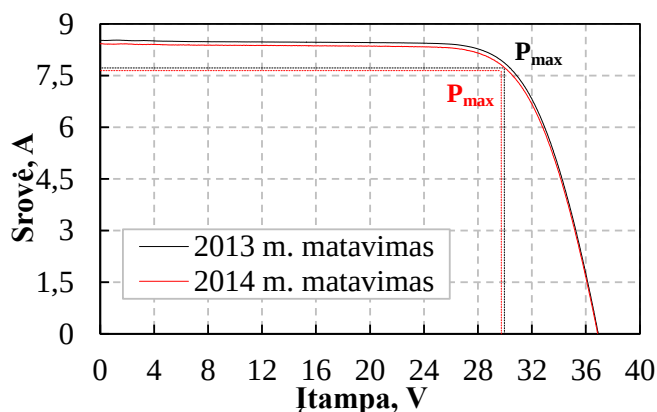


19 pav. 2014 m. išmatuotų modulių elektrinių parametrų skirtumų analizė

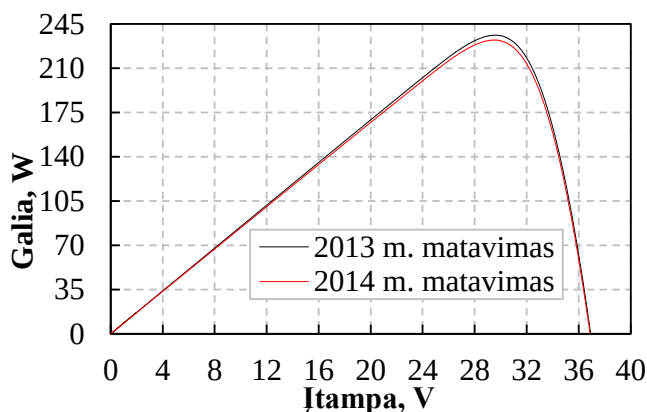
Matyti akivaizdus maksimalios galios P_{max} , atvirosios grandinės įtamos U_{OC} ir užpildos faktorius FF sumažėjimas, bet trumpojo jungimo srovės I_{SC} padidėjimas moduluose Nr. 2 ir Nr. 4-8. Tuo tarpu moduluose Nr. 9 ir Nr. 10 pastebimas žymus I_{SC} sumažėjimas. Nustatyti didžiausi galios nuostoliai moduluose Nr. 1, Nr. 2, Nr. 9 ir Nr. 10.

Ypatingai ženklus modulio Nr. 10 fotoelektrinių savybių pablogėjimas po pusės metų (galia sumažėjo 1,6 %). Tuo tarpu analizuojant matavimus, atliktus po metų, modulio Nr. 2 galia sumažėjo 1,2 % (19 pav.). Modulio Nr. 10 galia sumažėjo 0,4 % lyginant su modulio Nr. 2.

Moduliui Nr. 10 būdingos voltamperinės ir voltvatinės charakteristikos pateiktos 20 ir 21 pav. Matyti maksimalios galios P_{max} ir atvirosios grandinės įtamos U_{OC} sumažėjimas.

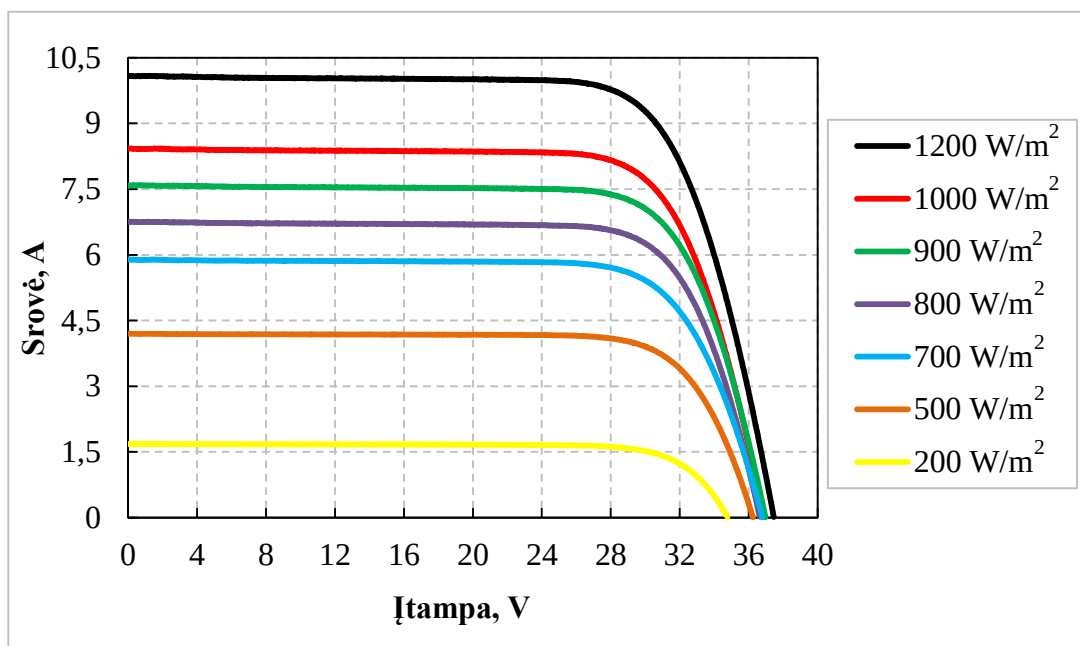


20 pav. Modulio Nr. 10 voltamperinės charakteristikos

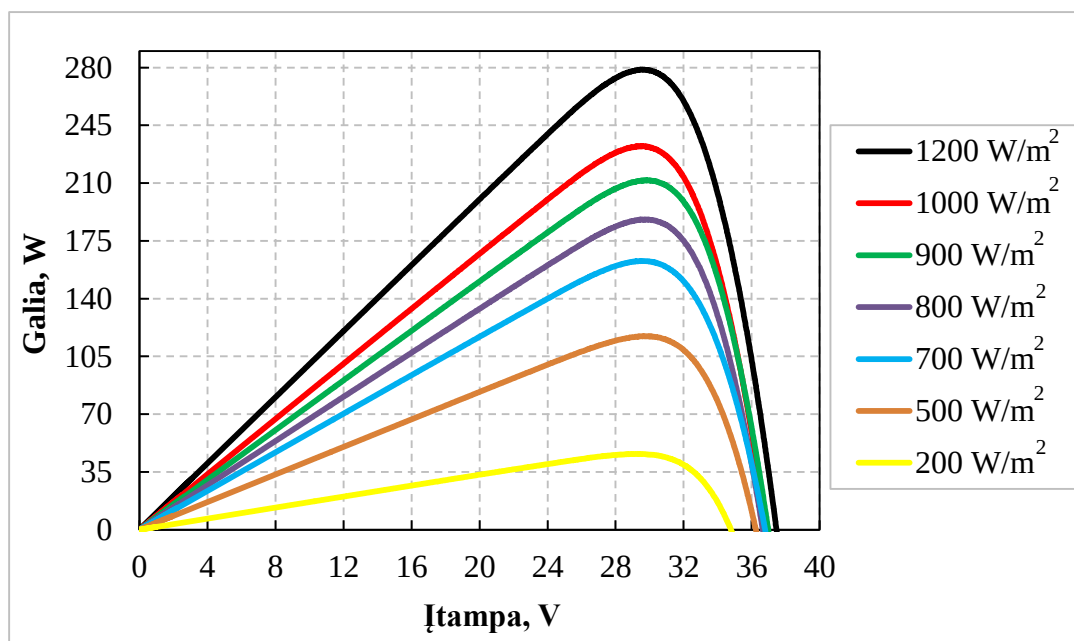


21 pav. Modulio Nr. 10 voltvatinės charakteristikos

Elektrinių parametrų priklausomybės nuo apšvietos (1200 W/m^2 , 1000 W/m^2 , 900 W/m^2 , 800 W/m^2 , 700 W/m^2 , 500 W/m^2 , 200 W/m^2) tyrimai atlikti naudojant modulį Nr. 10. 22 ir 23 pav. pateiktos moduliui būdingos voltamperinės ir voltvatinės charakteristikos. Matyti, akivaizdus trumpojo jungimo srovės, uždarnosios grandinės įtamos ir maksimalios galios padidėjimas.

