

**VILNIAUS UNIVERSITETAS**  
**FIZIKOS FAKULTETAS**  
**PUSLAIDININKIŲ FIZIKOS KATEDRA**

Žygimantas Vosylis

**AAA KLASĖS SAULĖS IMITATORIAUS KŪRIMAS NAUDOJANT DIDELĖS GALIOS  
ŠVIESTUKUS IR VEIDRODŽIŲ SISTEMĄ, BEI JO SAVYBIŲ TYRIMAS**

Medžiagotyros ir puslaidinikių fizikos  
studijų programa

Studentas	Žygimantas Vosylis
Darbo vadovas	dr. Vincas Tamošiūnas
Recenzentas	dr. Pranciškus Vitta
Katedros vedėjas	prof. habil. dr. Gintautas Tamulaitis

Vilnius, 2017

## Turinys

<b>Įvadas</b> .....	<b>3</b>
<b>1. Literatūros apžvalga</b> .....	<b>4</b>
1.1 IEC standartas saulės imitatorių kokybės įvertinimui .....	4
1.2 Didelio ploto imitatoriaus modeliui keliami reikalavimai .....	5
1.3 Standartinės testavimo procedūros .....	6
1.3.1 Spektrinio atitikimo tyrimas .....	6
1.3.2 Energinės apšvietos pasiskirstymo netolygumo matavimas .....	6
1.4 Anksčiau sukurti saulės imitatoriai .....	7
<b>2. Darbo metodika</b> .....	<b>9</b>
2.1 Modeliavimo duomenų šaltiniai .....	9
2.1.1 Modeliavimas, pasinaudojant <i>RayTracing</i> duomenimis .....	9
2.1.2 Modeliavimas, panaudojant *.ldt failų duomenis .....	10
2.1.3 Modeliavimas, naudojant išmatuotus spinduliuočių skirstinius .....	10
2.2 Duomenų failų apdorojimas .....	11
2.3 Imitatoriaus su veidrodžių sistema modeliavimas .....	12
2.3.1 „Užlankstymo“ metodas .....	12
2.3.2 Spindulių atspindžio sekimo metodas .....	13
2.4 Lazerio spinduliu indukuota srovė (LBIC) .....	14
2.5 Fotovoltinio elemento atsako modeliavimas .....	14
<b>3. Rezultatai ir jų aptarimas</b> .....	<b>16</b>
3.1 Saulės imitatoriaus su veidrodžių sistema skaitmeninis modeliavimas .....	16
3.2 Surinkto saulės imitatoriaus su veidrodžių sistema savybių matavimai .....	20
3.3 Imitatoriaus maketo tobulinimai .....	22
3.4 Imitatoriaus kuriamos spinduliuotės įvertinimas .....	26
3.4.1 Energinės apšvietos pasiskirstymo netolygumo matavimas .....	27
3.4.2 Spektrinio atitikimo tyrimas .....	28

3.4.3	Laikinio nestabilumo įvertinimas.....	29
3.5	Papildomi tyrimai.....	30
3.5.1	Silicio saulės elemento fotoatsako modeliavimas.....	30
3.5.2	Surinkto saulės imitatoriaus be veidrodžių sistemos matavimai.....	32
3.5.3	Lazerio spindulio indukuotų srovių (LBIC) metodo taikymo galimybių įvertinimas .....	34
	<b>Išvados .....</b>	<b>37</b>
	<b>Literatūros šaltinių sąrašas.....</b>	<b>38</b>
	<b>Santrauka .....</b>	<b>40</b>
	<b>Summary .....</b>	<b>40</b>

## Ivadas

2009 m. įsigaliojus Europos Sąjungos 20/20/20 direktyvai [1], sutelktas didelis dėmesys puslaidininkėms fotovoltinėms technologijoms. Tame tarpe ir saulės elementų testavimui naudojamiems saulės imitatoriams, siekiant sumažinti jų suvartojamos energijos kiekį ir atliekų utilizavimo kaštus.

Šiuo metu imitatoriai, geriausiai atitinkantys AM1.5G [2] standartą, naudoja ksenono išlydžio lempas [3], tačiau dėl santykinai mažo spindulinio našumo, trumpo trumpos veikos trukmės (~ 10000 val.), aukštos kainos, sąlygotos papildomų optinių sistemų, o taip pat ir lempų utilizavimo problemų, šiam tipui plačiai ieškoma alternatyvų. Viena iš jų – saulės imitatoriai su puslaidininkių šviestukų masyvais. Jie yra perspektyvūs dėl kelis kartus ilgesnio šviestukų išbuvimo darbo režime [4] (6 – 12 mėn.), didesnio spindulinio našumo ir galimybės kontroliuoti atskirų šviestukų galią, taip priartinant kuriamą spinduliuotę prie AM1.5G standarto keliamų reikalavimų.

Pirmieji praktikoje naudojami šviestukais paremti saulės imitatoriai pasirodė prieš kelerius metus [5], ir šiais laikais jau yra padaryta nemažai technologinių sprendimų, leidžiančių sukurti aukščiausios klasės prietaisus, atitinkančius įvairius pageidautinus standartus [6]. Vis dėl to, šioje metodikoje susiduriama su tradiciniams imitatoriams nebūdingomis problemomis: spinduliuotės galios trūkumu infraraudonojoje srityje, spektrinio energinės apšvietos tankio pasiskirstymo matavimo plokštumoje priklausomybe nuo šviestuko pozicijos imitatoriuje bei ženkliu energinės apšvietos pasiskirstymo netolygumu [7].

Ankstesniuose tyrimuose [8] nustatyta, jog panaudojus 2486 šešių skirtingų rūšių šviestukus teoriškai galima pagaminti saulės imitatorių, kuriantį spinduliuotę, atitinkančią AM1.5G standarto AAA klasei keliamus reikalavimus. Taip pat, toks imitatorius būtų tinkamas 2 sandūrų perovskito/Si saulės elementams testuoti.

Šio darbo tikslas – suprojektuoti ir pagaminti saulės imitatorių, atitinkantį AAA klasei keliamus reikalavimus, panaudojant didelės galios šviestukus ir veidrodžių sistemą, bei ištirti tokio imitatoriaus savybes.

Darbo eigoje, kompiuterinio modeliavimo metodais siekiama sukurti teorinį modelį, pagal kurį pagamintas saulės imitatorius su veidrodžių sistema generuotų AAA klasės standartus atitinkančią spinduliuotę, surinkus tokį imitatorių išmatuoti jo kuriamos spinduliuotės parametrus ir atlikti reikiamus patobulinimus. Taip pat, skaitmeniškai įvertinti fotoelementų atsaką, didelio ploto saulės imitatoriaus, naudojančio šviestukų modulius perspektyvas, papildomų tyrimų būdų inkorporavimo galimybes.

Norėčiau padėkoti dr. Algirdui Novičkovui (VU TMI) už pagalbą montuojant saulės imitatorių ir gaminant veidrodžių sistemą.

## 1. Literatūros apžvalga

### 1.1 IEC standartas saulės imitatorių kokybės įvertinimui

Įvertinti saulės imitatorių įprasta pasinaudojus vienu iš tarptautinių standartų, tokių kaip ASTM E927–10 [9], JIS C 8912–2011 [10] ir kitų. Šiame darbe remiamasi IEC 60904-9 Ed. 2.0 standartu [2]. Nors skirtinguose standartuose parametrai įvertinami nevienodai, jų matavimų metodikos nurodymuose ir tam tikrose imitatoriaus kokybę skaitinėse vertėse išskiriami trys pagrindiniai kokybės kriterijai: saulės imitatoriaus kuriamos spinduliuotės energinės apšvietos tolygumas tiriamoje matavimų plokštumoje, energinės apšvietos verčių pokytis laiko atžvilgiu (laikinis nestabilumas), taip pat, spektrinis atitikimas su minėtoju AM1.5G spektru. Pagal kiekvieną iš šių kriterijų imitatoriai gali būti priskiriami (gerėjančia tvarka) C, B arba A klasei.

Energinės apšvietos netolygumas nustatomas pagal formulę:

$$T = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100\%, \quad (1)$$

čia  $I_{\max}$  ir  $I_{\min}$  – didžiausia ir mažiausia energinės apšvietos vertė atitinkamai, tiriamoje matavimo plokštumoje. Pagal apskaičiuotą skaitinę vertę  $T$  galima imitatorius išskirti į tris kategorijas (1 lentelė).

Laikinis nestabilumas gali būti trumpalaikis arba ilgalaikis. Įvertinant trumpalaikį nestabilumą, imitatoriaus spinduliuotės galios svyravimai matuojami laiko intervale, per kurį išmatuojama energinės apšvietos vertė matavimo pozicijoje ir vienas saulės elemento voltamperinės charakteristikos taškas. Antruoju atveju, nuokrypiai tiriami daug ilgesniame laiko intervale ir išmatuojama visa VACH, ar net ilgiau. Nestabilumo skaitines vertes taip pat galima apskaičiuoti pagal (1) formulę.

1 lentelė. Saulės imitatorių kokybės klasifikavimas pagal IEC 60904-9 Ed. 2.0 standartą [11].

Klasė	Spektrinio atitikimo vertės, kiekvienam spektro intervalui	Energinės apšvietos pasiskirstymo netolygumas	Laikinis energinės apšvietos nestabilumas	
			Trumpalaikis	Ilgalaikis
A	0,75 – 1,25	2 %	0,5 %	2 %
B	0,60 – 1,40	5 %	2 %	5 %
C	0,40 – 2,00	10 %	10 %	10 %

Apskaičiavus imitatoriaus spinduliuotės, ribotos (400 ÷1100) nm intervale, procentinius energinės apšvietos indėlius į AM1.5G standartu apibrėžtus trumpesnius spektro intervalus nustatomas spektrinės atitikties klasė. Kiekvienam intervalui galima nustatyti individualų įvertinimą pagal standarto spektrą atitinkančių procentinių verčių ir apskaičiuotųjų santykius. Prasčiausias įvertinimas spektro individualiai daliai nulemia bendrą imitatoriaus įvertinimą.

2 lentelė. AM1.5G spektro energinės apšvietos pasiskirstymas (400 ÷1100) nm spektro intervale.

Spektro intervalas, nm	Spinduliuotės galios dalis intervalui, %
400 – 500	18,4
500 – 600	19,9
600 – 700	18,4
700 – 800	14,9
800 – 900	12,5
900 – 1100	15,9

Be šių kriterijų, imitatoriaus kuriamos spinduliuotės energinė apšvieta privalo būti 1000 W/m<sup>2</sup> AM1.5G sąlygoms.

## 1.2 Didelio ploto imitatoriaus modeliui keliami reikalavimai

[12] pateiktame tyrime, gaminant mažam apšviečiamam plotui skirtą imitatorių buvo naudoti šešių tipų didelės galios šviestukai: baltas (*coolwhite*, apimantis didžiąją spektro dalį), mėlynas (*royalblue*, ~450 nm), dviejų tipų raudoni (*deepred*– ~662 nm, *farred*– ~739 nm) ir dviejų tipų IR šviestukai (~850 nm ir ~940 nm). Dėl to, kad daugumos jų spinduliuotės spektrai pakliūna į kelis intervalus (netelpa į vieną 100 nm intervalą), minėtame straipsnyje, sudarius šešias tiesines lygtis ir jas išsprendus, suskaičiuotos pakoreguotos reikalingos kiekvieno šviestuko galios indėlio į bendrą apšvietą vertės (3 lentelė). Kadangi šiame darbe naudojami panašių spektrų šviestukai, modeliuojami rezultatai bet kokiame atstume turės atitikti būtent šias energinės apšvietos vertes.

3 lentelė. Suskaičiuotos reikalingos spinduliuotės galios atskirų šviestukų grupėms pagal [12]

Intervalas, nm	Energinė apšvieta intervalui, W/m <sup>2</sup>	Nustatytas šviestuko indėlis į spektro intervalą, %					
		450 nm	Baltas	662 nm	739 nm	859 nm	950 nm
400-500	184	99	32	-	-	-	-
500-600	199	1	45	-	-	-	-
600-700	184	-	21	100	4	-	-
700-800	149	-	2	-	96	2	-
800-900	125	-	-	-	-	97	8
900-1100	159	-	-	-	-	1	92
Reikalingas apšvieta, W/m <sup>2</sup>		43	441	86	144	114	172

### 1.3 Standartinės testavimo procedūros[13]

Tarptautiniai standartai numato ne tik reikalavimus prietaiso parametrams, bet ir tų parametrų tyrimo metodikoms. IEC 60904-9 standartas penktojo skyriaus įžangoje teigia, jog imitatorių tyrimo metodai turi būti moksliskai ir komerciškai priimtinos procedūros, tačiau neįsprendžia į labai konkrečius rėmus ir leidžia pasirinkti iš kelių plačiai naudojamų matavimo būdų. Tuo tarpu, imitatoriaus kūrėjai turi pateikti informaciją apie naudotus metodus, jeigu kas nors paprašytų.

#### 1.3.1 Spektrinio atitikimo tyrimas

Imitatoriaus kuriamos spinduliuotės spektras turi būti išmatuotas šešiams skirtingams bangų ilgių intervalams (3 lentelė) ir patikrintas kiekvieno intervalo procentinis atitikimas su Saulės spektru. Visi intervalai turi patekti į pagal 1 lentelę nustatomą kategoriją, todėl spektrinį atitikimą lemia didžiausias nukrypimas nuo pageidaujamos vertės. Tiriant spektrus galima naudoti keturis skirtingus metodus:

- a) Spektrometras su gardelinio monochromatoriumi ir diskrečiu detektorium;
- b) CCD ar matricinis spektrometras (naudojamas šiame darbe);
- c) Detektorių su filtrais rinkinys;
- d) Vienas detektorius su keičiamais filtrais.

#### 1.3.2 Energinės apšvietos pasiskirstymo netolygumo matavimas

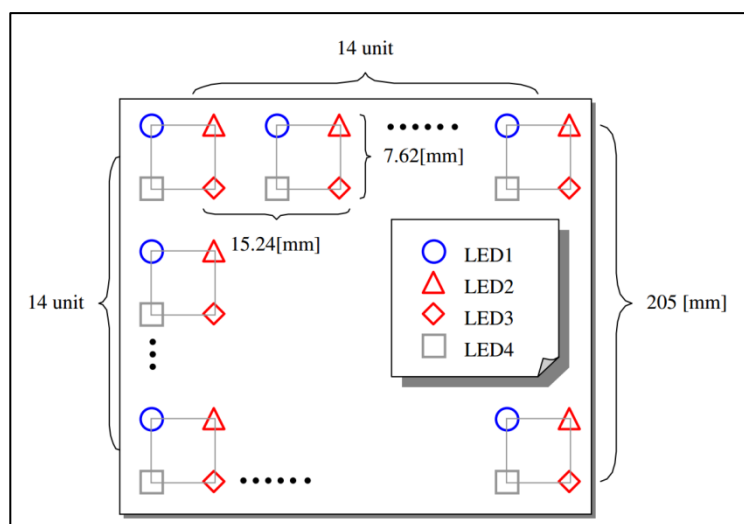
Apšvietos pasiskirstymo netolygumas priklauso nuo atspindžių kiekvienoje testavimo sistemoje, todėl apibendrintų rezultatų negalėtų būti ir kiekvienai matavimo sistemai šis parametras turėtų būti įvertinamas atskirai. Šiuose matavimuose rekomenduojama matuoti kristalinio silicio

elemento ar mini modulio trumpo jungimo srovę. Matavimo plokštuma turi būti suskirstyta bent į 64 lygaus ploto dalis. Jeigu testuojama didelio ploto plokštumoje, vienas matavimo langelis neturi viršyti 400 cm<sup>2</sup>. Erdvinis netolygumas nustatomas pagal (1).

Laikinis nestabilumas nustatomas pagal analogišką formulę.

#### 1.4 Anksčiau sukurti saulės imitatoriai

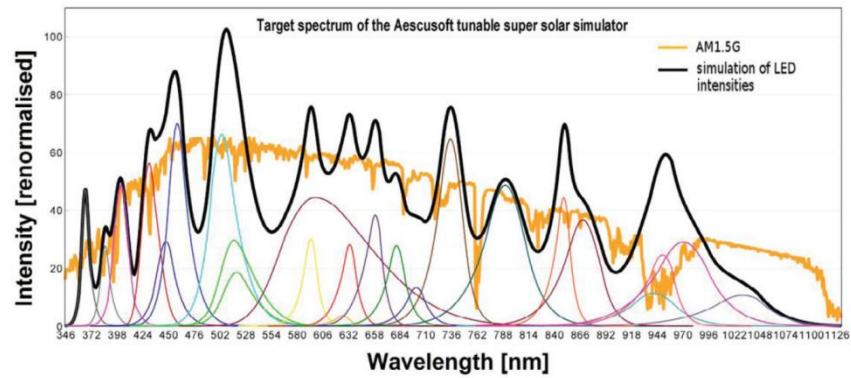
2005 m. pasirodęs Shogo Kohraku ir Kosuke Kurokawa straipsnis [5] buvo vienas iš pirmųjų, kuriame aptariama galimybė sukurti LED šviestukais paremtą saulės imitatorių. Jie naudojo 4 tipų šviestukus: mėlyną (~470 nm), raudoną (~644 nm), infraraudoną (~950 nm) ir baltą (~470 nm ir ~570 nm). Šviestukai buvo išdėstyti (205 × 205) mm<sup>2</sup> plote, kiekviena spalva išdėliota 14 × 14 tinklelyje (viso 784 šviestukai) (1 pav.). Šio modelio rezultatų spektrinis netolygumas, lyginant su standartu buvo šiek tiek didesnis, nei tikėtasi (~5 % kiekvienai spalvai), o monokristalinio silicio saulės elemente gaunama VACH neatitiko apskaičiuotos. Tačiau tuo pačiu šie mokslininkai paklojo pagrindus tolimesniems tokio tipo saulės imitatorių modeliavimams ir tyrimams.