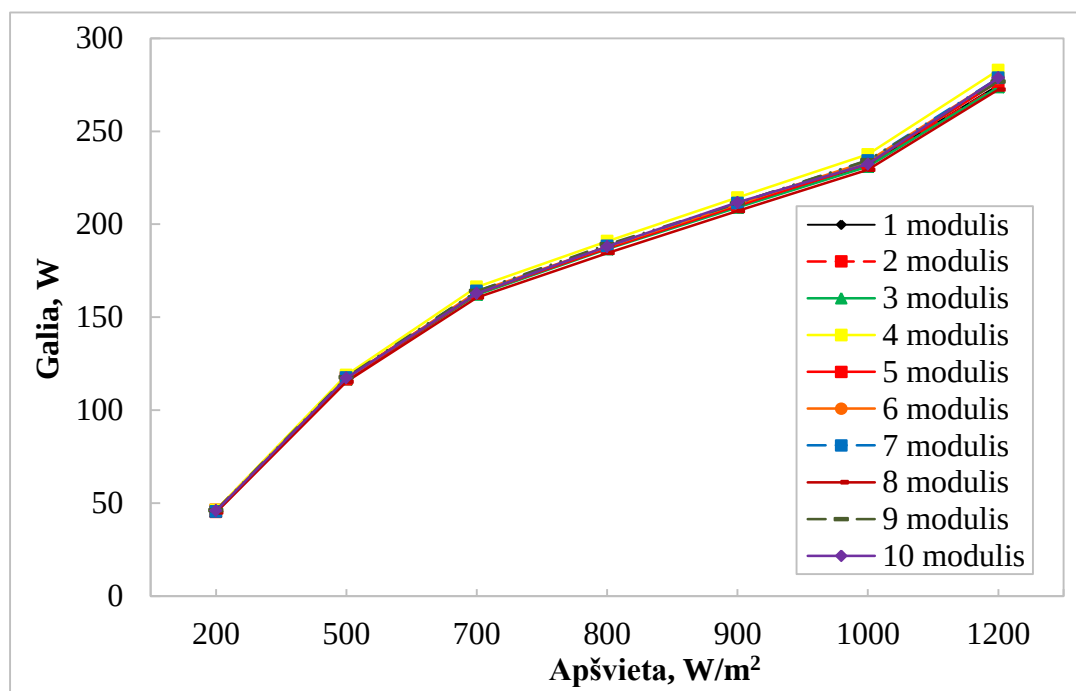


22 pav. Modulio Nr. 10 voltamperinės charakteristikos esant skirtingoms apšvietoms



23 pav. Modulio Nr. 10 voltatinės charakteristikos esant skirtingoms apšvietoms

24 pav. pateikta fotoelektrinio modulio Nr. 10 galios priklausomybė nuo apšvietos. Matyti, kad didėjant apšvietai, didėja ir maksimali galia.

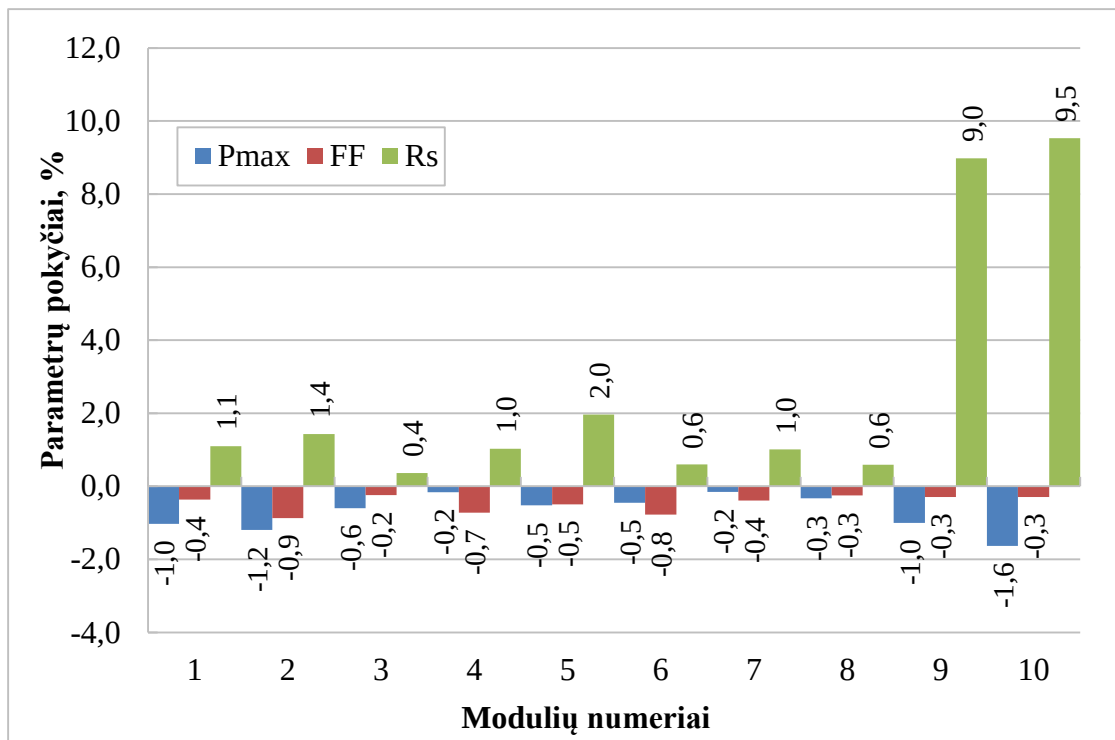


24 pav. Modulio Nr. 10 galios priklausomybė nuo apšvietos

Atsižvelgiant į galios nuostolius, polikristalinius fotoelektrinius modulius galime suskirstyti į dvi grupes. Pirmoji grupė (moduliai Nr. 3, Nr. 4, Nr. 5, Nr. 6, Nr. 7 ir Nr. 8) yra charakterizuojama maksimalios galios P_{max} sumažėjimu, t.y. $<1,0\%$ per metus. Antroji grupė (moduliai Nr. 1 ir Nr. 2)

aprašoma maksimalios galios P_{max} sumažėjimu $\geq 1,0$ % per metus (3 lentelė). Kadangi modulių Nr. 9 ir Nr. 10 galia jau po pusės metų sumažėjo $\geq 1,0$ %, todėl jie irgi priskiriami antrajai grupei (3 lentelė).

Abiejų grupių modulių maksimalios galios P_{max} sumažėjimas susijęs su užpildos faktoriaus FF sumažėjimu dėl nuosekliosios varžos R_s padidėjimo (25 pav.). R_s padidėjo nuo 0,4 % iki 9,5 %, o FF sumažėjo nuo -0,2 % iki -0,9 % (3 lentelė). P_{max} , FF ir R_s analizė po metų (modulių Nr. 1-8) ir po pusės metų (modulių Nr. 9 ir Nr. 10) pateikta 25 pav. Matyti P_{max} ir FF sumažėjimas ir R_s padidėjimas. Didžiausi galios nuostoliai dėl nuosekliosios varžos nustatyti moduliuose Nr. 1, Nr. 2, Nr. 9 ir Nr. 10.



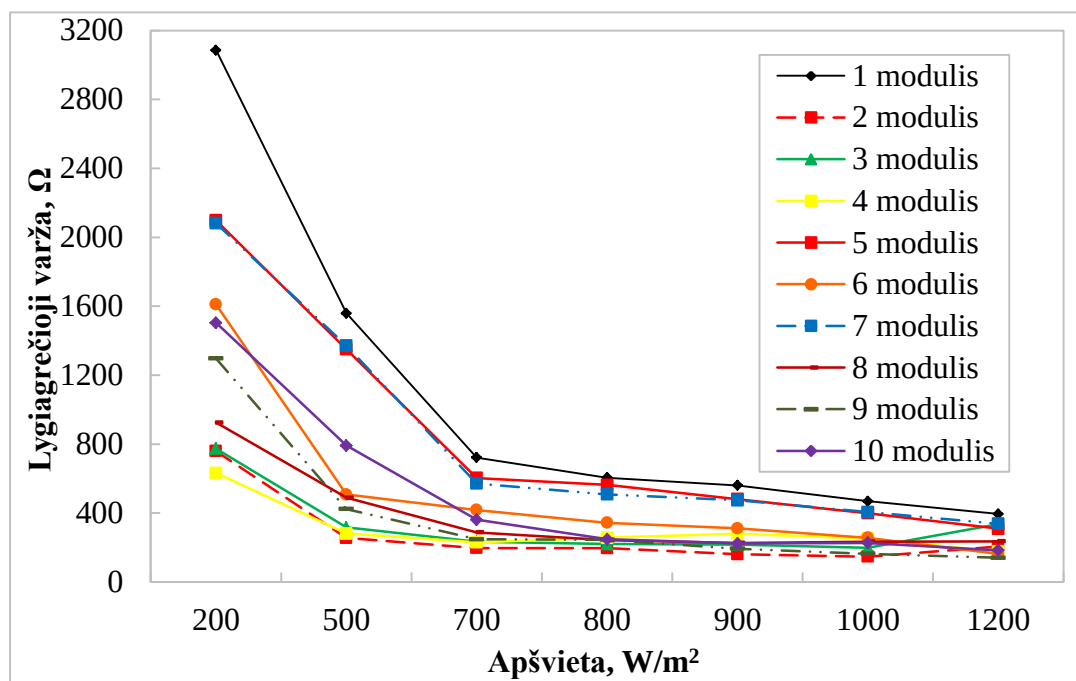
25 pav. Modulių maksimalios galios P_{max} , užpildos faktoriaus FF ir nuosekliosios varžos R_s pokyčių analizė

Pastebėta, kad didelė R_s mažina ir trumpojo jungimo srovę I_{SC} moduliuose Nr. 9 ir Nr. 10 (3 lentelė). Po pusės metų šių modulių I_{SC} sumažėjo nuo -1,2 % iki -1,3 %, padidėjus R_s nuo 9,0 % iki 9,5 %.

Didelė nuoseklioji varža įtakoja voltamperinės charakteristikos kreivės formą ties I - V kreivės išlinkimu ir mažina užpildos faktorių. R_s priklauso nuo nuosekliai sujungtų saulės elementų, apšvietos ir temperatūros. Moduliuose nuoseklioji varža didėja, netinkamai sulitavus elementus ir neteisingai padengiant kontaktinį tinklėlį ant silicio plokštelės. R_s gali sukelti kontaktų varžą tarp metalinių kontaktų ir silicio plokštelės. Saulės elementuose nuoseklioji varža skirstoma į viršutinių ir apatinių kontaktų, emitterio bei bazės varžas. Apatinių (*angl. fingers*) ir viršutinių (*angl. busbars*)

kontaktų varža priklauso nuo matmenų ir medžiagų, iš kurių jie pagaminti, savitosios varžos. Emiterio varžos atsiradimą lemia viršutinių elektrodų išdėstymas virš emiterio sluoksnio. Jeigu elektrodai išdėstyti per plačiai, jie sukelia varžą, o jei per siauriai - padidina atspindžius. Bazės varža priklauso nuo priemaišų kiekio ir matmenų.

Tiriant lygiagrečiosios varžos poveikį, pastebėta (3 lentelė), kad didelis R_{sh} sumažėjimas nuo -30,1 % iki -80,6 % gali lemti užpildos faktoriaus FF sumažėjimą moduluose Nr. 2, Nr. 6 ir Nr. 9. Maža lygiagrečioji varža sukelia galios nuostolius. R_{sh} atsiranda dėl gamybos defektų, o ne dėl saulės elemento struktūros. Didelė lygiagrečioji varža pastebima esant mažoms apšvietoms (26 pav.). Tada generuojama maža fotosrovė ir vyksta krūvininkų rekombinacija.



26 pav. Modulių lygiagrečiosios varžos R_{sh} priklausomybė nuo apšvietos

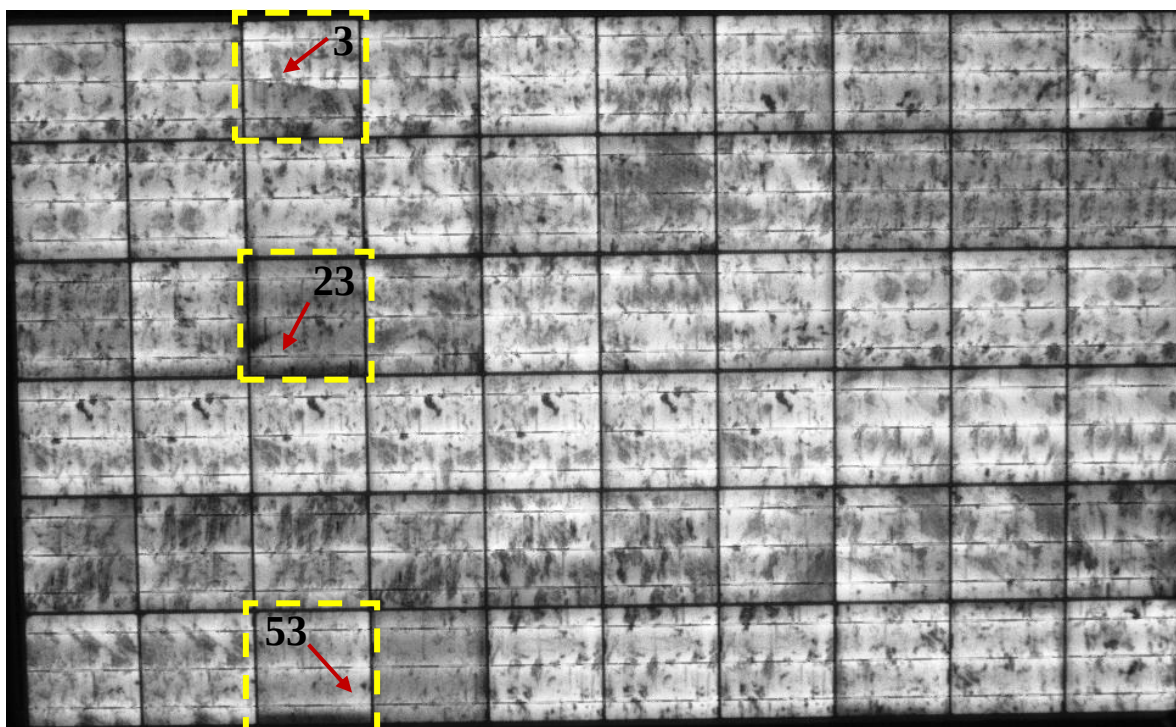
Analizuojant varžos priklausomybę nuo skirtingų apšvietų, matyti (26 pav.), kad didėjant apšvietai, didėja krūvininkų generacija ir lygiagrečioji varža mažėja.

3.4. Elektroluminescencijos tyrimas 2014 m. gegužės-spalio mėn.

Siekiant ištirti fotoelektrinių modulių galios nuostolius dėl atsiradusių lūžių, mikroįtrūkių, metalizacijos ir priemaišų defektų, atlikta modulių kokybės ir būklės patikra. Elektroluminescencijos tyrimų metu nustatyti nauji defektai moduluose Nr. 1-6 ir 8-10. Modulyje Nr. 7 neaptikta jokių defektų.

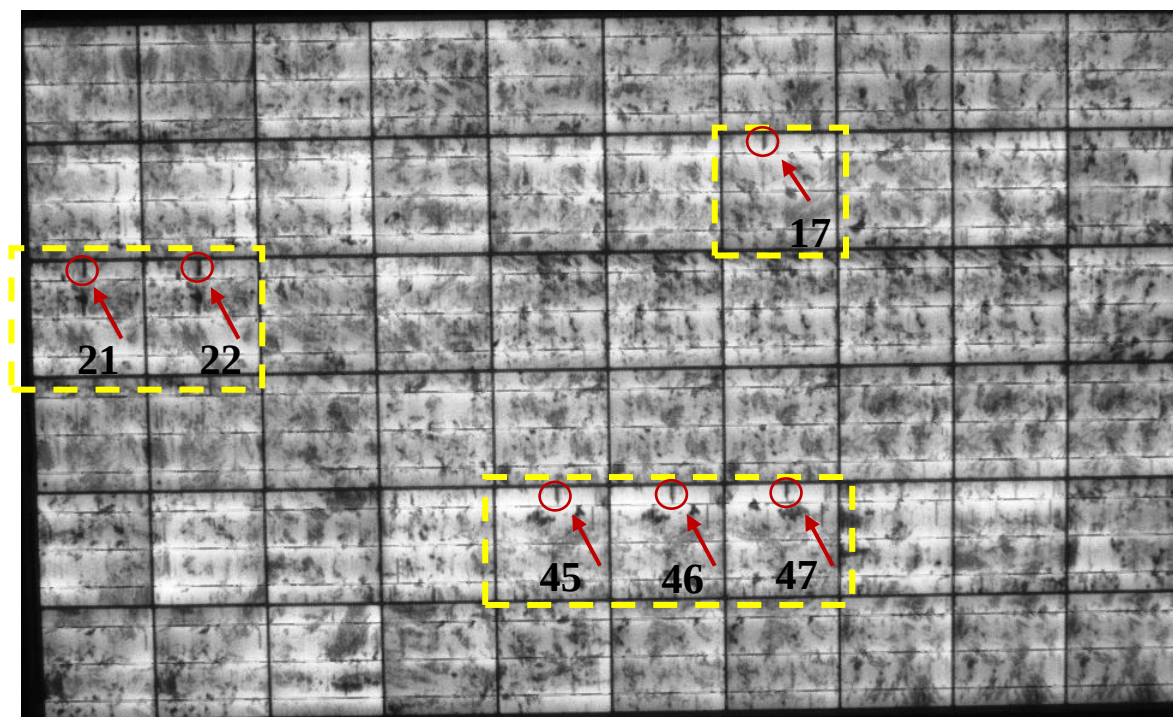
Modulyje Nr. 1 indentifikuotas mikroįtrūkis ir priemaišų defektai (27 pav.). Kadangi nustatyti tik du priemaišų defektai, todėl jų įtaka modulio galiai labai maža. Mikroįtrūkiai gali

susiformuoti modulių gamybos metu, litavimo procese dėl mechaninių ir šiluminių veiksnių. Taip pat šie defektai atsiranda modulių eksploatavimo metu. Mikroįtrūkis saulės elemente mažina modulio generuojamą galią.