1 pav. Saulės imitatoriaus su keturiais skirtingais šviestukais principinė išdėstymo schema [5]

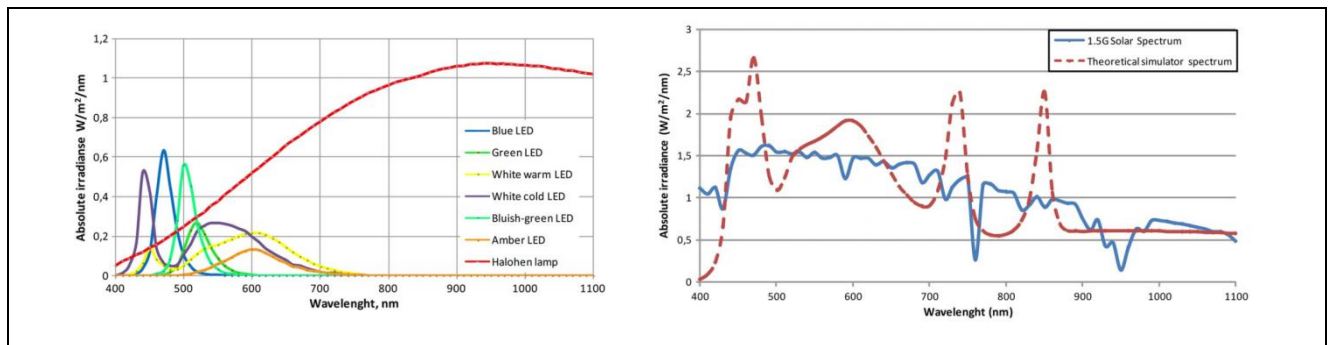
Tolimesniuose tyrimuose bandyta sukurti didelės galios industrinį saulės imitatorių, kurio spektras padengia visą silicio saulės elemento sugerties spektrą [11]. Šiame modelyje atsisakyta balto šviestuko, o tarpą tarp mėlynos ir raudonos spektro linijų užpildė papildomais šviestukais, kas leidžia tiksliau koreguoti imitatoriaus spektrą (2 pav.). Taip pat atkreiptas papildomas dėmesys į ultravioletinę ir infraraudonąją sritis. Iš viso naudoti 23 skirtingi šviestukai. Pasiękti neblogi laikinio stabilumo rezultatai, tačiau apšvietos homogeniškumas ir spektrinis atitikimas dar nesiekė pačios aukščiausios klasės imitatoriams keliamų reikalavimų.





2 pav. Numatytas saulės imitatoriaus spektras [11]. Plonos spalvotos linijos – kiekvieno šviestuko indėlis, juoda linija – imituotas spektras, auksinė linija – AM1.5G standartas

Nors minėtieji imitatoriai pasižymi lengva kontrole, dideliu našumu ir palyginti žema kaina, jie turi vieną gan žymų trūkumą – silpną spinduliuotę infraraudonojoje srityje. Žinoma, tai būtų galima ištaisyti įtraukiant daugiau IR šviestukų, tačiau jie yra labai brangūs. Mažiau kaštų reikalaujantis variantas buvo pademonstruotas Bolonijos universiteto Elektros inžinerijos fakulteto mokslininkų[14]. Jie pagamino hibridinį (halogeninį – LED) imitatorių. Halogeninė lempa didele energine apšvieta plačiai padengia NIR spektrinį ruožą, taip priartinant imitatorių prie B klasės spektrinio atitikimo (3 pav.). Papildomai galima naudoti kelis NIR šviestukus tikslesniam sutapimui. Iš viso buvo naudojami 7 tipų šviesos šaltiniai (įskaitant halogeninę lempą).



3 pav. Atskirų spinduolių emitavimo spektrai (kairėje) ir viso imitatoriaus spektro modelio (dešinėje, punktyras) palyginimas su AM1.5G standartu (dešinėje, ištisinė linija)[14]

## 2. Darbo metodika

### 2.1 Modeliavimo duomenų šaltiniai[8]

Energinės apšvietos skirstinių modeliavimui naudotasi trimis skirtingais pradinių duomenų šaltiniais: *RayTracing* (liet. *spindulių sekimo*) algoritmui skirtais failais, kuriuose aprašomos kelių milijono atskirų spindulių pradinės pozicijos ir sklidimo kryptys; \*.ldt („Elumdat“) failais, nurodančiais erdvinio apšvietos pasiskirstymo priklausomybę nuo kampo su statmeniu, išmatuotais skirstiniais. Modeliuojant naudojantis šių šaltinių informacija tikslumas gali skirtis, tačiau kiekvienas turi savo pranašumų atskiriems šviestukams. Plačiau kiekvienas būdas aptariamas tolesniuose poskyriuose.

#### 2.1.1 Modeliavimas, pasinaudojant *RayTracing* duomenimis[8]

Nesudėtingas *RayTracing* tekstinis dokumentas atrodo maždaug taip („*LedEngin*“ LZA-00B208 – mėlyną šviestuką apibūdinančio failo pradžia):

```
# LightTools APRICOT Alpha4
# Ray Data Export File
lt_rdf_version: 2.0
dataname: untitledRayData
lt_datatype: radiant_power
lt_radiant_flux: 0.9942637
lt_far_field_data: NO
lt_color_info: wavelength
lt_length_units: millimeters
lt_data_origin: 0 0 0
lt_startofdata
-2.503038 -0.4711954 2.518732 -0.6484199 0.09417892 0.7554349 0.9989471 460
0.6854268 1.522974 3.288053 -0.1385022 0.5667895 0.8121372 1.561253 454.383
-0.6822867 -2.452281 2.520718 0.1377671 -0.7909126 0.5962193 0.4302929 465.617
.....
```

Penktojoje eilutėje (*lt\_datatype*) nurodoma, koks fizikinis dydis matuojamas, šiuo atveju – galia. Aštuntojoje - pažymėta, jog taip pat matuojamas bangos ilgis, devintojoje – emitavimopoziciją nurodančių verčių vienetai (šiuo atveju, milimetrai). Taigi, patys duomenys suskirstyti į 8 stulpelius: 1÷3 – spinduliopradinės koordinatės  $[x, y, z]$ ; 4÷6 – spindulio sklidimo krypties vektorius  $[k_x, k_y, k_z]$ ; 7 – spindulio galia (bendruoju atveju – santykiniais vienetais); 8 – spindulio bangos ilgis (nm).

Norint pasiekti patenkinamų rezultatų, kiekvieną dokumentą sudaro virš milijono verčių (atskirų spindulių). Šiame tyrime naudotų didelės galios šviestukų *LedEngin LZ4 Series* duomenis galima rasti gamintojo internetiniame puslapyje [15]keliais formatais, tame tarpe ir čia naudojamą ASCII tipo failą. Baltiems bei mėlyniems šviestukams naudojami failai LZ4-00xW08-1m.txt ir LZ4-00B208-1m.txt atitinkamai. Juose pateikiama apie 1 milijoną atskirų spindulių. Tuo tarpu raudonojo LZ4-00Rx08-5m.txt – apie penkis milijonus. Kaip parodys rezultatai, didesnis spindulių skaičius yra svarbus tolygesniam ir tikslesniam pasiskirstymų modeliavimui plokštumoje.

### **2.1.2 Modeliavimas, panaudojant \*.ldt failų duomenis[8]**

Jei naudojami šviestukai su reflektorais, tokių tikslų teorinių duomenų, kaip *RayTracing* būdu nepavyks sugeneruoti dėl to, kad gamintojai nepateikia tokio formato duomenų, aprašančių kiekvieną spindulį. Tačiau lengvai prieinami kito – \*.ldt formato failai. \*.ldt formatas yra europietiškas \*.ies(angl. *Illuminating Engineering Society*) formato variantas. Kuriant šį failą, gamintojas išmatuotą erdvinio apšvietos pasiskirstymo priklausomybę įrašo į ASCII failą. Jame pirmiausia pateikiami visi matavimų kampai (iki 180°), toliau – apšvieta (bendruoju atveju, santykiniais vienetais)[16].

\*.ies failuose taip pat pateikiama ir santykinio spindulinio srauto priklausomybė nuo kampo plokštumoje. Tai yra reikalinga, kai reflektorius (arba bet koks tiriamas spinduolis) yra nesimetriškas ašies atžvilgiu. Šiame darbe naudojamų reflektorių *LEDiL Boomerang* (LZ4šviestukams) ir *LEDiL Britney-M* (*Bridgelux* šviestukui) asimetriškumas mažas, būtent todėl naudotasi \*.ldt failais. Taip pat pateikiami \*.ies formato duomenys ne taip gerai sutampa su išmatuotais laboratorijos sąlygomis.

### **2.1.3 Modeliavimas, naudojant išmatuotus spinduliuočių skirstinius[8]**

Tiriant išmatuotus šviestukų spinduliuotės pasiskirstymus plokštumoje pastebėta, jog kartais rezultatai ženkliai neatitinka gamintojų pateikiamų skirstinių. Todėl *Bridgelux BXRA* šviestuko be reflektoriaus atveju išmatuotas simetriškas ašies atžvilgiu skirstinys, apšviečiant didelio ploto matavimo plokštumą 540 mm atstumu. Jis gali būti pritaikytas kitokiems matavimo atstumams ir kitokio ploto plokštumoms, interpoliavimo metodais.

## 2.2 Duomenų failų apdorojimas[8]

Šiame darbe visi duomenys apdoroti „Matlab R13“ ir „GNUOctave“ programine įranga.

*RayTracing* tipo failai, siekiant sutaupyti skaičiavimų laiką, pirmiausia nuskaitomi iš ASCII dokumento į *MatLab* kintamąjį. Toliau pagal  $[x,y,z]$  ir  $[k_x,k_y,k_z]$  vertes ir (2) formules suskaičiuojami trys spindulių masyvai: spinduliai, kurių  $k_z < 0$  sklindantys į priešingą pusę nei matavimo plokštumą; spinduliai, kurių  $k$  kampas su ašimi tarp šviestuko ir matavimo plokštumos statmens yra didesnis nei numatyta – nepataiko į baigtinių matmenų plokštumą; spinduliai, kurie pataiko į matavimo plokštumą.

$$x = x_0 + \frac{k_x(h-z_0)}{k_z}; \quad y = y_0 + \frac{k_y(h-z_0)}{k_z} \quad (2)$$

Energinės apšvietos skirstiniai modeliuojami tik su tais spinduliais, kurie pataiko į pasirinktą plokštumą. Teoriškai likusius spindulius būtų galima naudoti šviestukų su reflektoriais modeliavimui, tačiau tam bus naudojamas kitas turimas duomenų formatas. Galų gale, suskaičiuojami spinduliai, pataikantys į pasirinkto dydžio plotelius ir gaunami apšvietos galios skirstiniai.

\*.ies duomenų atveju, kiekvienam plokštumos ploteliui suskaičiuojamas kampas nuo statmens, ir pagal faile pateikiamą intensyvumo nuo kampo priklausomybę interpoliuojant priskiriama galios vertė santykiniais vienetais. Galiausiai atliekamos dvi korekcijos – apšvietos atvirkštinės kvadratinės priklausomybės nuo atstumo ir spinduliuotės sumažėjimo ploteliui pagal kosinuso dėsnį dėl, bendruoju atveju, jos kritimo skirtingu kampu.

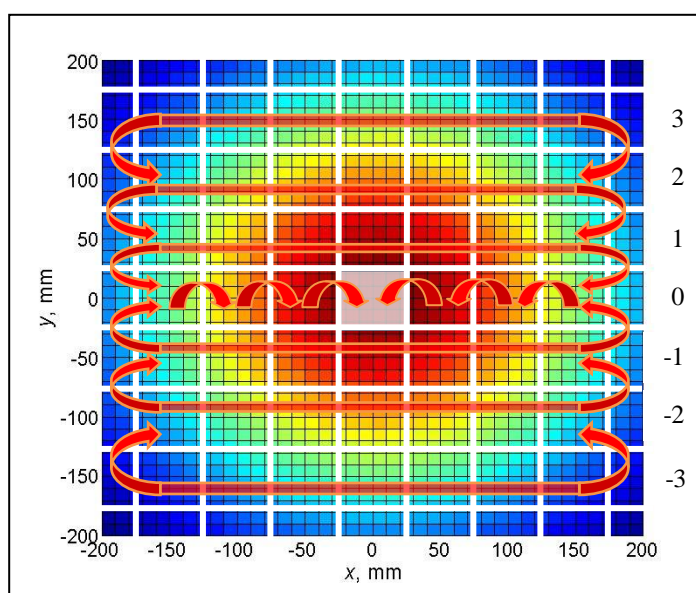
Naudojantis eksperimentiniais duomenimis, atliekama tik viena – apšvietos atvirkštinės kvadratinės priklausomybės nuo atstumo korekcija, o konkreti vertė ploteliui priskiriama interpoliuojant išmatuoto skirstinio įžambinę.

## 2.3 Imitatoriaus su veidrodžių sistema modeliavimas

Šiame darbe taip pat reikia sumodeliuoti imitatoriaus su veidrodžių sistema skirstinius. Numatant, jog veidrodžiai išdėstyti kvadratu visiškai statmenai prietaiso plokštumai, galima išskirti du modeliavimo metodus.

### 2.3.1 „Užlankstymo“ metodas

Šis metodas reikalauja, jog veidrodžių aukštis būtų ne mažesnis nei atstumas tarp imitatoriaus ir matavimo plokštumos. Taip pat, jam reikalingas sugeneruoti kiekvieno šviestuko energinės apšvietos skirstiniai didesniai plotui nei nustatytos matavimo plokštumos (minimalus plotas priklauso nuo to, kiek atskirų atspindžių bus įskaitoma). Tarkime, jog modeliuojame sistemą, kurios veidrodžiai yra  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  matavimo plokštumos kraštuose, o jų aukštis yra lygus atstumui tarp imitatoriaus ir plokštumos. Įskaitant 3 atspindžius reikalingas bent  $350 \times 350 \text{ mm}^2$  ploto skirstinys. (4 pav.)



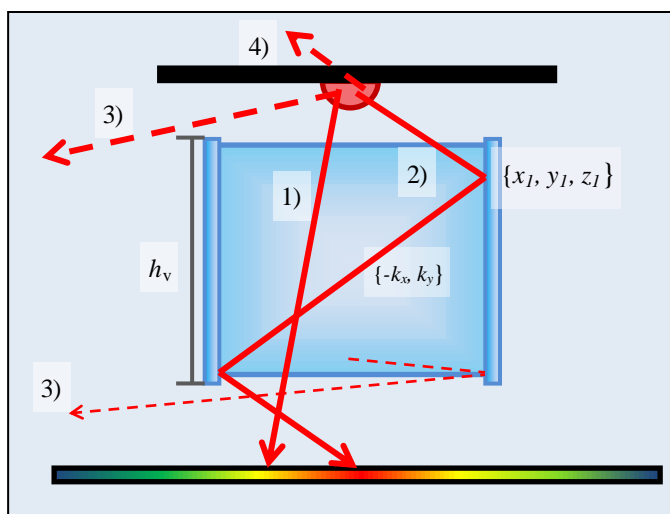
4 pav. „Užlankstymo“ metodo pavyzdys. Rodyklės vaizduoja kurie langeliai apverčiami ir kur pridėdamos jų vertės.

Kadangi plokščias veidrodis apverčia vaizdą, skirstinio 3 eilutės vertės apverčiamos pagal horizontalią ašį ir rezultata pridėti prie 2-osios eilutės ir t.t. (lyg lankstant servetėlę), kol pasiekama nulinė eilutė. Lygiai taip pat daroma iš apačios. Pasiekus nulinę eilutę, kiekvieno langelio vertės apverčiamos pagal vertikalią ašį ir taip artėjama link centro, kol visos skirstinio vertės susisumuoja centriniame langelyje. Kadangi veidrodis nėra idealus, darant kiekvieną užlankstymą apverstas vertes būtina padauginti iš veidrodžio atspindžio koeficiento.

Šis metodas yra pakankamas veidrodžių įtakos įvertinimui, tačiau smarkai apribotas sistemos geometrijos – netinka ne kvadratinei veidrodžių sistemai.

### 2.3.2 Spindulių atspindžio sekimo metodas

Jeigu veidrodžių sistemos aukštis  $h_v$  mažesnis nei atstumas tarp imitatoriaus ir matavimo plokštumos (5 pav.), tenka atsižvelgti į spindulius praeinančius pro veidrodžio apačią (ar viršų) ir galimai nepataikančius į matavimo plokštumą (5 pav.). Kadangi „užlankstymo“ metodas šioje situacijoje neveiktų, naudojant *RayTracing* duomenų apdorojimo metodus galima bandyti atsekti, į kurią matavimo plokštumos tašką pataiko kiekvienas spindulys.



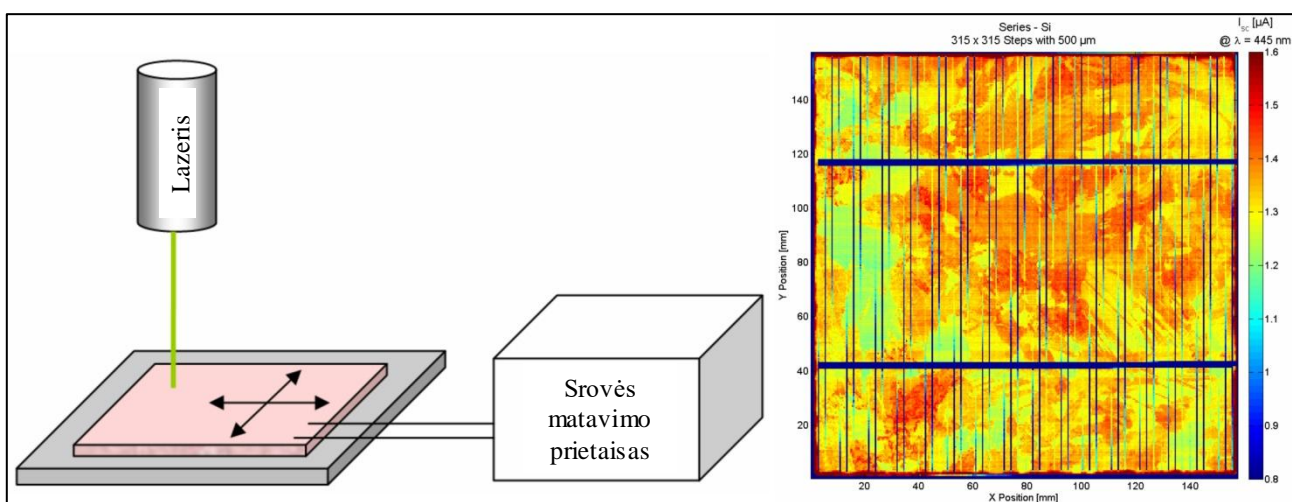
5 pav. Imitatoriaus su veidrodžių sistemos skersinis pjūvis ir galimi spindulių keliai

Modeliuojant tokią sistemą reikia atsižvelgti į keturis skirtingus galimus rezultatus: 1) Spindulys pataiko tiesiai į matavimo plokštumą; 2) Spindulys krenta didesniu kampū, todėl pataiko į veidrodį – šiuo atveju nurodomos naujos pradinės koordinatės  $\{x_I, y_I, z_I\}$ , spindulio galia padauginama iš atspindžio koeficiento, o krypties vektorių  $\{k_x, k_y\}$  ženklas pasikeičia, priklausomai nuo to, į kurią vietą pataikė spindulys ir tęsiama toliau, kol pasiekama matavimo plokštuma; 3) Spindulys krenta per dideliu kampū, todėl jis arba nepataiko į veidrodį, arba palenda po veidrodžiu ir nepataiko į plokštumą, arba atsispindi tiek kartų, jog galima laikyti, jog jis yra visiškai sugeriamas veidrodžių; 4)  $k_z < 0$  – emituotas spindulys nukreiptas ne į matavimo plokštumos pusę.

Šiuo metodu galima sumodeliuoti bet kokios geometrijos sistemą, tačiau programos kodas yra žymiai sudėtingesnis nei modeliuojant „užlankstymo“ metodu.

## 2.4 Lazero spinduliu indukuota srovė (LBIC)

Saulės imitatoriai taip pat gali būti panaudojami kitose matavimo sistemose. Lazero spinduliu indukuotos srovės (*angl. LBIC – LaserBeamInducedCurrent*) yra vienas iš pavyzdžių. Šis metodas remiasi mažame saulės elemento segmente sugeneruotos fotosrovės matavimu. Naudojant iš esmės bet kokį lazerį, žingsninį variklį ir srovės (arba įtampos) matavimo prietaisą galima sudaryti elemente kuriamos fotosrovės žemėlapi (6 pav.). Priklausomai nuo optomechaninės sistemos ir lazero bangos ilgio, galima keisti matavimo žingsnio smulkumą bei spindulio įsiskverbimo į elementą gylį. Dėl to galima tiksliai nustatyti, kur elemente dėl kristalinių, gamybos, kitų defektų, yra silpniau generuojama ar ribojama fotosrovė, o taip pat, nustatyti lokalius kvantinius našumus.



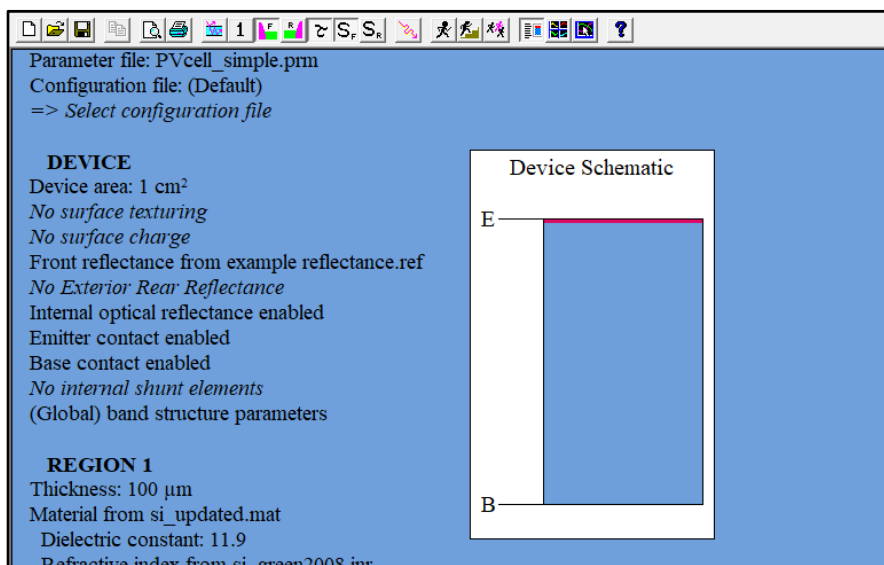
6 pav. Principinė LBIC metodo matavimo schema (kairėje) ir saulės elemento fotosrovės žemėlapio pavyzdys (dešinėje) [pagal 17]

LBIC metodą galima papildyti, apšviečiant saulės elementą (realistiškos krūvininkų generacijos sąlygos) bei prie jo prijungiant įtampą (keičiamas darbinis taškas).

## 2.5 Fotovoltinio elemento atsako modeliavimas

Norint iš anksto numatyti, koks gali būti fotoelemento ar visos saulės baterijos atsakas į imitatoriaus kuriamą energinę apšvietą, galima pagal medžiagų savybes aprašančias formules visa tai suskaičiuot. Tačiau tam, kad nereikėtų dar kartą rašyti programinio kodo, nuspręsta panaudoti norvegų ir vokiečių institutų jau sukurtą programinę įrangą – „PCIDmod6.2“, kuri yra nemokamai platinama „PVLighthouse“ internetinėje svetainėje [18]. „PCID“ – kompiuterinė programa skirta personaliniams kompiuteriams, kuri sprendžia netiesinių lygčių sistemas, siekiant apskaičiuoti

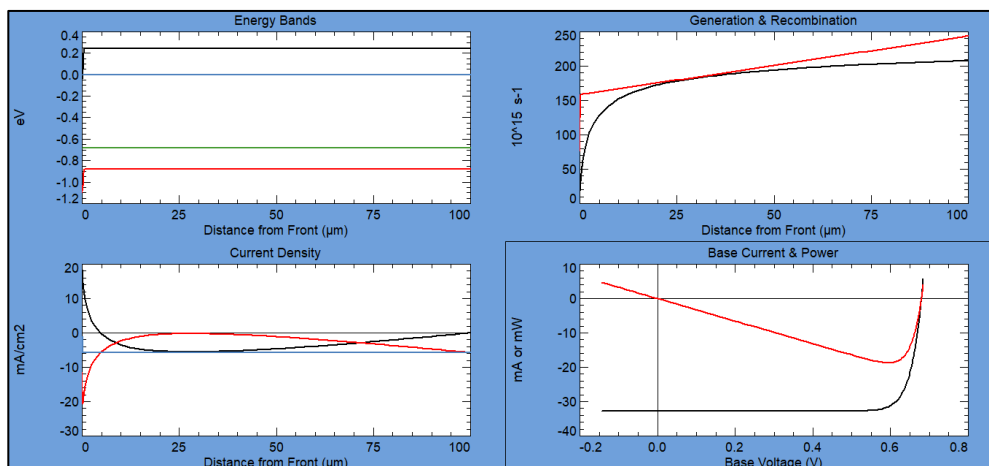
elektronų ir skylių kvazi-viendimensę pernašą kristaliniame silicyje ir pritaikyti rezultatus fotovoliniams prietaisams [19].



7 pav. „PCIDmod 6.2“ darbinio lango pavyzdys

7 pav. pateikiamame programos darbinio lango matoma, jog yra galimybė nustatyti beveik visus norimus saulės elemento parametrus – paviršiaus tekstūravimą; išorinius, vidinius atspindžius; medžiagų dielektrines konstantas, storius; krūvininkų difuzijos koeficientus ir kita. Galima nustatyti tiek vieną statišką parametą, tiek įkelti iš duomenų failo tikslesniam elemento atkūrimui. Taip pat „PCID“ leidžia nustatyti apšvietos parametrus – galią, spektrą, šviesos sklidimo kampą. Būten šia savybe ir bus pasinaudota šiame darbe.

Ši programinė įranga gali suskaičiuoti ir grafiškai pateikti: krūvininkų tankių, generacijos ir rekombinacijos trukmių, energinius lygmenų išsidėstymo, elektrinių krūvių, krūvininkų judrių bei srovės tankių priklausomybes nuo atstumo iki prietaiso paviršiaus; voltamperinę charakteristiką ir per bazę tekančios galios priklausą nuo bazės įtampos. Visus naudojamus metodus galima rasti programos vartotojo vadove [20].

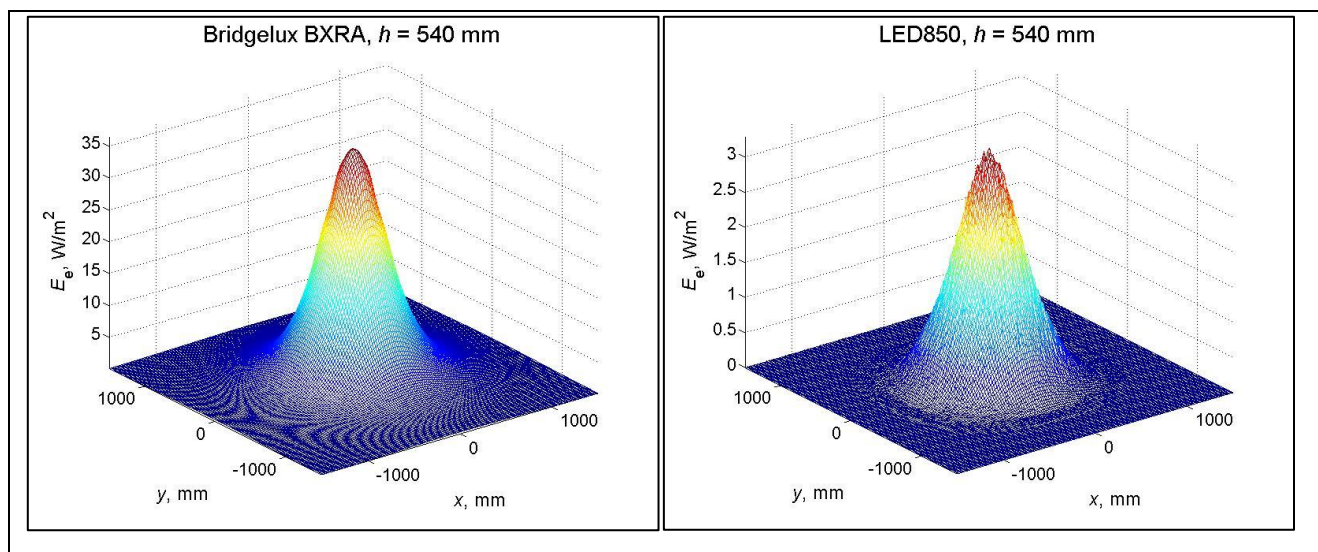


8 pav. „PCIDmod 6.2“ interaktyvių grafikų pavyzdys, paprastą silicio saulės elementą apšviečiant 1000 Wm<sup>-2</sup> galios 6000 K juodo kūno spinduliuote



### 3. Rezultatai ir jų aptarimas

Pirmiausia, pasinaudojant anksčiau atliktų modeliavimų rezultatais [8], sugeneruoti didelio ploto ( $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ ) skirstiniai, esant  $h = 540\text{ mm}$  (9 pav.). Jie bus naudojami tolesniam modeliavimui „užlankstymo“ metodu. Reikia pastebėti, jog šiame darbe balti *LedEngin LZ4 Series* šviestukai pakeičiami baltu *Bridgelux BXRA* serijos šviestuku, o mėlynų iš viso laikinai atsisakoma dėl jų nedidelio indėlio į bendrą apšvietą ir pakankamai plačių leistinių spektro nuokrypio ribų.



9 pav. *Bridgelux BXRA* (kairėje) ir *LZ4 850 nm* (dešinėje) šviestukų kuriamos energinės apšvietos skirstiniai, jiems esant 540 mm atstumu nuo matavimo plokštumos.

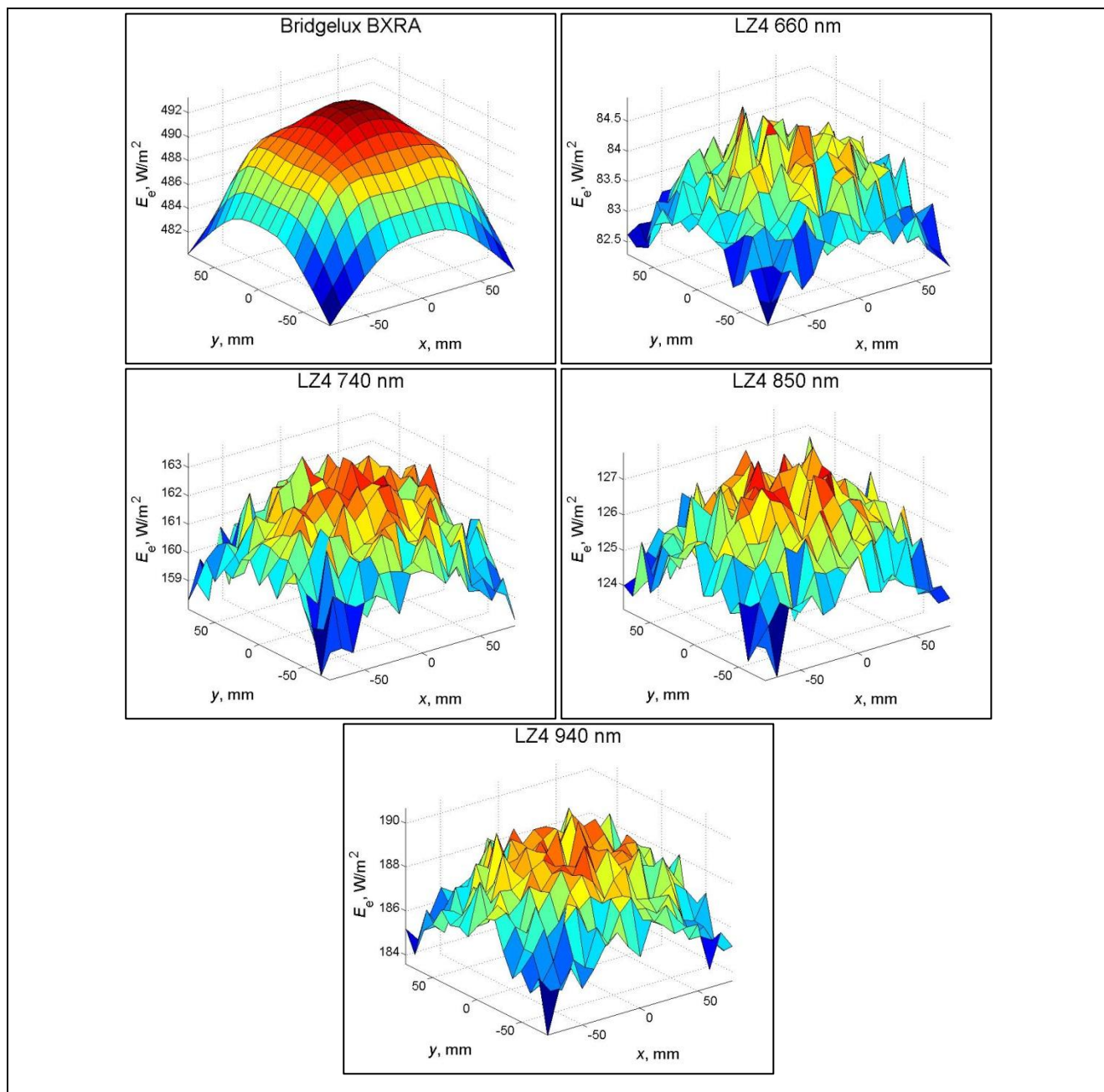
(Kitų *LZ4* serijos šviestukų skirstiniai tokie pat – skiriasi tik energinės apšvietos vertės)

Tolesni modeliavimai ir matavimai atlinktinustačius veidrodžių poziciją – 80 mm nuo centro visomis kryptimis, jie yra statmeni imitatoriaus ir matavimo plokštumoms, o aukštis lygus atstumui tarp imitatoriaus ir matavimo plokštumos. Modeliuojami skirstiniai, kurių  $h = 270\text{ mm}$ . Toks aukštis pasirinktas dėl to, kad transformuojant skirstinį iš  $h = 540\text{ mm}$ , žingsnis tampa dvigubai mažesniu (iš 20 mm į 10 mm) o energinės apšvietos vertės yra nesunkiai suskaičiuojamos.