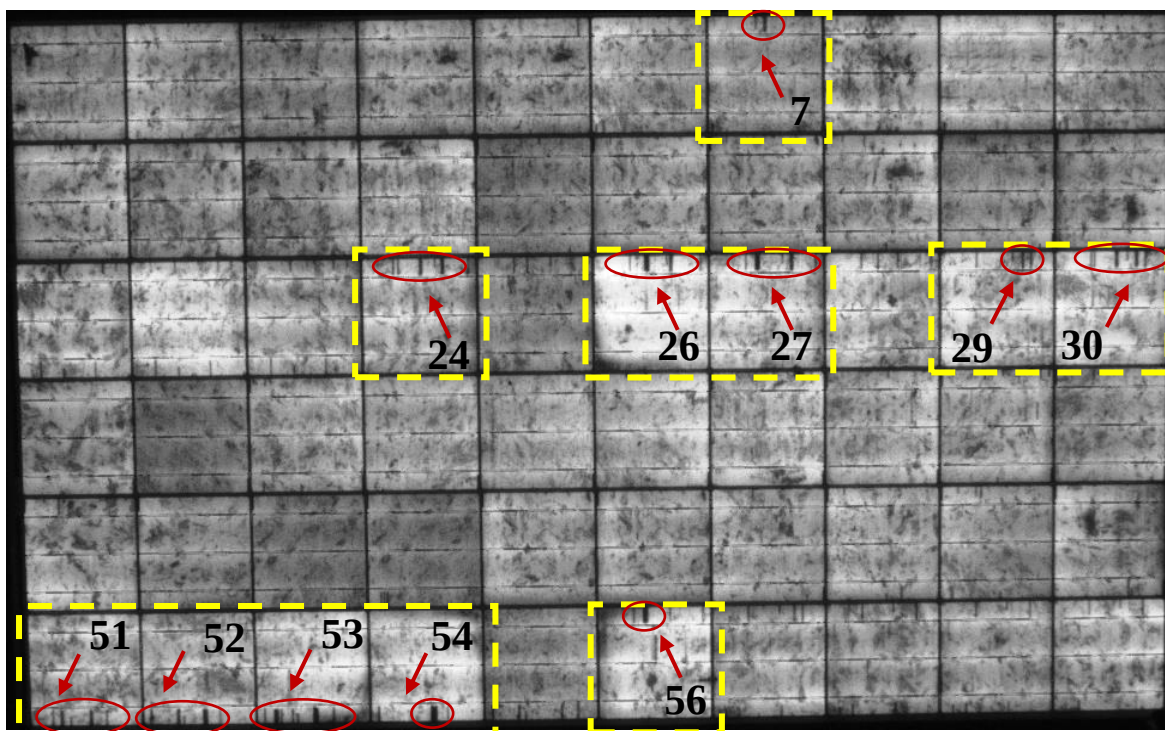


27 pav. Mikroįtrūkis (3), priemaišų defektai (23, 53) modulyje Nr. 1

Moduliuose Nr. 2 ir Nr. 3 pastebėti (28 ir 29 pav.) metalizacijos defektai, kurių įtaka modulio galiai nedidelė.



28 pav. Metalizacijos defektai (17, 21, 22, 45, 46, 47) modulyje Nr. 2



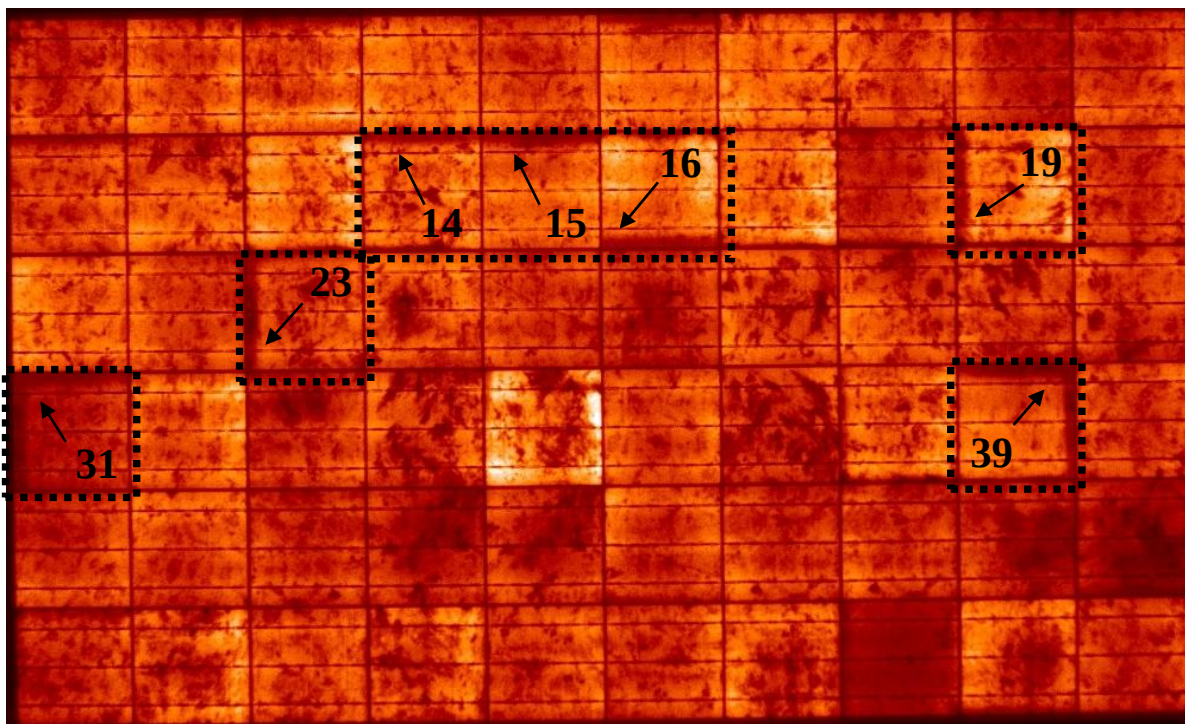
29 pav. Metalizacijos defektai (7, 24, 26, 27, 29, 30, 51, 52, 53, 54, 56) modulyje Nr. 3

Iš elektroluminescencijos matavimų modulyje Nr. 4 indentifikuoti trys mikroįtrūkiai ir vienas lūžis (30 pav.). Šių defektų poveikis modulio efektyvumui didelis ir lemia galios mažėjimą.

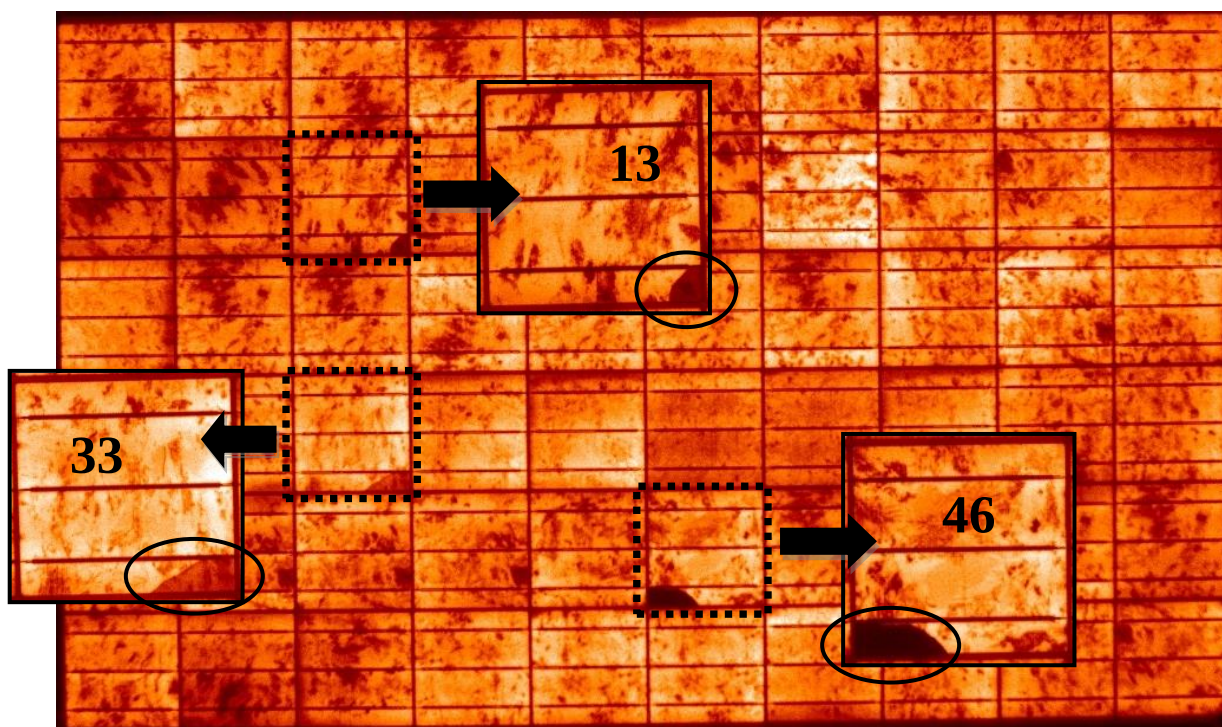


30 pav. Lūžis (35), mikroįtrūkiai (18, 26, 33) modulyje Nr. 4

Palyginus su matavimais atliktais 2013 m. modulyje Nr. 5 pastebėti (31 pav.) du nauji priemaišų defektai (23 ir 31) ir indentifikuotas naujas lūžis (33) modulyje Nr. 6 (32 pav.). Priemaišų įtaka modulio Nr. 5 galios kitimui nedidelė. Lūžiai lemia galios mažėjimą modulyje Nr. 6.