#### 3.1 Saulės imitatoriaus su veidrodžių sistema skaitmeninis modeliavimas

Įvertinus veidrodžių sistemos įtaką skirstiniams nustatyta, jog makete turėtų užtekti vieno *Bridgelux BXRA* šviestuko, kai tuo tarpu kitų keturių rūšių prireiks po 4 vienetus, norint pasiekti pakankamą galią ir nepadidinti energinės apšvietos nuokrypio. Taip pat visi šviestukai naudoti be reflektorių, nes kitu atveju skirstiniai būtų per siauri, o galios – per didelės.

Toliau, pagal 2 lentelės ir 3 lentelės duomenis, sumodeliuoti atskirų šviestukų grupių kuriami skirstiniai (10 pav.), įtraukiant galios sumažinimo koeficientą  $D_p < 1$ . Visos kitos sąlygos tokios pat kaip aptarta 3.1. skyriuje, numatytas veidrodžių atspindžio koeficientas – 81%.



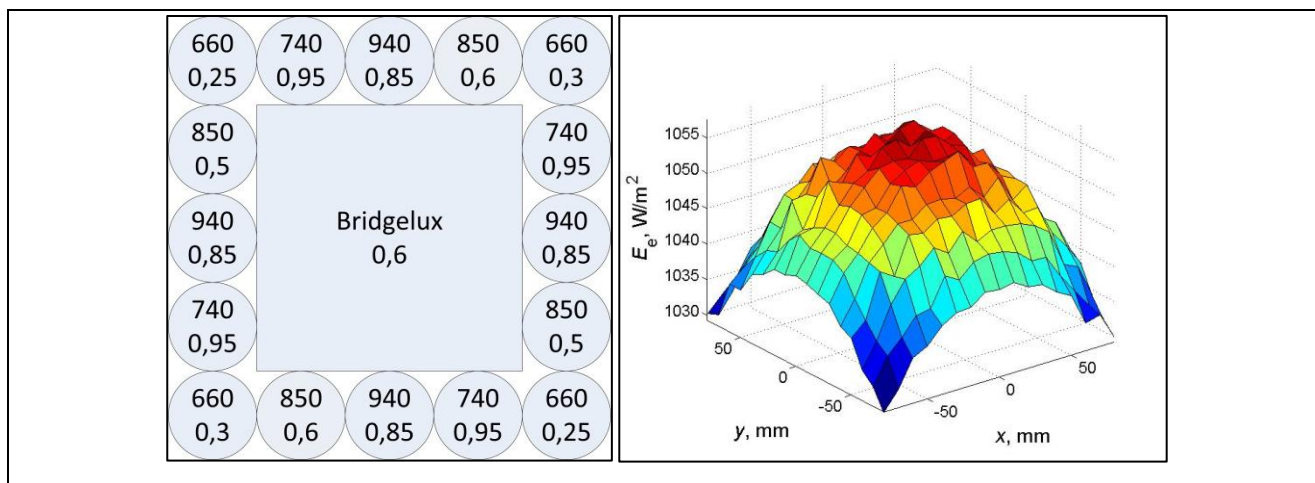
10 pav. Sumodeliuoti energinės apšvietos skirstiniai, gaunami iš atskirų šviestukų grupių, atsižvelgiant į AAA klasės imitatoriams keliamus reikalavimus

4 lentelėje pateikiami kiekvienos grupės šviestukų generuojamų skirstinių parametrai. Šiuo atveju šviestukų išdėstymas imitatoriaus matricoje aprašomi koordinatinių poromis centimetrais:  $[x_1, y_1, x_2, y_2, \dots]$  cm.

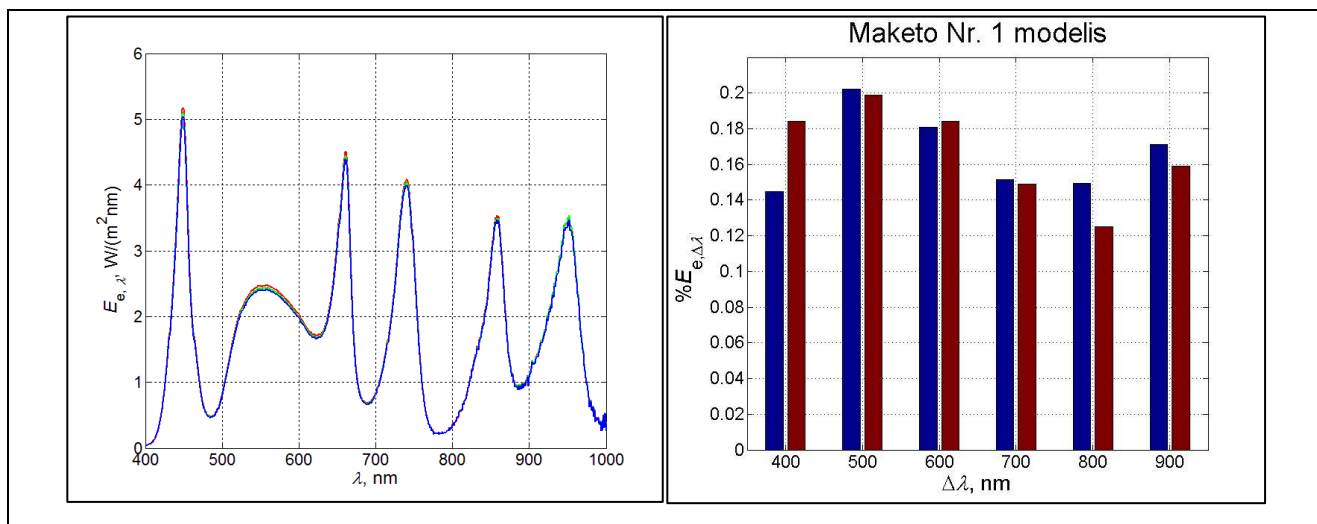
4 lentelė. Kiekvienos grupės šviestukų energinės apšvietos skirstinių, generuotų atsižvelgiant į keliamus reikalavimus, parametrai

Šviestukų grupė	Pozicijos, cm	$D_p$	$E_e(\max)$ , W/m <sup>2</sup>	$\Delta E_e$	Atitinkama klasė
Bridgelux	[0 0]	0,6	493	1,3 %	A
660 nm	[4 4 4 -4 -4 4 -4 -4]	0,25	85	1,5 %	A
740 nm	[2 -4 -2 4 4 2 -4 -2]	0,95	163	1,5 %	A
850 nm	[4 -2 -4 2 2 4 -2 -4]	0,55	127,5	1,7 %	A
940 nm	[0 4 0 -4 -4 0 4 0]	0,85	191	1,8 %	A
Suminis	-	-	1058	1,33 %	A

11 pav. pateikiamas grafinis šviestukų išdėstymas bei suminis energinės apšvietos skirstinys. 12 pav. parodomas generuojamo spektro pokytis keliuose matavimo plokštumos taškuose ir procentinės dalys kiekvienam spektriniam intervalui. Stebima, jog skirtinguose taškuose spektras skiriasi nežymiai, o modeliuojamas maksimalus spektrinis nuokrypis – 0,788, kas tenkintų A klasės imitatoriui keliamus reikalavimus.

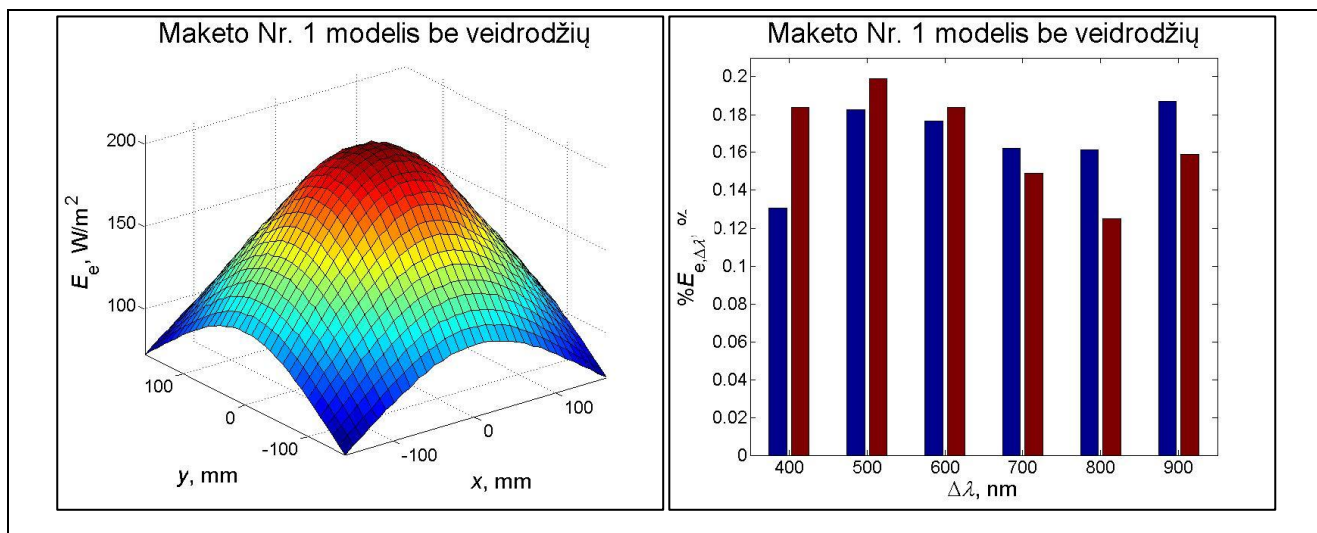


11 pav. Šviestukų išdėstymo imitatoriaus plokštumoje ir suminio energinės apšvietos skirstinio modeliai



12 pav. Kairėje: imitatoriaus modelio generuojamas spektras skirtinguose matavimo plokštumos taškuose – [0 0] (raudona linija), [0 80] (žalia linija), [80 80] (mėlyna linija); dešinėje: imitatoriaus modelio energinės apšvietos procentinės dalys spektro intervalams taške [0 0] (mėlyni stulpeliai) palyginimas su standarto numatytomis vertėmis (raudoni stulpeliai)

Lygiagrečiai sugeneruotas skirstinys didesniai plotui be veidrodžių siekiant, palyginus su išmatuotais rezultatais, nustatyti ar būtų galimybė pagaminti didesnio ploto imitatorių sudarytą iš aprašyto maketo nr. 1 modulių. Nesant veidrodžių sistemai, centriname taške padidėja raudonųjų šviestukų indėlis į spektrą (13 pav.), dėl to, jog jų skirstinys yra siauresnis.

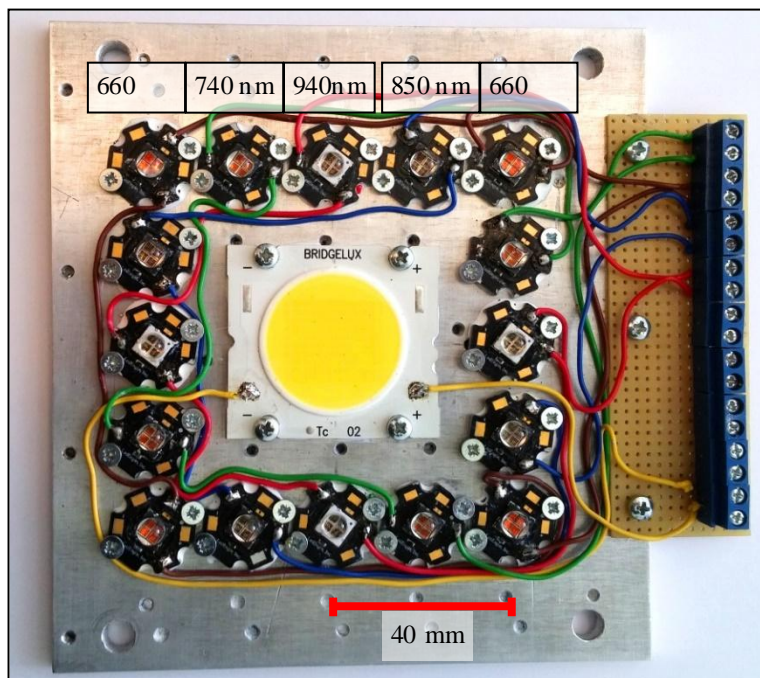


13 pav. Imitatoriaus modelio be veidrodžių sistemos generuojamas energinės apšvietos skirstinys (kairėje) ir energinės apšvietos procentinės dalys spektro intervalams taške [0 0] (mėlyni stulpeliai dešinėje) palyginimas su standarto numatytomis vertėmis (raudoni stulpeliai dešinėje)

Baigus modeliavimą pereita prie realaus imitatoriaus su veidrodžių sistema gaminimo, montavimo ir matavimų.



### 3.2 Surinkto saulės imitatoriaus su veidrodžių sistema savybių matavimai



14 pav. Sumontuotas saulės imitatorius, naudojant penkių rūšių didelės galios šviestukus

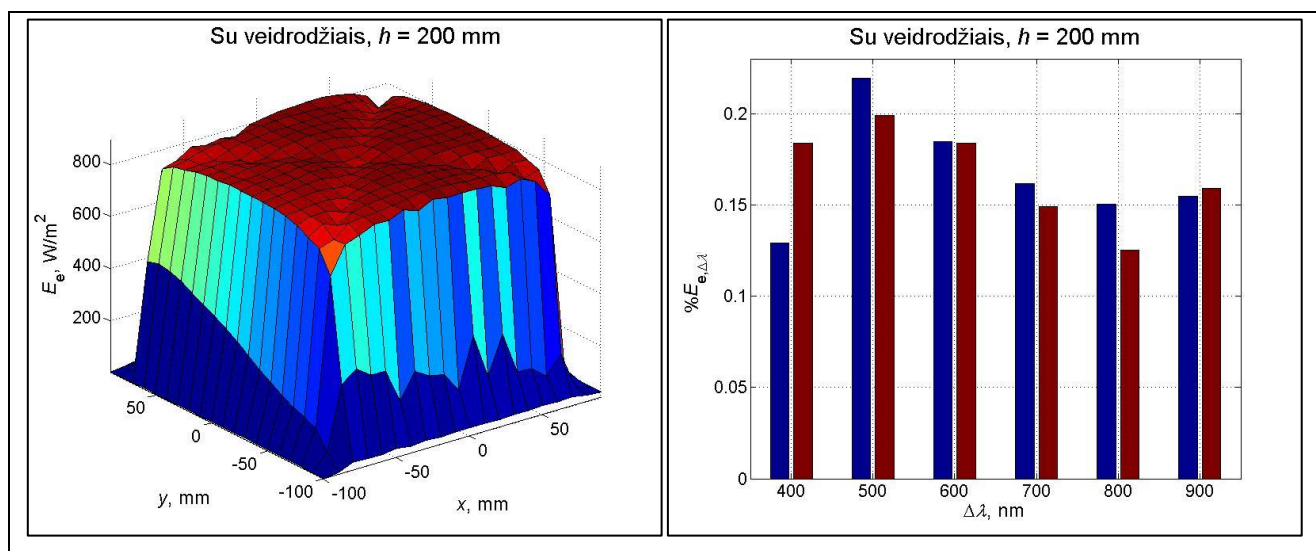
Modeliavimas parodė, jog turėtų būti įmanoma pagaminti realų saulės imitatorių, naudojant vos penkių skirtingų rūšių šviestukus. Sumontuoto prietaiso (be veidrodžių sistemos) nuotrauka pateikiama 14 pav.

Šiam imitatoriui pagaminta kvadratinė veidrodžių sistema, kurioje atstumai tarp priešais esančių elementų – 165 mm, o sistemos aukštis –  $H = 200$  mm. Nors modeliai su veidrodžiais generuoti aukščiui  $h = 270$  mm, rezultatai vis tiek turėtų būti labai artimi, kadangi jokia dalis spinduliuotės neturėtų išeiti už sistemos ribų. Įtakos gali turėti skirtingas atskirų spindulių atspindėjimų nuo veidrodžių skaičius (esant mažesnio aukščio sistemai, mažiau spindulių gali būti sugerta), tačiau tai turėtų būti nykstamai maži skirtumai, lyginant su veidrodžių atspindžio koeficiento netolygumų įtaka.

Prietaisas su veidrodžių sistema užmontuotas ant radiatoriaus ir, iškėlus į 200 mm aukštį, išmatuoti energinės apšvietos ir spektriniai pasiskirstymai. Kiekvienos šviestukų grupės maitinimo srovė pagal numatytą koeficientą  $D_P$  nustatyta išmatuojant nominalią energinę apšvietos ir sumažintos apšvietos santykį. Nominali įtampa ir srovė nustatyta pagal gamintojo pateiktus parametrus. (5 lentelė)

5 lentelė. Nustatyti maitinimo įtampų ir srovių parametrai

Šviestukų grupė	Bridgelux	LZ4 660 nm	LZ4 740 nm	LZ4 850 nm	LZ4 940 nm
Nominali įtampa	33 V	45 V	41 V	32 V	35 V
Nominali srovė	2,8 A	1 A	1 A	1 A	1 A
Nustatytas $D_p$	0,616	0,252	0,95	0,603	0,86
Nustatyta srovė	1,63 A	0,245 A	0,93 A	0,58 A	0,84 A



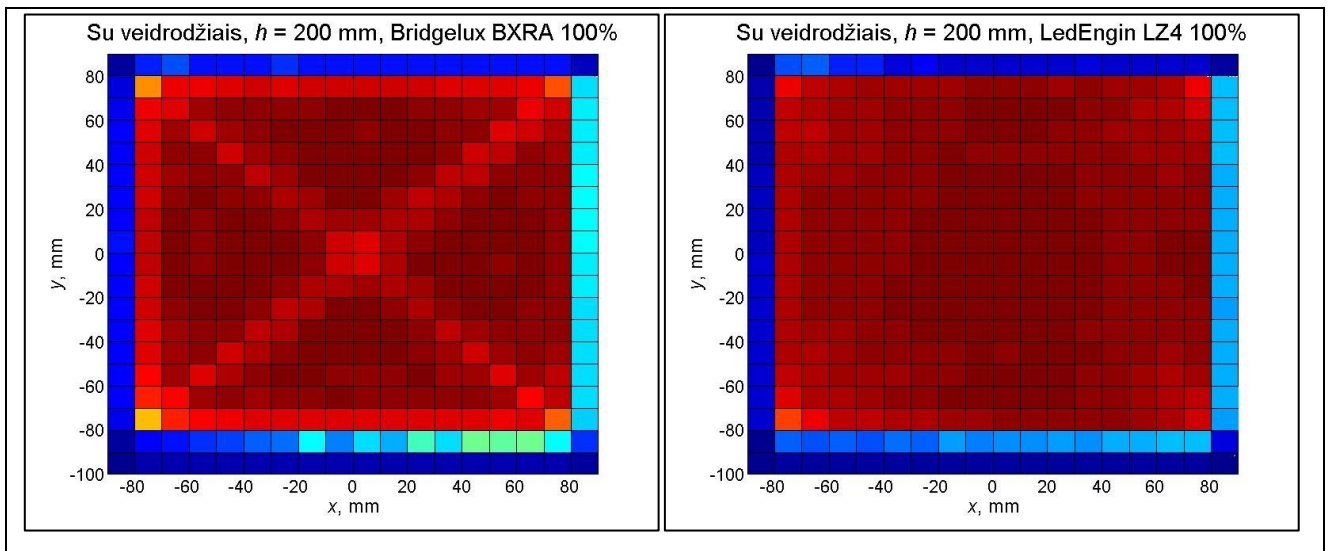
15 pav. Saulės imitatoriaus su veidrodžių sistema ( $H = 200 \text{ mm}$ ) kuriamas energinės apšvietos skirstinys (kairėje) ir energinės apšvietos procentinės dalys spektro intervalams taške  $[0 \ 0]$  (mėlyni stulpeliai dešinėje) palyginimas su standarto numatytomis vertėmis (raudoni stulpeliai dešinėje)

Išmatuota, jog šis imitatoriaus maketas sukuria didelės galios apšvietą ( $E_e[\text{max}] = 892 \text{ W/m}^2$ ) ( $16 \times 16$ )  $\text{cm}^2$  plote ( $\Delta E_e = 3,4\%$  – B klasės imitatorius), o už veidrodžių ribų vertės staigiai krenta į nulį. Tačiau A klasės energinė apšvieta ( $\Delta E_e = 2\%$ ) pasiekama mažesniame  $(8 \times 8) \text{ cm}^2$  plote. Taip pat, kuriame spektre ženkliai trūksta trumpiausių bangos ilgių spinduliuotės, kas lemia B klasės spektrinį atitikimą ( $\Delta E_{e,\Delta\lambda} = 0,70$ ).

Vis dėl to, išmatuotas energinės apšvietos skirstinys šiek tiek skiriasi nuo sumodeliuotojo:

1) Energinės apšvietos vertės 15% mažesnės – veidrodžių atspindžių koeficientai ženkliai mažesni nei numatyta modeliuojant.

2) Žymus apšvietos sumažėjimas skirstinio įstrižainėse. Modeliuojant jau atkreiptas dėmesys į *Bridgelux BXRA* atspindžių skirstinio susikoncentravimą kampuose. Dėl veidrodžių netobulo sudūrimo kvadrato kampuose, potencialūs kampų atspindžiai išeina už sistemos ribų arba yra sugeriami (*LedEnginLZ4* šviestukams tokios didelės įtakos nestebima). (16 pav.)

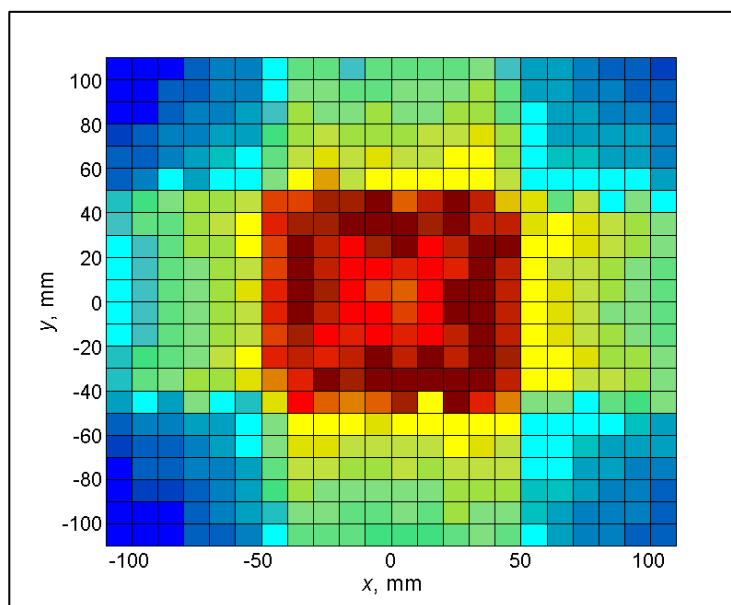


16 pav. Atskiri Bridgelux BXRA (kairėje) ir LedEngin LZ4 (dešinėje) šviestukų kuriamos energinės apšvietos su veidrodžių sistema skirstiniai

Tolimesniuose tyrimuose tobulinami modeliavimo įrankiai, kuriami kiti imitatoriaus maketai, keičiant šviestukų išdėstymą imitatoriaus plokštumoje.

### 3.3 Imitatoriaus maketo tobulinimai

Pirmam bandymui, imitatoriaus centrinis *Bridgelux* šviestukas buvo pakreiptas  $\sim 20^\circ$  imitatoriaus plokštumoje ir pastumtas, siekiant nustatyti, šviestuko pozicijos įtaką energinės apšvietos sumažėjimui matavimo plokštumos įstrižainės. Išmatuotas energinės apšvietos profilis pateikiamas 17 pav.

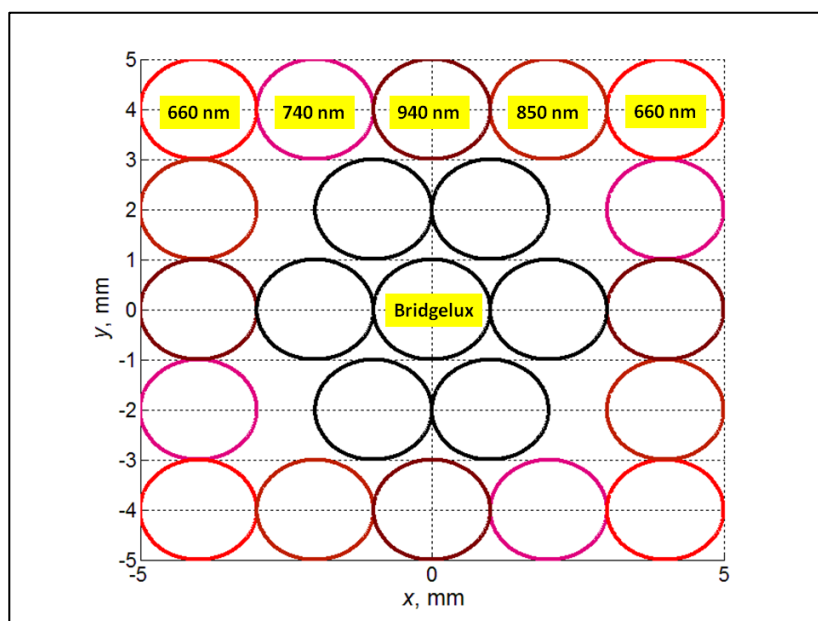


17 pav. Išmatuotas centrinio *Bridgelux* šviestuko energinės apšvietos skirstinys, paslinkus šviestuką imitatoriaus plokštumoje (santykiniais vienetais, skirstinio formos įvertinimui)

Išsiaiškinta, jog nedidelis pozicijos pakeitimas nepanaikina kryžiaus formos mažesnės energinės apšvietos srities. Kadangi analogiško netolygumo nematome likusių visų likusių šviestukų atveju, didžiausią įtaką daro tiek simetriška balto šviestuko pozicija (pačiame centre), tiek jo didelis plotas, kuriantis platesnę ir labiau lygiagrečią apšvietą. Dėl to nuspręsta pakeisti vieną didelį „Bridgelux BXRA-56C9000-J“ šviestuką keliais mažesniais „Bridgelux BXRA-56C1000-A“.

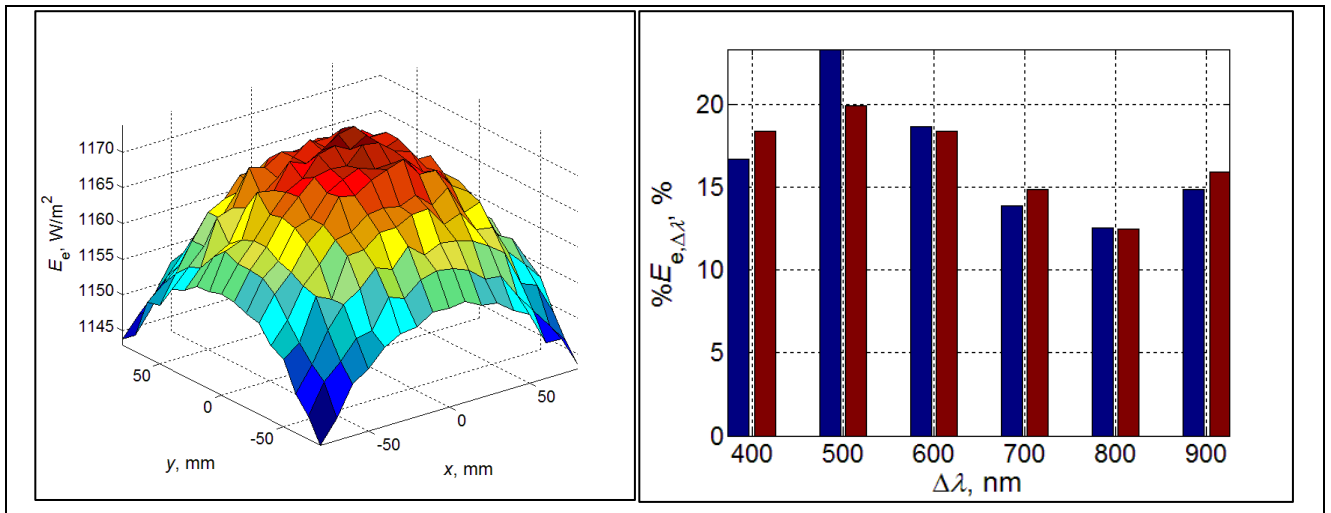
Gamintojo pateikiamuose aprašuose teigiama, jog pastarieji yra beveik 9 kartus silpniau šviečiantys, nei didieji. Visgi, pirmajame imitatoriaus modelyje buvo naudojama ne visa balto šviestuko galia, todėl jis pakeičiamas septyniais mažaisiais – tiek fiziškai geriausiai telpa tame pačiame plote, nekeičiant kitų šviestukų pozicijų (18 pav.).

Toks imitatorius, pagal papildomus modeliavimo duomenis, turėtų kurti pakankamos galios ir pakankamo tolygumo energinę apšvietą AAA klasės reikalavimams įgyvendinti (19 pav.)



18 pav. Šviestukų išdėstymo imitatoriui Nr.2 schema (didelis centrinis šviestukas pakeistas septyniais mažesniais)

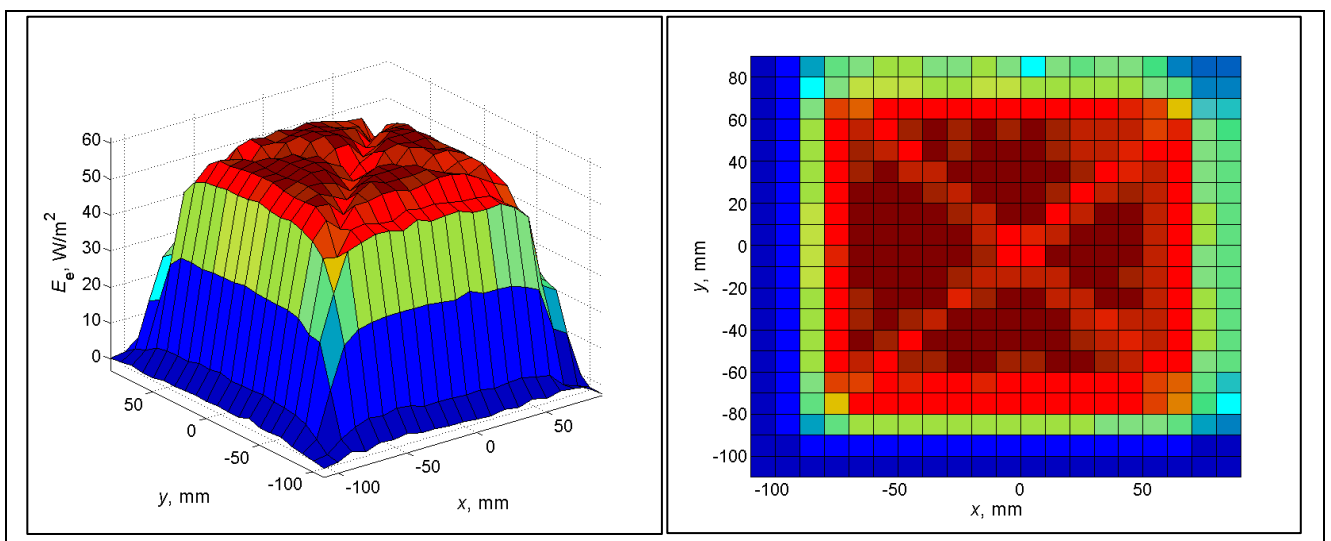




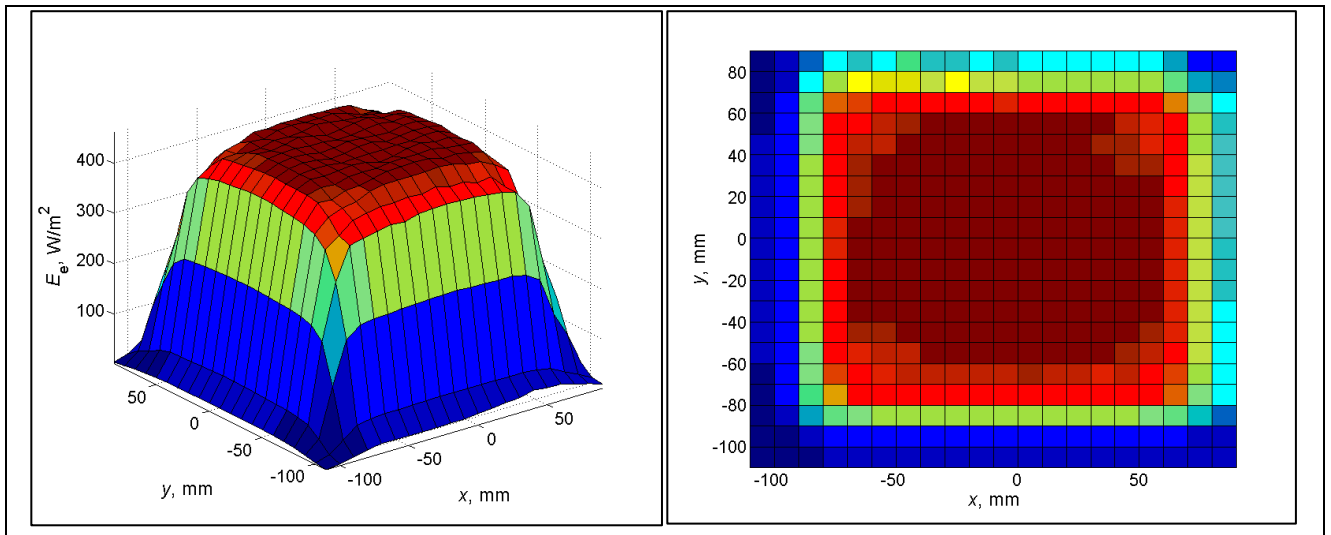
19 pav. Sumodeliuotas Imitatoriaus Nr.2 energinės apšvietos skirstinys (kairėje) ir energinės apšvietos procentinės dalys spektro intervalams (dešinėje) (1,3%)