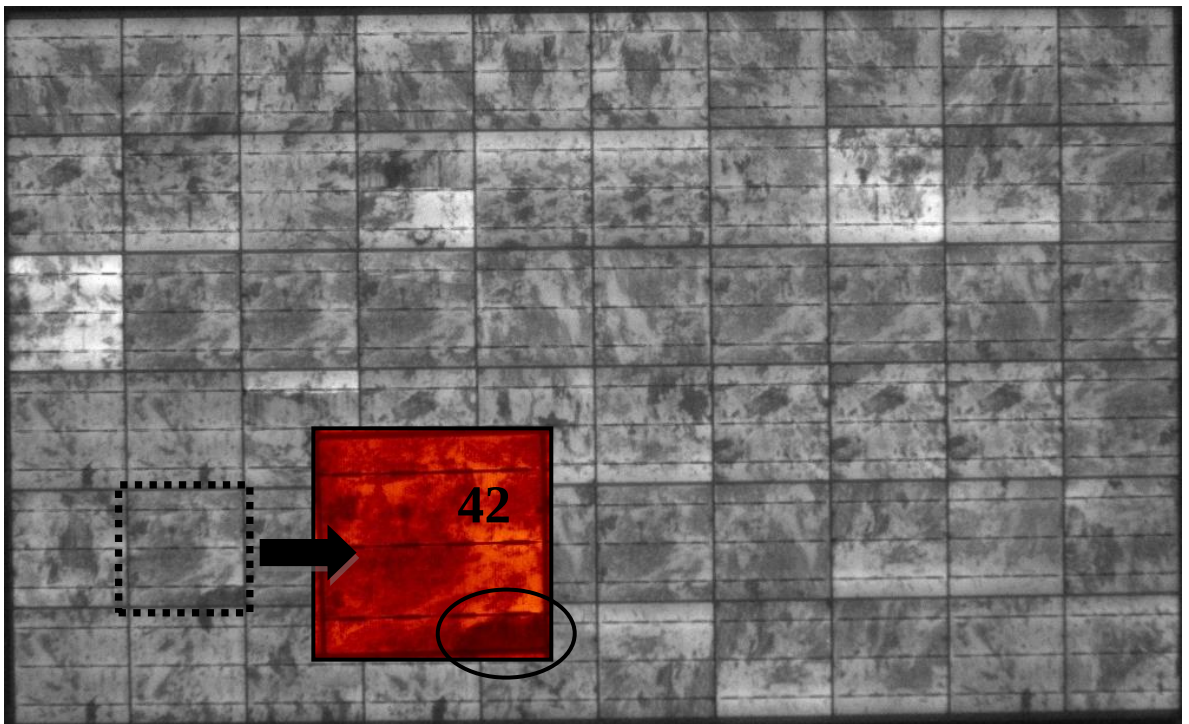


31 pav. Priemaišų defektai (14, 15, 16, 19, 23, 31, 39) modulyje Nr. 5

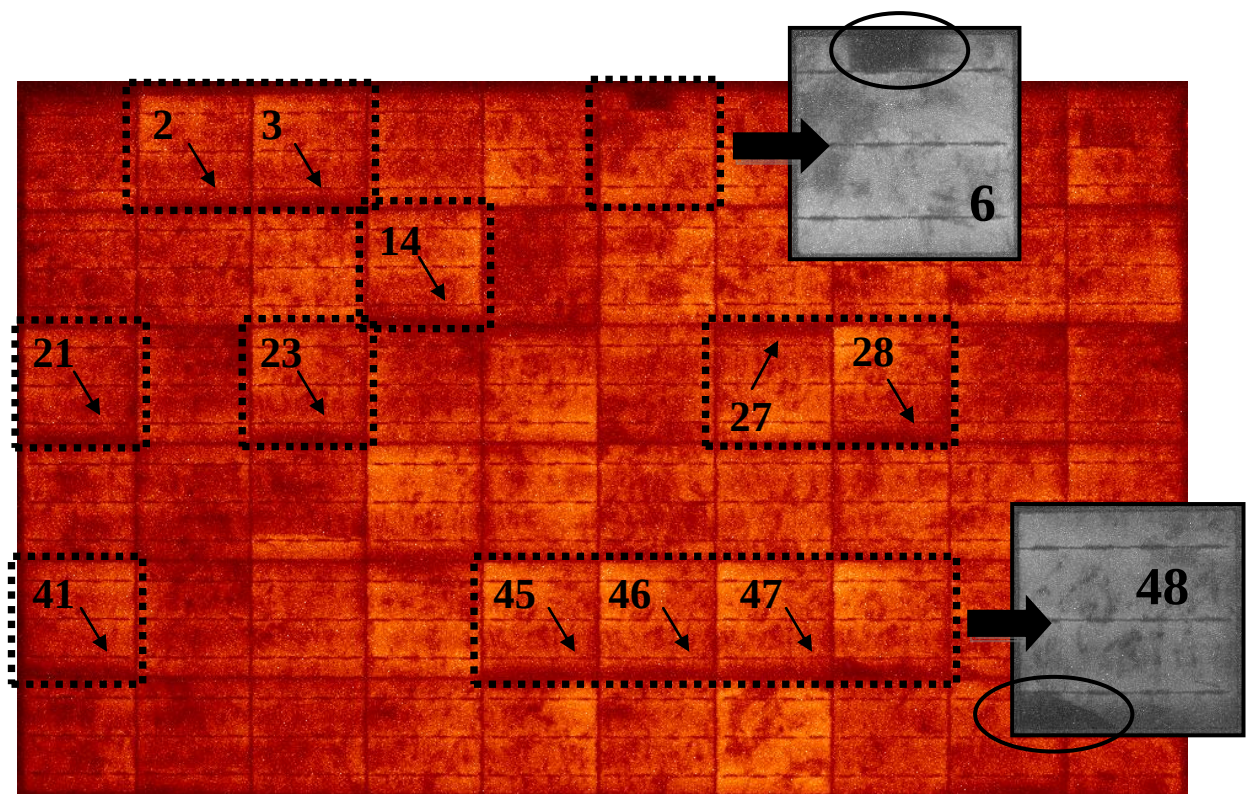


32 pav. Lūžiai (13, 33, 46) modulyje Nr. 6

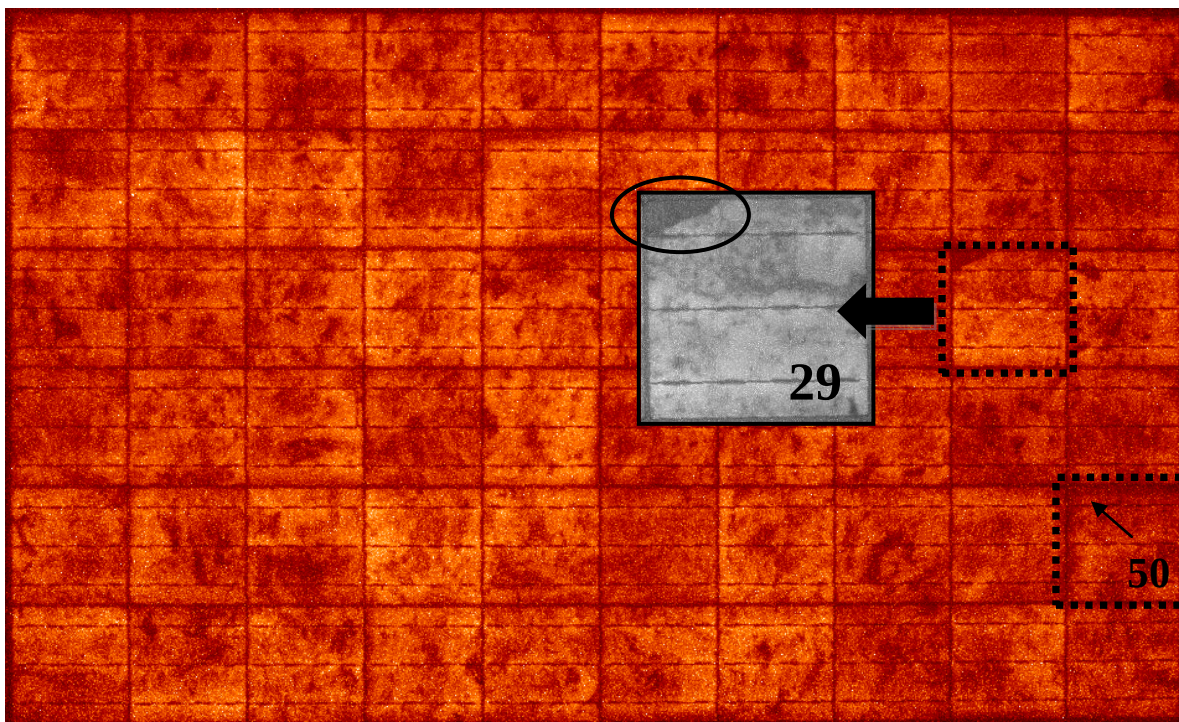
Modulyje Nr. 8 matyti (35 pav.) lūžio defektas, bloginantis modulio fotoelektrines savybes.



33 pav. Lūžis (42) modulyje Nr. 8



34 pav. Lūžis (48), metalizacijos (6), priemaišų (2, 3, 14, 21, 23, 27, 28, 41, 45, 46, 47) defektai modulyje Nr. 9



35 pav. Lūžis (29), priemaišų defektas (50) modulyje Nr. 10

Moduliuose Nr. 9 ir Nr. 10 nustatyti (34 ir 35 pav.) tokie patys defektai, lyginant su matavimais atliktais 2013 m.

3.5. Šlapio modulio srovės nuotekio testas 2014 m. gegužės-spalio mėn.

Atlikus šlapių modulių izoliacijos varžos tyrimus remiantis IEC 61215:2005 standartu, matyti (4 lentelė), kad modulių varžos tankis R_s didesnis negu $40 \text{ M}\Omega\text{m}^{-2}$. Moduliai atlaikė testą, jokių pažeidimų nepastebėta.

4 lentelė. Šlapio modulio izoliacijos varžos matavimo rezultatai

Band. Nr.	Modulio serijinis numeris	Modulio plotas (S), m^2	Paduodama įtampa (U), V	Srovė (I), mA	Išmatuota varža (R), $\text{M}\Omega$	Modulio varža (R_s), $\text{M}\Omega\text{m}^{-2}$
1	8333969	1,634	1000	0,002	500	800
2	8333269	1,634	1000	0,002	500	800
3	8333547	1,634	1000	0,002	500	800
4	1333236	1,619	1000	0,003	333	500
5	1333458	1,619	1000	0,003	333	500
6	1333359	1,619	1000	0,003	333	500
7	1333184	1,619	1000	0,003	333	500
8	1333259	1,619	1000	0,003	333	500

3.6. Išmatuotų modulių maksimalios galios palyginimas

Vertinant fotoelektrinių modulių degradaciją, didžiausias dėmesys skiriamas jų elektrinių parametrų pokyčiams, ypačiai maksimalios galios kitimui. Polikristaliniai moduliai degraduoja, jei jų išmatuota galia lygi arba viršija 1,0 % per metus. Siekiant nustatyti ar moduliai degradavo, atlikta palyginamoji gautų rezultatų analizė, kurioje 2013 m. ir 2014 m. išmatuotų modulių galia lyginama su modulių, instaliuotų 2012 m., gamintojų deklaruotomis galios vertėmis. Taip pat 2013 m. ir 2014 m. išmatuotų modulių galia lyginama tarpusavyje. Apskaičiuoti maksimalios galios pokyčiai, lyginami su modulių gamintojų deklaruotomis galios paklaidomis.

Fotoelektrinių modulių analizė (5 lentelė) rodo, kad nuo 2012 m. iki 2013 m. spalio-lapkričio mėn. ištirtų polikristalinių modulių Nr. 1, Nr. 2, Nr. 3, Nr. 4, Nr. 8, Nr. 9 ir Nr. 10 galia viršija 1,0 %. Svarbu įvertinti, kad nuo instaliuotų ir išmatuotų modulių yra praėję daugiau nei vieneri metai.

5 lentelė. Deklaruotų ir 2013 m. išmatuotų modulių galios pokyčių analizė

Band. Nr.	Modulio serijinis numeris	Modulio gamintojas	Gamintojo deklaruota galia, W	2013 m. išmatuota galia, W	Galios skirtumas, W	Galios skirtumas, %
1	8333969	Yingli Energy YL240P-29b	240 W (-0~+5 W)	234,36	5,64	2,4
2	8333269	Yingli Energy YL240P-29b	240 W (-0~+5 W)	235,03	4,97	2,1
3	8333547	Yingli Energy YL240P-29b	240 W (-0~+5 W)	232,36	7,64	3,2
4	1333236	Rise Solartech SR-P660235	235 W (-0~+3 W)	237,89	-2,89	-1,2
5	1333458	Rise Solartech SR-P660235	235 W (-0~+3 W)	233,83	1,17	0,5
6	1333359	Rise Solartech SR-P660235	235 W (-0~+3 W)	234,80	0,20	0,1
7	1333184	Rise Solartech SR-P660235	235 W (-0~+3 W)	234,58	0,42	0,2
8	1333259	Rise Solartech SR-P660235	235 W (-0~+3 W)	230,02	4,98	2,1
9	1333219	Rise Solartech SR-P660245	245 W (-0~+3 W)	236,78	8,22	3,4
10	1333496	Rise Solartech SR-P660245	245 W (-0~+3 W)	236,22	8,78	3,6

Fotoelektrinių modulių analizė (6 lentelė) rodo, kad, nuo 2013 m. spalio-lapkričio mėn. iki 2014 m. gegužės-spalio mėn. ištirtų modulių, bandinio Nr. 10 galia sumažėjo labiausiai, t.y. 3,85 W. Modulis Nr. 10 labai degraduoja. Analizuojant degradavimą procentais, per antruosius polikristalinių fotoelektrinių modulių eksploatavimo metus galios degradacija svyravo nuo 0,2 % iki 1,6 %. Gauti rezultatai rodo, kad modulių Nr. 1, Nr. 2, Nr. 9 ir Nr. 10 maksimali galia sumažėjo $\geq 1,0$ % per metus. Galios nuostoliai priklauso nuo užpildos faktoriaus degradavimo dėl nuosekliosios varžos padidėjimo ir lygiagrečiosios varžos sumažėjimo.

6 lentelė. 2013 m. ir 2014 m. išmatuotų modulių galios pokyčių analizė

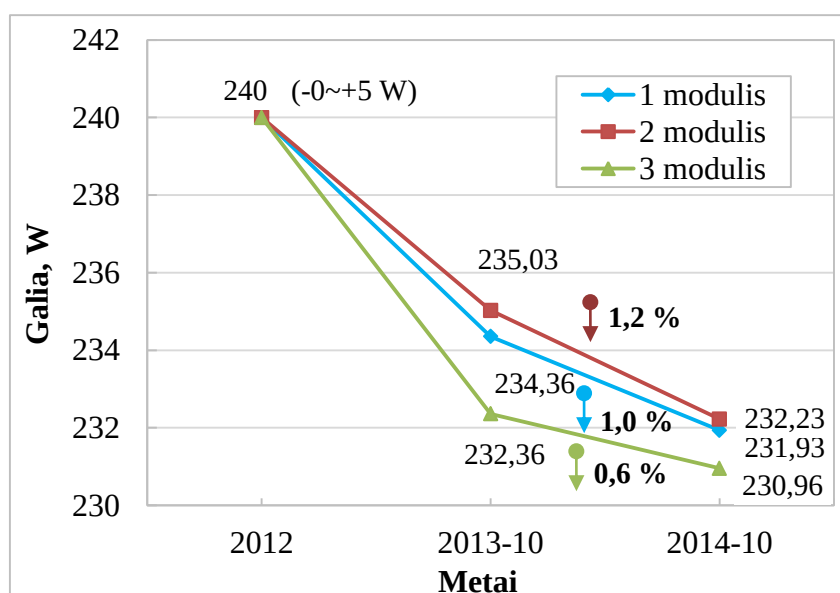
Band. Nr.	Modulio serijinis numeris	Modulio gamintojas	2013 m. išmatuota galia, W	2014 m. išmatuota galia, W	Galios skirtumas, W	Galios skirtumas, %
1	8333969	Yingli Energy YL240P-29b	234,36	231,93	2,42	1,0
2	8333269	Yingli Energy YL240P-29b	235,03	232,23	2,80	1,2
3	8333547	Yingli Energy YL240P-29b	232,36	230,96	1,40	0,6
4	1333236	Rise Solartech SR-P660235	237,89	237,52	0,37	0,2
5	1333458	Rise Solartech SR-P660235	233,83	232,62	1,21	0,5
6	1333359	Rise Solartech SR-P660235	234,80	233,74	1,05	0,5
7	1333184	Rise Solartech SR-P660235	234,58	234,23	0,35	0,2
8	1333259	Rise Solartech SR-P660235	230,02	229,26	0,75	0,3
9	1333219	Rise Solartech SR-P660245	236,78	234,41	2,37	1,0
10	1333496	Rise Solartech SR-P660245	236,22	232,38	3,85	1,6

Fotoelektrinių modulių analizė rodo (7 lentelė), kad nuo 2012 m. iki 2014 m. gegužės-spalio mėn. ištirtų modulių Nr. 1, Nr. 2, Nr. 3, Nr. 8, Nr. 9 ir Nr. 10 galia viršija 2,0 %. Tyrimų laikotarpis daugiau nei du metai.