Imitatoriaus Nr. 2 modelyje centrinis šviestukas prie maitinimo šaltinio prijungtas atskirai, o likę šeši – lygiagrečiai po tris, su 1  $\Omega$  eilės ir mažesnėmis varžomis subalansavimui. Atskirai išmatuoti du energinės apšvietos skirstiniai: vieno centrinio šviestuko (20 pav.) ir visų likusių šešių (žiedo) (21 pav.).

Pastebėta, jog centre esantis *Bridgelux* sukuria panašų *kryžių*, kaip ir anksčiau minėtasis, o žiede esantys šviestukai žymaus energinės apšvietos sumažėjimo įstrižainėse negeneruoja. Iš to galima spręsti, jog didesnę įtaka (nekeičiant veidrodžių sistemos) daro labai simetriška pozicija imitatoriaus plokštumos centre. Reikia paminėti, jog šiais atvejais nuokrypis matuojamas ne visame (~10 mm  $\times$  10 mm) plote.

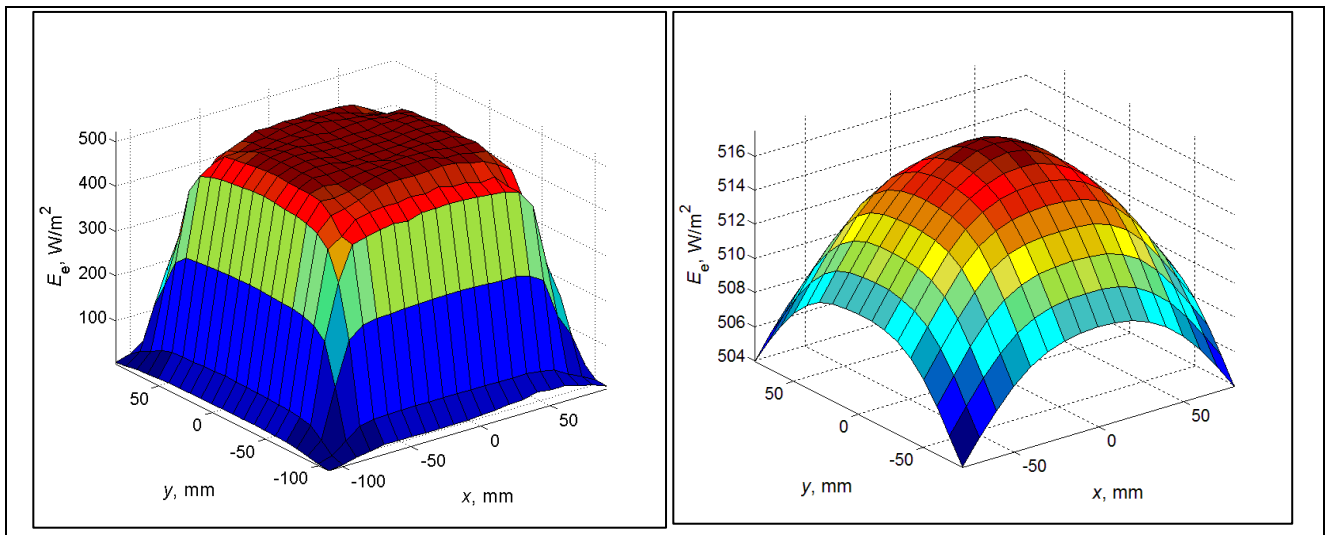


20 pav. Išmatuotas centrinio balto šviestuko energinės apšvietos skirstinys (nuokrypis – 15%)



21 pav. Išmatuotas baltų šviestukų žiedo energinės apšvietos skirstinys (nuokrypis – 8%)

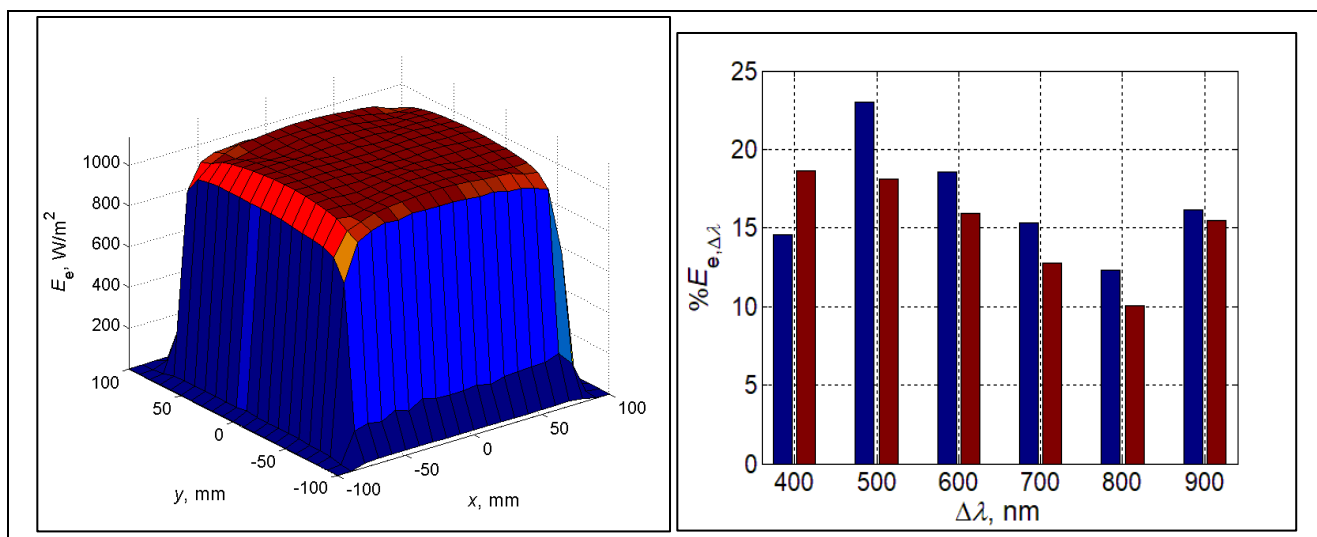
Nominali čia naudojamo vieno šviestuko maitinimo srovė – 350 mA. Kadangi šioje stadijoje siekiama kuo didesnės kuriamos apšvietos, baltų šviestukų žiedui nustatyta 325 mA maitinimo srovė, centriniam – 300 mA (susilpninat sumažėjimą įstrižainėse). 22 pav. pateikiami visų baltų šviestukų išmatuotas ir, naudojant atitinkamus koeficientus, sumodeliuotas energinės apšvietos skirstiniai. Šiuo atveju išmatuota maksimali energinės apšvietos vertė nedaug skiriasi nuo modeliuotosios ( $519 \text{ W/m}^2$  ir  $517 \text{ W/m}^2$  atitinkamai). Taip pat, maždaug  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  matavimo plokštumos plote kuriamos energinės apšvietos nuokrypis neviršija 2% ribos.



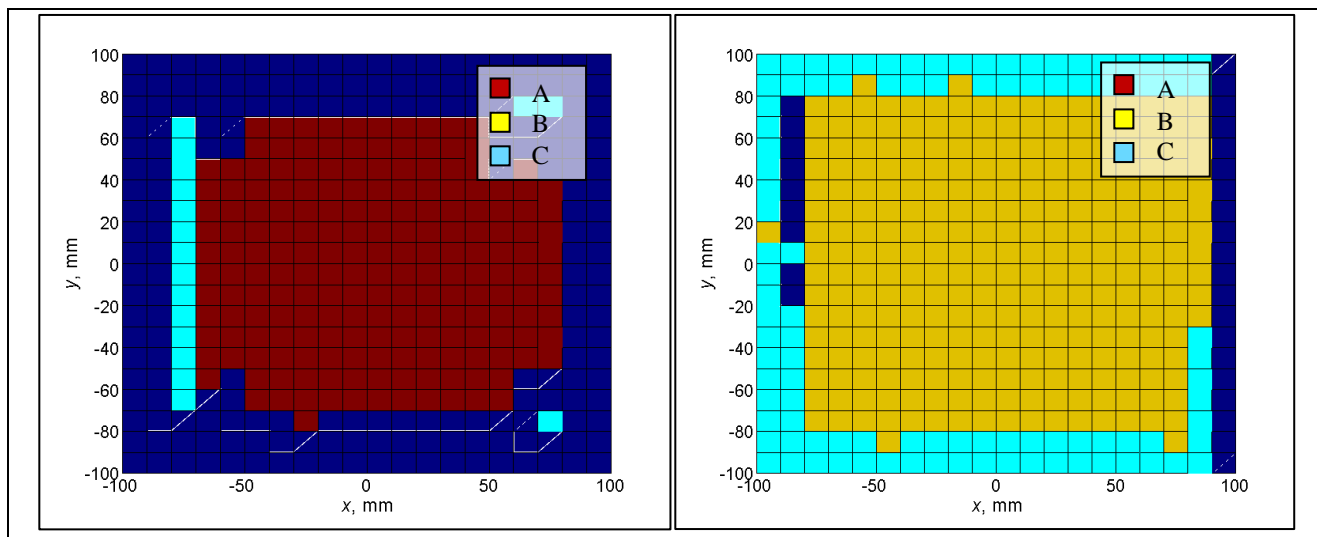
22 pav. Išmatuotas (kairėje) (nuokrypis – 2,5%) ir sumodeliuotas (dešinėje) visų baltų šviestukų energinės apšvietos skirstiniai

Galiausiai, buvo sujungti visi imitatoriaus šviestukai ir išmatuotas pilnasis energinės apšvietos pasiskirstymas, spektrinis atitikimas, bei laikinis nestabilumas. Pastebėta, jog pagal

atskiromis grupėmis matuojant nustatytas šviestukų sroves kuriama spinduliuotė truputį netenkina AAA klasei keliamų reikalavimų (24 pav.), todėl prieš priskiriant imitatorių tam tikrai kategorijai, reikia pasitikslinti srovių vertes.



23 pav. Energinės apšvietos skirstinys, sujungus visus šviestukus pagal anksčiau nustatytas vertes (kairėje), irenerginės apšvietos procentinės dalys spektro intervalams taške [0 0] (mėlyni stulpeliai dešinėje) palyginimas su standarto numatytomis vertėmis (raudoni stulpeliai dešinėje)



24 pav. Imitatoriaus energinės apšvietos netolygumo (kairėje) ir spektrinio atitikimo (dešinėje) klasės įvertinimas matavimo plokštumos taškuose

### 3.4 Imitatoriaus kuriamos spinduliuotės įvertinimas

Norint pasiekti visais parametrais aukščiausios klasės generuojamą spinduliuotę, reikia išlyginti ir pagerinti spektrinį atitikimą visoje matavimo plokštumoje. Kadangi didžiausią

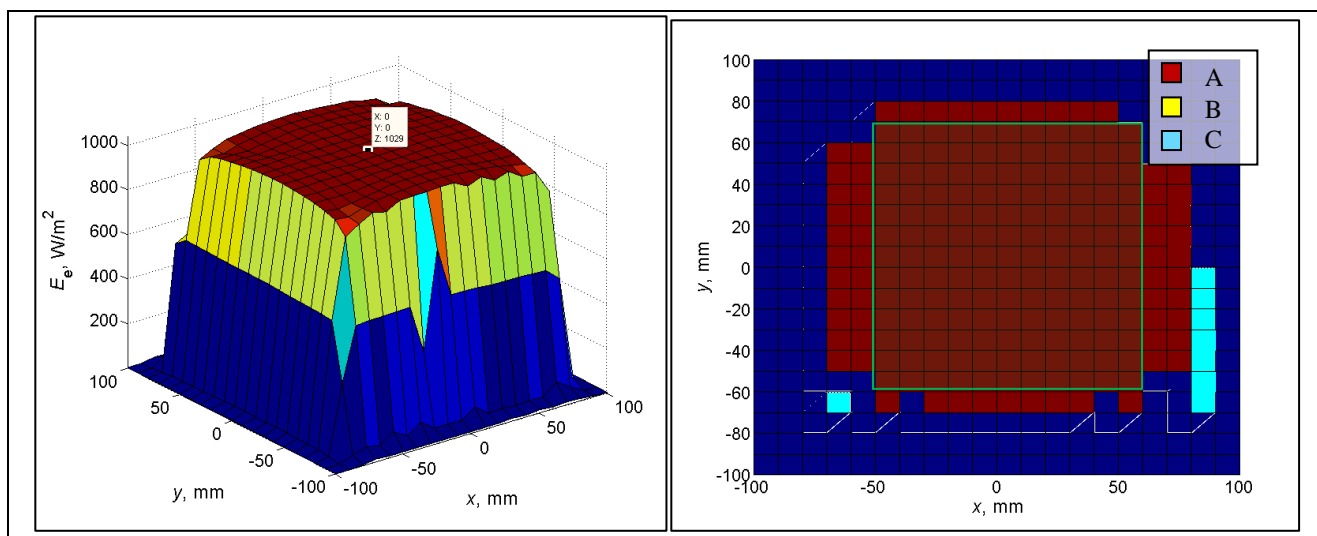
nuokrypį lėmė bangos ilgių intervalas (500 ÷ 600) nm, nuspręsta labiausiai mažinti baltų šviestukų srovę, o tam kad nereikėtų iš naujo daryti balansavimo varžomis, srovės korekcija atlikta tik centriniam šviestukui. Galutinės srovių vertės šviestukų grupėms pateikiamos 6 lentelėje.

6 lentelė. Galutinės šviestukų grupėms nustatytos srovės ir įtampos

Šviestukų grupė	Bridge lux centrinis	Bridge lux žiedas	LZ4 660 nm	LZ4 740 nm	LZ4 850 nm	LZ4 940 nm
Nustatyta srovė	75 mA	975 mA	247 mA	850 mA	420 mA	950 mA
Nustatyta įtampa	26 V	28 V	33 V	40 V	26 V	33 V

### 3.4.1 Energinės apšvietos pasiskirstymo netolygumo matavimas

Paskutinį kartą pakoregavus imitatoriaus srovės, spektroskopu išmatuotas energinės apšvietos pasiskirstymas matavimo plokštumoje ir pagal (1) formulę įvertintas jo netolygumo atitikimas kiekvienam taške.