7 lentelė. Deklaruotų ir 2014 m. išmatuotų modulių galios pokyčių analizė

Band. Nr.	Modulio serijinis numeris	Modulio gamintojas	Gamintojo deklaruota galia, W	2014 m. išmatuota galia, W	Galios skirtumas, W	Galios skirtumas, %
1	8333969	Yingli Energy YL240P-29b	240 W (-0~+5 W)	231,93	8,07	3,4
2	8333269	Yingli Energy YL240P-29b	240 W (-0~+5 W)	232,23	7,77	3,2
3	8333547	Yingli Energy YL240P-29b	240 W (-0~+5 W)	230,96	9,04	3,8
4	1333236	Rise Solartech SR-P660235	235 W (-0~+3 W)	237,52	-2,52	-1,1
5	1333458	Rise Solartech SR-P660235	235 W (-0~+3 W)	232,62	2,38	1,0
6	1333359	Rise Solartech SR-P660235	235 W (-0~+3 W)	233,74	1,26	0,5
7	1333184	Rise Solartech SR-P660235	235 W (-0~+3 W)	234,23	0,77	0,3
8	1333259	Rise Solartech SR-P660235	235 W (-0~+3 W)	229,26	5,74	2,4
9	1333219	Rise Solartech SR-P660245	245 W (-0~+3 W)	234,41	10,59	4,3
10	1333496	Rise Solartech SR-P660245	245 W (-0~+3 W)	232,38	12,62	5,2

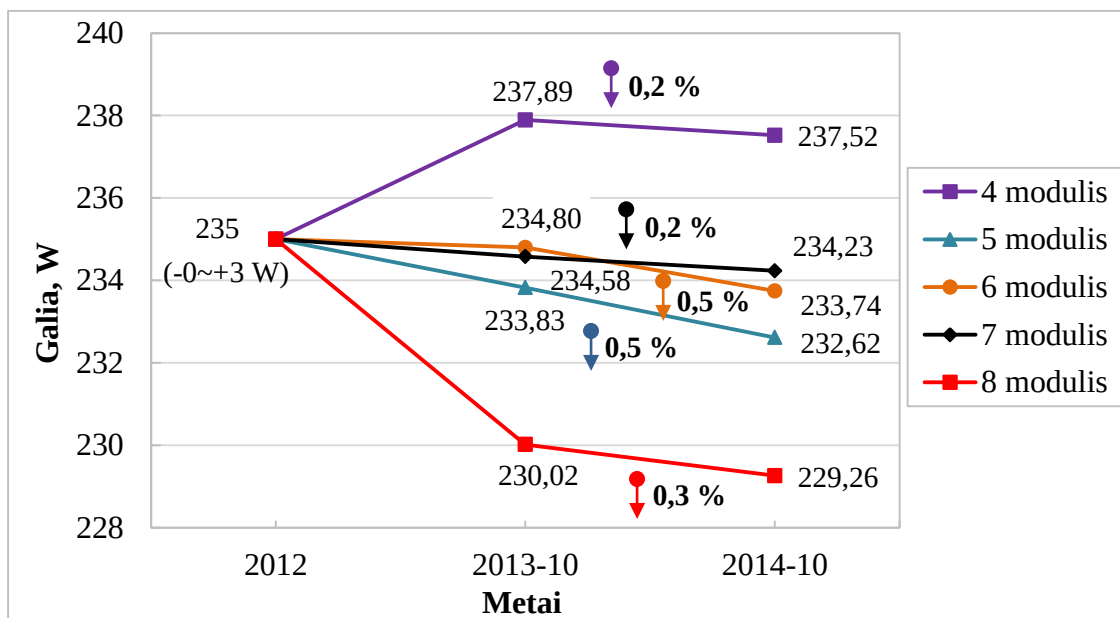
Graike (36 pav.) vaizduojami fotoelektinių modulių Nr. 1, Nr. 2 ir Nr. 3 galios kitimas.



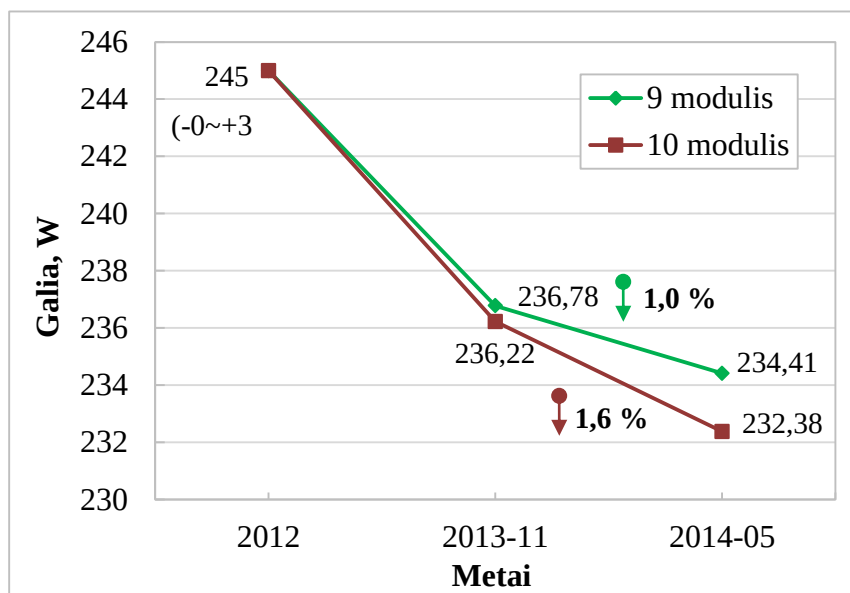
36 pav. Modulių Nr. 1, Nr. 2 ir Nr. 3 galios kitimas nuo 2012 m. iki 2014 m.

Matyti, kad nuo 2013 m. iki 2014 m. modulių Nr. 1 ir Nr. 2 galia sumažėjo $\geq 1,0\%$, o modulio Nr. 3 – $0,6\%$. Moduliai Nr. 1 ir Nr. 2 pradeda degraduoti.

Modulių Nr. 4, Nr. 5, Nr. 6, Nr. 7 ir Nr. 8 galios kitimas nuo 2012 m. iki 2014 m. pateiktas 37 pav. Matyti, kad nuo 2013 m. iki 2014 m. visų fotoelektrinių modulių maksimali galia sumažėjo mažiau nei $1,0\%$. Vadinasi, moduliai nedegraduoja.



37 pav. Modulių Nr. 4, Nr. 5, Nr. 6, Nr. 7 ir Nr. 8 galios kitimas nuo 2012 m. iki 2014 m.



38 pav. Modulių Nr. 9 ir Nr. 10 galios kitimas nuo 2012 m. iki 2014 m.

Grafike (38 pav.) matomas modulių Nr. 9 ir Nr. 10 galios kitimas nuo 2012 m. iki 2014 m. Matyti, kad nuo 2013 m. lapkričio mėn. iki 2014 m. gegužės mėn. modulio Nr. 9 galia sumažėjo $1,0\%$, o modulio Nr. 10 – $1,6\%$. Po pusės metų išmatuoti moduliai degraduoja.

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

Remiantis fotoelektrinių modulių maksimalios galios nustatymo, modulio veikimo esant žemoms apšvietoms, šlapio modulio srovės nuotekio ir elektroliuminescencijos spektro registravimo tyrimų rezultatais, galima konstatuoti tokius **rezultatus**:

- Fotoelektrinių modulių Nr. 9 ir Nr. 10 didelis maksimalios galios P_{max} sumažėjimas (nuo -1,0 % iki -1,6 %) per pusę metų, priklauso nuo trumpojo jungimo srovės I_{SC} sumažėjimo (nuo -1,2 % iki -1,3 %), kurį lemia saulės elementų lūžiai ir mikroįtrūkiai. Taip pat galios nuostolius lemia užpildos faktoriaus FF sumažėjimas (-0,3 %) ir žymus nuoseklosios varžos R_s padidėjimas (nuo 9,0 % iki 9,5 %) po pusės metų.
- Fotoelektrinių modulių Nr. 1 ir Nr. 2 maksimalios galios P_{max} sumažėjimas (nuo -1,0 % iki -1,2 %) per metus, priklauso nuo užpildos faktoriaus FF sumažėjimo (nuo -0,4 % iki -0,9 %) dėl nuoseklosios varžos R_s padidėjimo (nuo 1,1 % iki 1,4 %).
- Fotoelektrinių modulių Nr. 3, Nr. 4, Nr. 5, Nr. 6, Nr. 7 ir Nr. 8 maksimalios galios P_{max} sumažėjimas (nuo -0,2 % iki -0,6 %), mažiau nei 1,0 % per metus, priklauso nuo trumpojo jungimo srovės I_{SC} padidėjimo (nuo 0,4 % iki 1,1 %), kurį lemia padidėjusi aplinkos temperatūra. Taip pat galios nuostoliai priklauso nuo užpildos faktoriaus FF sumažėjimo (nuo -0,2 % iki -0,8 %), atsižvelgiant į nuoseklosios varžos R_s padidėjimą (nuo 0,4 % iki 2,0 %) ir lygiagrečiosios varžos R_{sh} sumažėjimą (nuo -3,2 % iki -30,7 %).

Remiantis atliktų tyrimų rezultatais galima konstatuoti tokias **išvadas**:

- Fotoelektrinių modulių gamintojų deklaruota galia nesutampa su išmatuotų modulių maksimaliomis galiomis. Siūloma rinktis modulius, išmatuotus testavimo ir sertifikavimo centro "TUV Rheinland".
- Polikristalinių fotoelektrinių modulių maksimali galia per metus degraduoja 1,0 %. Atlikus dešimties modulių matavimus, nustatyta, kad iš jų degraduoja keturi moduliai. Vadinasi, saulės jėgainė, instaliuota Lietuvoje, degraduoja.
- Fotoelektrinių modulių defektai galėjo atsirasti modulių transportavimo, montavimo ir eksploatavimo metu. Siūloma prieš instaliuojant modulius, atlikti modulių kokybės ir būklės patikrą elektroliuminescencijos kontrolės sistema.
- Siekiant, didinti fotoelektrinių modulių patikimumą bei tarnavimo laiką, siūloma atlikti modulių maksimalios galios nustatymo standartinėmis testavimo sąlygomis tyrimus ir stebėti modulių veikimą esant vidutinėms ir žemoms apšvietoms: 700 W/m², 500 W/m², 200 W/m².

- Fotoelektrinių modulių defektai galėjo atsirasti modulių gamybos metu. Sparčią fotoelektrinių modulių degradaciją galėjo sukelti litavimo galvos ir jos prispaudimo sistemos defektai, netinkamas ir nepakankamas litavimo fliuso ir saulės elementų kontaktinio tinkelio litavimo vietose santykis, sena EVA polimerinė plėvelė. Siūloma sudaryti modulių gamybos kokybės kontrolę ir periodiškai stebėti gamybos procesus, mažinančius modulių elektrinių charakteristikų blogėjimą. Rekomenduojama atlikti polimerizacijos laipsnio testus, šiluminės analizės tyrimus skirtuminiu skenuojančiu kalorimetru ir saulės elementų kontaktinių juostelių bei EVA plėvelės adhezijos jėgos matavimus.
- Norint išvengti fotoelektrinių modulių kontaktinių dalių ir jungiamųjų laidų korozijos agresyviomis aplinkos sąlygomis, siūloma atlikti šlapio modulio srovės nuotekio testą, padėsiantį nustatyti modulių izoliacijos varžą.
- Siekiant užtikrinti modulių optimalų veikimą, būtina laikytis modulių priežiūros sąlygų: dulkių plovimo ir nuvalymo, sniego ir ledo valymo, šešėlių naikinimo.

Pagrindinės išvados ir rekomendacijos:

1. Nustatyta, kad lūžiai patys esmingiausi defektai, labiausiai lemiantys fotoelektrinių modulių degradaciją. Šie defektai aptikti penkiuose moduluose: Nr. 4, Nr. 6, Nr. 8, Nr. 9 ir Nr. 10. Lūžiai lemia 0,7 % vidutinius galios nuostolius.
Rekomenduojama parengti naujas fotoelektrinių modulių saugaus transportavimo ir montavimo instrukcijas. Instrukcijose turi būti pateikti modulių tvirtinimo transporto priemonėje ir instaliavimo nurodymai, mechaniniai (sniego ir vėjo apkrovos, vietovės parinkimo, tvirtinimo metodų) ir elektriniai (įžeminimo, elektros instaliacijos) reikalavimai. Atliekant modulių išmontavimą, būtina laikytis sistemos išjungimo saugos taisyklių.
2. Nustatyta, kad mikroįtrūkiai yra antrasis defektų tipas, lemiantis fotoelektrinių modulių degradaciją. Šie defektai aptikti dviejuose moduluose: Nr. 1 ir Nr. 4. Mikroįtrūkiai lemia 0,6 % vidutinius galios nuostolius.
Rekomenduojama parengti fotoelektrinių modulių eksploatavimo instrukcijas ir modulių gamybos proceso kokybės kontrolės sistemą.
3. Nustatyta, kad metalizacijos defektai yra trečiasis defektų tipas, lemiantis fotoelektrinių modulių degradaciją. Šie defektai aptikti trijuose moduluose: Nr. 2, Nr. 3 ir Nr. 9. Metalizacijos defektai lemia 0,9 % vidutinius galios nuostolius.

Rekomenduojama sudaryti naują fotoelektrinių modulių gamybos proceso kokybės kontrolę, sudarytą iš saulės elementų kontaktų formavimo reikalavimų, saulės elementų litavimo instrukcijų, bei modulių laminavimo proceso nurodymų.

4. Nustatyta, kad priemaišų defektai yra ketvirtasis defektų tipas, lemiantis fotoelektrinių modulių degradaciją. Šie defektai aptikti keturiuose moduluose: Nr. 1, Nr. 5, Nr. 9 ir Nr. 10. Priemaišų defektai lemia 1,0 % vidutinius galios nuostolius.

Rekomenduojama sudaryti saulės elementų gamybos proceso kokybės kontrolę.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Bai J., Liu S., Hao Y., Zhang Z., Jiang M., Zhang Y. (2014) Development of a new compound method to extract the five parameters of PV modules. *Energy Conversion and Management* 79, 294–303.

Berman, D., Faiman, D., (2007) EVA browning and the time-dependence of I–V curve parameters on PV modules with and without mirror enhancement in a desert environment. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 45 (4), 401–412.

Bosco, N. (2010) Reliability Concerns Associated with PV Technologies. *National Renewable Energy Laboratory*.

Ciulla G., Lo Brano V., Di Dio V., Cipriani G. (2014) A comparison of different one-diode models for the representation of I–V characteristic of a PV cell. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32, 684–696.

Dallas, W., Polupan, O., Ostapenko, S. (2007) Resonance ultrasonic vibrations for crack detection in photovoltaic silicon wafers. *Measurement Science and Technology* 18, 852–858.

De Soto W., Klein S.A., Beckman W.A. (2006) Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Sol. Energy* 80, 78–88.

Di Vincenzo M. C., Infield D. (2013) Detailed PV array model for non-uniform irradiance and its validation against experimental data. *Solar Energy* 97, 314–331.

EPIA: European Photovoltaic Industry Association. (2014) Market Report 2013.

Huld T., Friesen G., Skoczek A., Kenny R. P., Sample T., Field M., Dunlop E. D. (2011) A power-rating model for crystalline silicon PV modules. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 95, 3359–3369.

IEC 60904-9:2007. Photovoltaic devices – Part 9: Solar simulator performance requirements (IEC 60904-9:2007).

IV Curve [interaktyvus] 2014. [žiūrėta 2014 m. balandžio 6 d.] Prieiga per internetą: < <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>>.

Jansen, K.W., Delahoy, A.E. (2003) A laboratory technique for the evaluation of electrochemical transparent conductive oxide delamination from glass substrates. *Thin Solid Films* 423, 153–160.

Kajari-Schroder, S., Kunze, I., Kontges, M. (2012) Criticality of cracks in PV modules. *Energy Procedia* 27, 658–663.

Kempe, M.D. (2010) Ultraviolet test and evaluation methods for encapsulants of photovoltaic modules. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 94, 246–253.

Kempe, M.D. (2006) Modelling the moisture ingress into photovoltaic modules. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90, 2720–2738.

Kempe, M.D. (2005) Control of Moisture Ingress into Photovoltaic Modules. In: *31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference and Exhibition*, Lake Buena Vista, Florida, January 3–7.

Kojima, T., Yanagisawa, T. (2004) The evaluation of accelerated test for degradation a stacked a-Si solar cell and EVA films. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 81 (1), 119–123.

Litgrid [interaktyvus] 2014. [žiūrėta 2014 m. gegužės 31 d.] Prieiga per internetą: <<http://www.litgrid.eu>>.

LST EN 61215:2005. Antžeminiai fotovoltiniai (PV) moduliai iš kristalinio silicio. Projektavimo įvertinimas ir tipo patvirtinimas (IEC 61215:2005). Lietuvos Standartizacijos Departamentas.

Luque A., Hegedus S. (2003) Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. *John Wiley & Sons Ltd*, England, ISBN: 0471-49-196-9, 61–63, 295–297.

Ma T., Yang H., Lu L. (2014) Development of a model to simulate the performance characteristics of crystalline silicon photovoltaic modules/strings/arrays. *Solar Energy* 100, 31–41.

Meral M.E., Dincer F. (2011) A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 2176–2184.

Munoz, M.A., Alonso-Garcia, M.C., Nieves, V., Chenlo, F. (2011) Early degradation of silicon PV modules and guaranty conditions. *Solar Energy* 85, 2264–2274.

Ndiaye A., Charki A., Kobi A., Kebe C.M.F., Ndiaye P.A., Sambou V. (2013) Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review. *Solar Energy* 96, 140–151.

Oreski, G., Wallner, G.M., (2009) Evaluation of the aging behavior of ethylene copolymer films for solar applications under accelerated weathering conditions. *Solar Energy* 83, 1040–1047.

Osterwald, C.R., Anderberg, A., Rummel, S., Ottoson, L. (2002) Degradation Analysis of Weathered Crystalline-Silicon PV Modules. In: *29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, New Orleans, Louisiana.

Osterwald, C.R., McMahon, T.J. (2009) History of Accelerated and Qualification Testing of Terrestrial Photovoltaic Modules: A Literature Review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 17 (1), 11–33.

Realini, A. (2003) Mean Time Before Failure of Photovoltaic Modules. MTBF - PVm, *Federal Office for Education and Science*, Final Report BBW 99.0579, June.

Singh G.K. (2013) Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review. *Energy* 53, 1–13.

Skoczek, A., Sample, T., Dunlop, E.D., (2009) The Results of Performance Measurements of Field-aged Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 17, 227–240.

Skoplaki E., Palyvos J.A. (2009) On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy* 83, 614–624.

Smith R.M., Jordan D.C., Kurtz S.R. (2012) Outdoor PV Module Degradation of Current-Voltage Parameters. *2012 Renewable Energy Forum*, Denver, Colorado.

Vazquez, M., Ignacio, R.S. (2008) Photovoltaic Module Reliability Model Based on Field Degradation Studies. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 16 (5), 419–433.

Wohlgemuth, J.H., Kurtz, S. (2011) Reliability Testing Beyond Qualification as a Key Component in Photovoltaic's Progress Toward Grid Parity. In: *IEEE International Reliability Physics Symposium*, Monterey, California, April 10–14.

Wolf P., Benda V. (2013) Identification of PV solar cells and modules parameters by combining statistical and analytical methods. *Solar Energy* 93, 151–157.