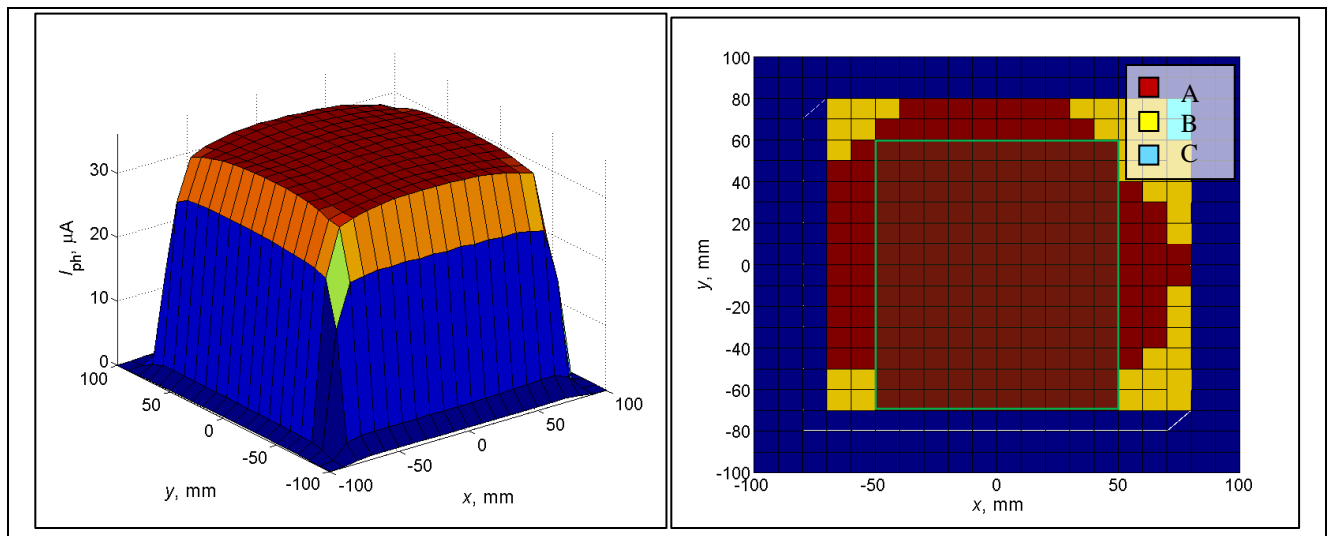
25 pav. Saulės imitatoriaus su veidrodžių sistema ( $H = 200$  mm) ir septyniais baltais šviestukais kuriamas energinės apšvietos skirstinys (kairėje) ir energinės apšvietos netolygumo atitikimas IEC standarto nustatytoms klasėms kiekviename taške (dešinėje)

[žalsvai pažymėtos sritys dydis –  $(11 \times 13) cm^2$ ]

Nustatyta, jog energinės apšvietos netolygumas atitinka A klasei keliamus reikalavimus  $(13 \times 11) cm^2$  ( $143 cm^2$ ) stačiakampio formos plote ir maždaug  $153 cm^2$  skritulio plote. Priartėjus prie matavimo plokštumos kraštų, apšvieta staigiai mažėja taip praktiškai netenkinant jokiai klasei keliamų reikalavimų. Aukščiausią kategoriją atitinkantį plotą būtų galima

dar padidinti (galimai iki  $(15 \times 15) \text{ cm}^2$ ) užmontavus veidrodžių sistemą, kurios kampuose būtų išgaunamas geresnis atspindys, nei naudojamoje šiame darbe.

Tačiau pagal IEC standarto numatytas matavimo procedūras, netolygumas turi būti įvertintas, matuojant kristalino silicio elemento ar mini modulio trumpo jungimo srovę, šiame darbe naudotas analogiškas prietaisas – silicio fotoelementas su opaliniu difuzoriumi ir  $1 \text{ cm}^2$  dydžio apertūra.

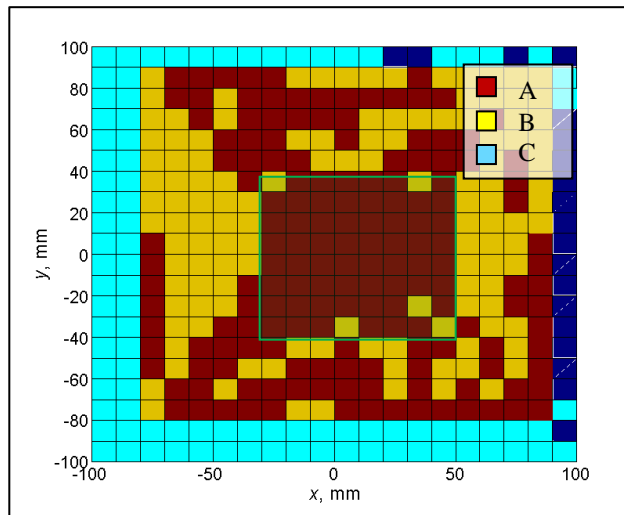


26 pav. Silicio fotodiodo generuojamos trumpo jungimo srovės skirstinys, apšvietus saulės imitatoriumi (kairėje) ir energinės apšvietos netolygumo atitikimas IEC standarto nustatytoms klasėms kiekviename taške (dešinėje)  
[žalsvai pažymėtos sritys dydis –  $(10 \times 13) \text{ cm}^2$ ]

Nustatyta, jog išmatuotas fotodiodo srovės netolygumas tenkina A klasei keliamus reikalavimus  $(10 \times 13) \text{ cm}^2$  ( $130 \text{ cm}^2$ ) kvadrato ir maždaug  $115 \text{ cm}^2$  skritulio plote. Tuo tarpu, B klasė užtikrinama beveik visame,  $(15 \times 15) \text{ cm}^2$  matavimo plokštumos plote (veidrodžių sistemos matmenys –  $16 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$ ).

### 3.4.2 Spektrinio atitikimo tyrimas

Anksčiau pateiktuose rezultatuose įvertinta tik energinės apšvietos procentinės dalys spektro intervalams matavimo plokštumos centre, tačiau spektrinis atitikimas turi atitikti tą pačią klasę visoje matavimo plokštumoje. Naudojant CCD spektrometrą, išmatuoti spektrų priskyrimas tam tikrai klasei pateikiamas 27 pav.



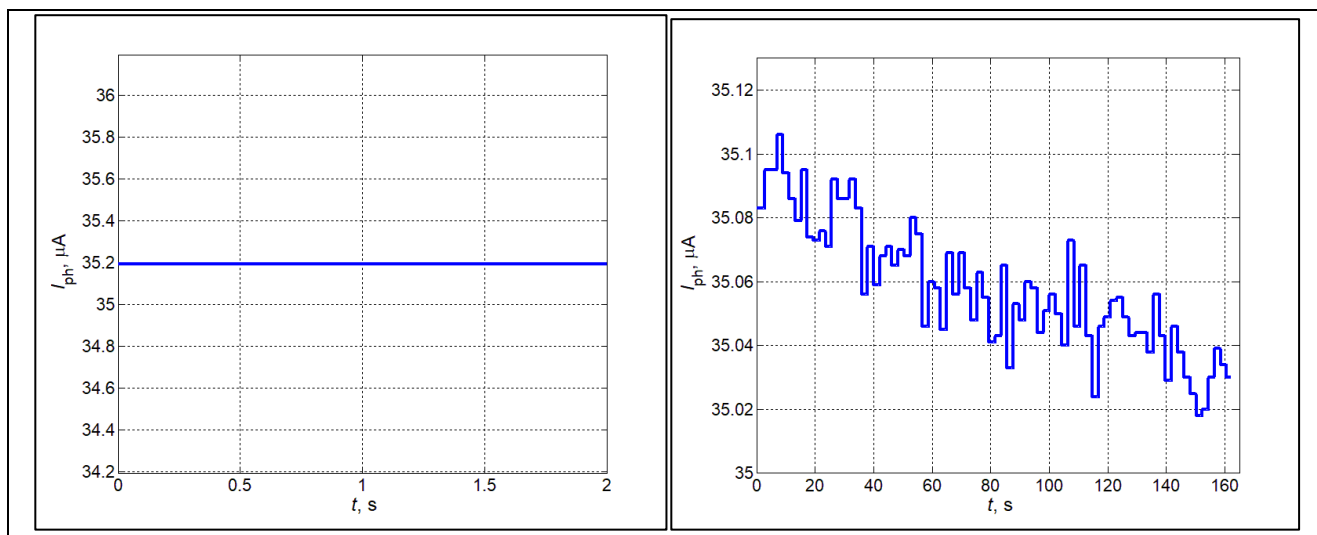
27 pav. Spektrinio atitikimo pasiskirstymas matavimo plokštumoje pagal priskiriamą kokybės klasę

Vis dėl to, net ir nustačius optimalias šviestukų srovės vertes, A klasę tenkinantis spektrinis atitikimas pasiekiamas tik  $(8 \times 8) \text{ cm}^2$  plote. Nustatant šviestukų sroves didžiausias dėmesys buvo skirtas centriniam baltam šviestukui, kuris kūrė per daug apšvietos ( $500 \div 600$ ) nm ruože, tačiau juo tekančią srovę nustačius mažesnę, nei 75 mA, pradeda trūkti pirmojo, ( $400 \div 500$ ) nm, intervalo indėlio. Analogiškai ankstesniems matavimams, stebimas išskirtinumas matavimo plokštumos įstrižainėse, todėl galima spręsti, jog patobulinius veidrodžių sistemą (atspindį sujungimuose), galima ne tik padidinti energinės apšvietos tolygumą, bet ir spektrinį atitikimą visoje matavimo plokštumoje. Taip pat, ateityje verta pabandyti pakeisti centrinį šviestuką į trumpabangį ( $\sim 450$  nm).

Tuo tarpu, B klasei keliamus reikalavimus imitatoriaus spektrinis atitikimas tenkina visoje  $(16 \times 16) \text{ cm}^2$  matavimo plokštumoje.

### 3.4.3 Laikinio nestabilumo įvertinimas

Galiausiai nustatant imitatoriaus kokybę buvo įvertintas spinduliuotės laikinis nestabilumas. Pagal standartą [13] reikėtų išmatuoti saulės elemento voltamperinę charakteristiką ilgos trukmės matavime ir vieną tašką trumpo trukmės (blykstės) matavime. Tačiau bendram įvertinimui šiame darbe išmatuotas laikinė silicio fotodiodo trumpo jungimo srovė trumpame ( $\sim 2$  s) ir ilgame ( $\sim 160$  s) laiko intervaluose.



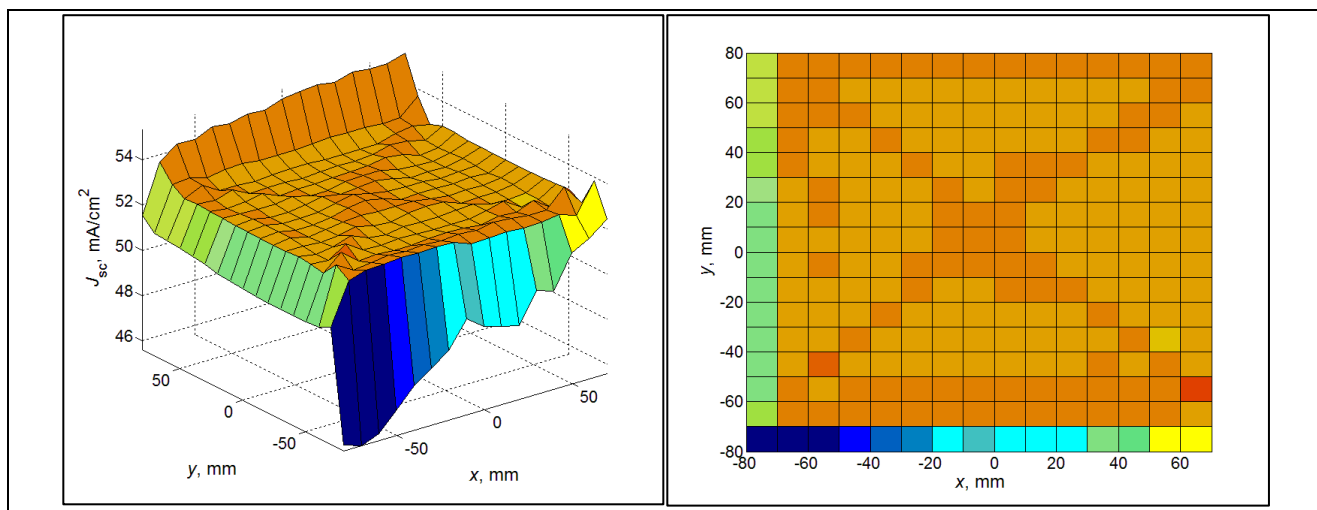
28 pav. Laikinės silicio fotodiode trumpos srovės priklausomybės. Kairėje: 2 s laiko intervalas, 30 taškų/sec matavimo raiška; dešinėje: 160 s laiko intervalas, 25 taškų/sec matavimo raiška

28 pav. matosi, jog trumpo laiko intervale fotodiode srovė visiškai nepakinta, o ilgo matavimo metu yra lėtas srovės mažėjimas. Tai gali būti sietina su imitatoriaus ar fotodiode šilimu. Vis dėl to, pagal standarte pateikiamą formulę paskaičiavus laikinį nestabilumą, nustatyta, jog trumpalaikis energinės apšvietos nestabilumas (*angl. STI – shortterminstability*) yra lygus 0 %, o ilgalaikis energinės apšvietos nestabilumas (*angl. LTI – longterminstability*) – 0,13 %, kas, pagal 1 lentelėje pateikiamus kriterijus atitiktų A klasės imitatoriams keliamus reikalavimus.

### 3.5 Papildomi tyrimai

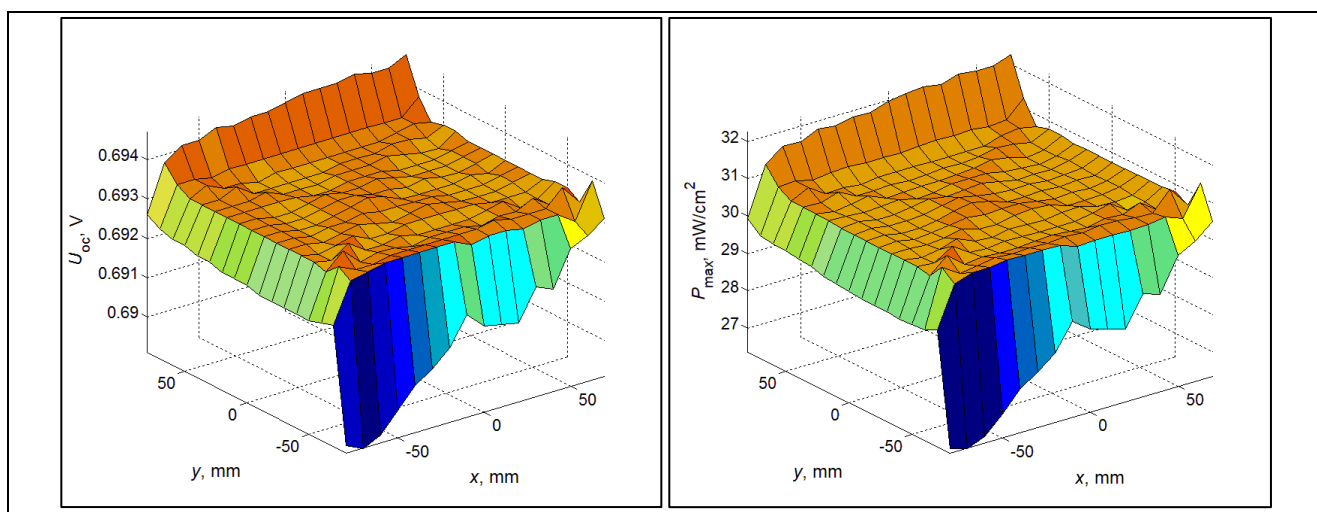
#### 3.5.1 Silicio saulės elemento fotoatsako modeliavimas

Naudojant išmatuotus imitatoriaus kuriamus spektrus ir „PCIDmod 6.2“ programinę įrangą, buvo sumodeliuotos voltamperinės charakteristikos *paprastam* 100 µm storio silicio saulės elementui. Pagal jas nustatyti trumpo jungimo srovės, atviros grandinės įtampos ir maksimalios galios verčių skirstiniai matavimo plokštumoje. 29 pav. ir 30 pav. stebima, jog trumpo jungimo srovės ir atviro jungimo įtampos saulės elemente turėtų pasiskirstyti panašiu principu, kaip ir anksčiau pateikti energinės apšvietos skirtinių matavimų rezultatai – atsiranda nežymus pokytis įstrižainėse. Apšvietus elementą imitatoriaus kuriama spinduliuote, maksimalios vertės:  $J_{sc}(\max) = 52,5 \text{ mA/cm}^2$ ;  $U_{oc}(\max) = 0,693 \text{ V}$ ;  $P_{\max}(\max) = 30,6 \text{ mW/cm}^2$ . Tuo tarpu parinkus programos kūrėjų pateikiamą AM1.5G standartinės spinduliuotės parametrus nustatytos mažesnės vertės:  $J_{sc}(\max) = 38,19 \text{ mA/cm}^2$ ;  $U_{oc}(\max) = 0,6842 \text{ V}$ ;  $P_{\max}(\max) = 36,45 \text{ mW/cm}^2$ . Taip yra dėl to, jog standartinė spinduliuotė kuria  $1000 \text{ Wm}^{-2}$  energijos spinduliuotę visame spektre, o tuo tarpu imitatorius kuria šiek tiek didesnę energinę apšvietą gerokai siauresniame bangų ilgių ruože.



29 pav. Sumodeliuotas trumpo jungimo srovės skirstinys matavimo plokštumoje

$$[J_{sc}(max) = 52,5 \text{ mA/cm}^2]$$



30 pav. Sumodeliuoti atviros grandinės įtampos (kairėje) ir maksimalios galios (dešinėje) skirstiniai matavimo ploštumoje

$$[U_{oc}(max) = 0,693 \text{ V}; P_{max}(max) = 30,6 \text{ mW/cm}^2]$$

Vis dėl to, pavaizduoto skirstinio įstrižainėse ir kraštuose generuojama fotosrovė ne sumažėja, bet išauga. Taip yra dėl to, jog (kaip parodyta 20 pav., bei 21 pav.) apšvietos sumažėjimui pagrindinę įtaką daro baltų šviestukų masyvo energinė apšvieta – šiuo atveju ilgesnių bangų intervalų indėlis į spektrą santykinai padidėja. Tuo tarpu, programa visus spektrus normuoja į  $1 \text{ kW/m}^2$  – vietoj bendro energinės apšvietos sumažėjimo tiesiog gaunamas  $> 600 \text{ nm}$  spinduliuotės padidėjimas. Matuojant fotosrovę silicio fotodiodu jau buvo pastebėta, jog ilgesnių bangų šviestukai generuoja didžiąją dalį fotosrovės. Todėl galima teigti, jog energinės apšvietos netolygumą įmanoma kompensuoti srovių raudoniems šviestukams padidinimu, tačiau aukojant spektrinį atitikimą.



### 3.5.2 Surinkto saulės imitatoriaus be veidrodžių sistemos matavimai

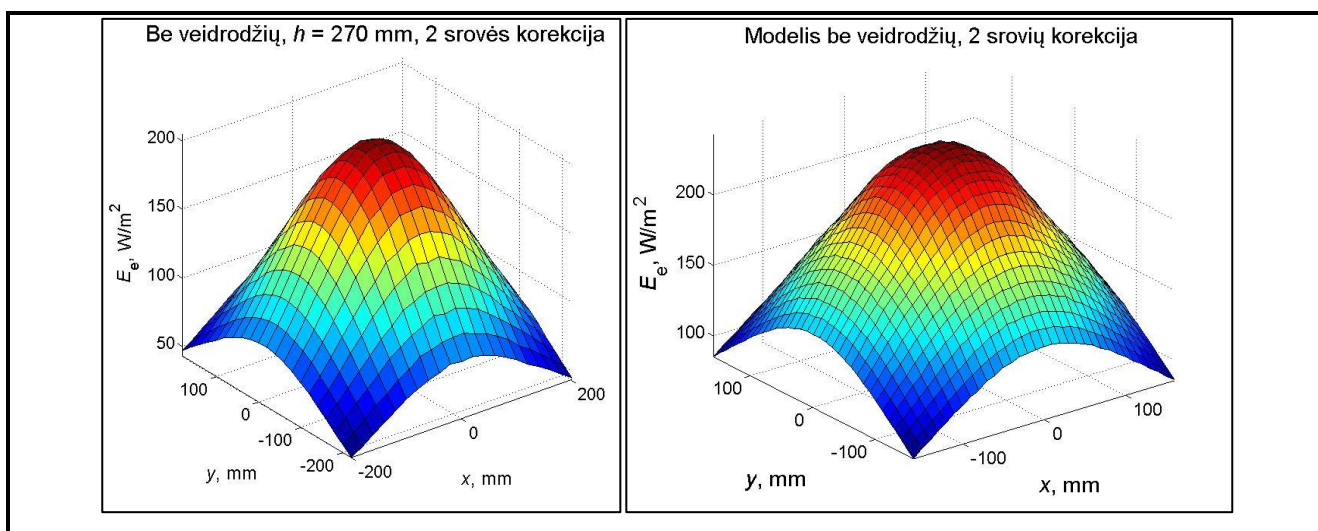
Tuo pačiu buvo išmatuotas surinkto saulės imitatoriaus be veidrodžių sistemos skirstinys atstumu  $H = 270$  mm nuo matavimo plokštumos, siekiant patikrinti modelio be veidrodžių tikslumą bei įvertinti modulinio imitatoriaus perspektyvas.

Pirmiausia, pagal eksperimentinius rezultatus nustatytos naujos maitinimo srovių vertės („2 srovių korekcija“ – imitatorius BE veidrodžių sistemos), kurioms esant būtų kuo tiksliau patenkinami spektrinio atitikimo reikalavimai, atsižvelgiant į bendrą energinės apšvietos vertę (7 lentelė).

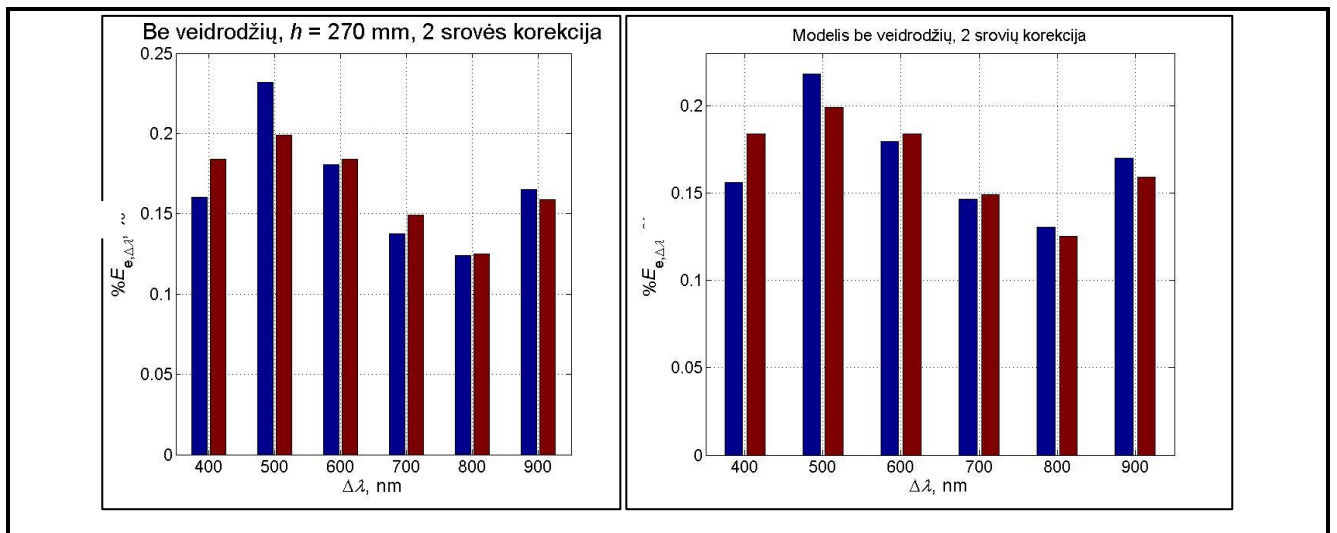
7 lentelė. 2 srovių korekcijos metu nustatytos srovės ir  $D_p$ .

Šviestukų grupė	Bridge lux	LZ4 660 nm	LZ4 740 nm	LZ4 850 nm	LZ4 940 nm
Nustatyta srovė	2,34 A	0,247 A	1 A	0,483 A	0,95 A
Nustatytas $D_p$	0,85	0,25	1	0,5	0,9

Nustačius naujas vertes išmatuoti bei sumodeliuoti tiek energinės apšvietos tiek spektriniai pasiskirstymai. Išmatuotos energinės apšvietos vertės (31 pav.) vėl buvo 15% mažesnės. Iš to galima spręsti, jog joms įtaką padarė ne tik veidrodžių atspindžio koeficientų verčių neatitikimas, bet labiau atstumo tarp šviestuko ar imitatoriaus ir matavimo plokštumos netikslumas ( $\Delta H < 5\%$ ) kažkuriame modeliavimo ir/ar matavimų etape. Vis dėl to, energinės apšvietos procentinės dalys spektro intervalams (32 pav.) praktiškai sutampa ( $\Delta < 5\%$ ) ir netgi atitinka A klasės imitatoriams keliamus reikalavimus.



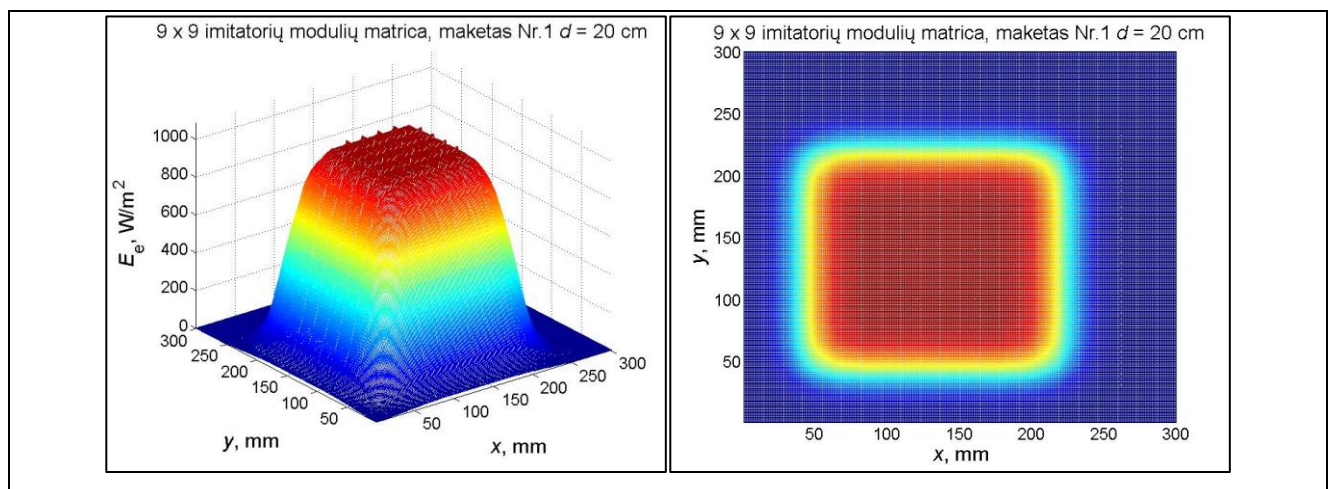
31 pav. Imitatoriaus be veidrodžių sistemos kuriamas energinės apšvietos skirstinys



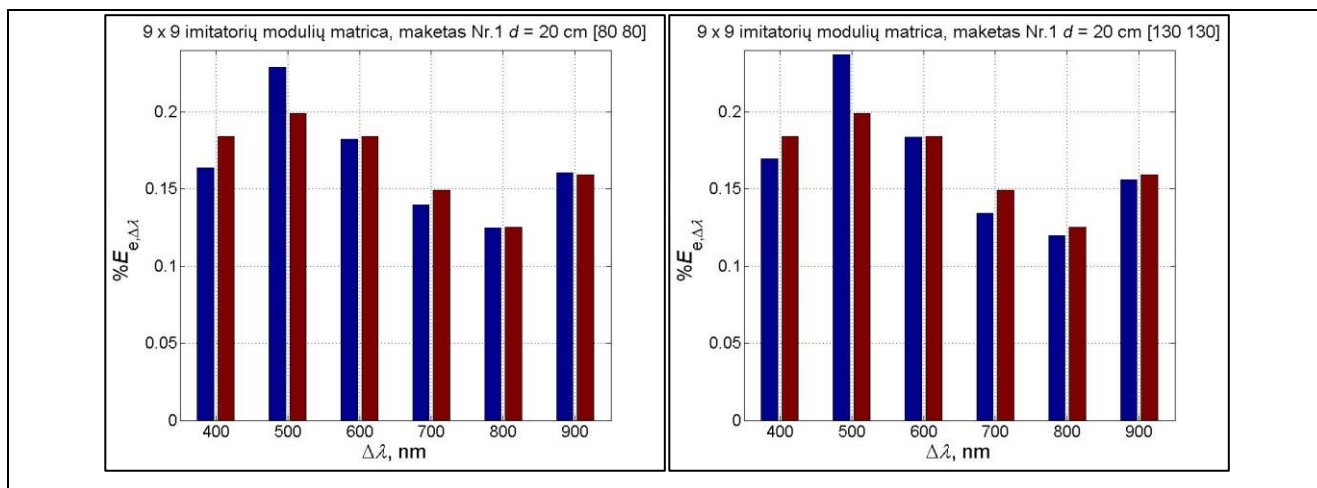
32 pav. Imitatoriaus be veidrodžių sistemos energinės apšvietos procentinės dalys spektro intervalams taške [0 0] (mėlyni stulpeliai) palyginimas su standarto numatytomis vertėmis (raudoni stulpeliai)

Kadangi nustatyta, jog modelis yra pakankamai tikslus, galima patikrinti, ar įmanoma iš tokių modulių kaip pagaminti didelio ploto saulės imitatorių.

Šiuo atveju, sugeneruotas didelio ploto skirstinys prietaisui esant  $h = 270$  mm atstumu nuo matavimo plokštumos. Pastūmus skirstinį atitinkamu atstumu galima gauti kelių sujungtų modulių energinės apšvietos ir spektrinio pasiskirstymų rezultatus (33 pav., 34 pav.). Kaip ir visada, pagrindiniai keliami reikalavimai: ne mažesnė nei  $1000 \text{ W/m}^2$  energinė apšvieta, ne didesnis nei 2% energinės apšvietos nuokrypis nuo vidutinės vertės, 0,75-1,25 spektrinis atitikimas visoje matavimo plokštumoje.



33 pav. Didelio ploto saulės imitatoriaus, sudaryto iš sukonstruotų modulių energinės apšvietos skirstinio modelis

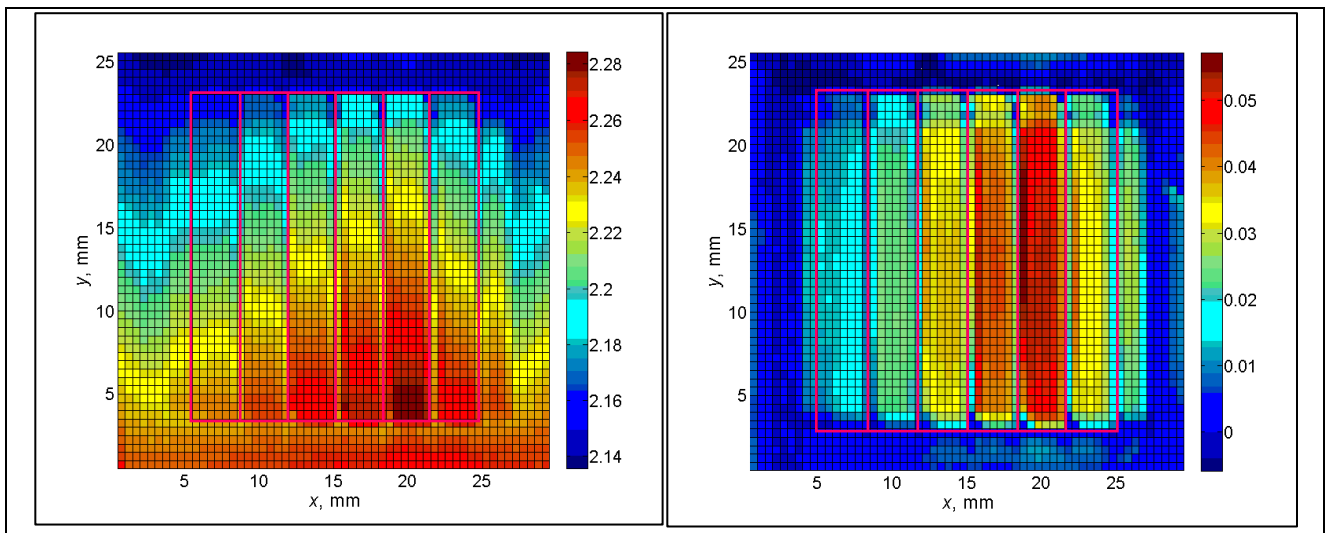


34 pav. Didelio ploto saulės imitatoriaus, sudaryto iš sukonstruotų moduliųsumodeliuotos energinės apšvietos procentinės dalys spektro intervalams taškuose [80 80] ir [130 130] (mėlyni stulpeliai) palyginimas su standarto numatytomis vertėmis (raudoni stulpeliai)

Sumodeliavus skirstinius stebima, jog panaudojus  $9 \times 9$  modulių, atitinkančių maketą nr. 1, matricą (viso 1539 šviestukai), galima pagaminti saulės imitatorių atitinkantį AAA klasei keliamus reikalavimus ( $1 \times 1$ ) m<sup>2</sup> plote, šviečiant  $h = 270$  mm atstumu. Panaudojus veidrodžių sistemą imitatoriaus kraštuose ir nustatius optimalų atstumą tarp imitatoriaus ir matavimo plokštumos, reikalingų modulių kiekį galima dar bent dvigubai sumažinti.

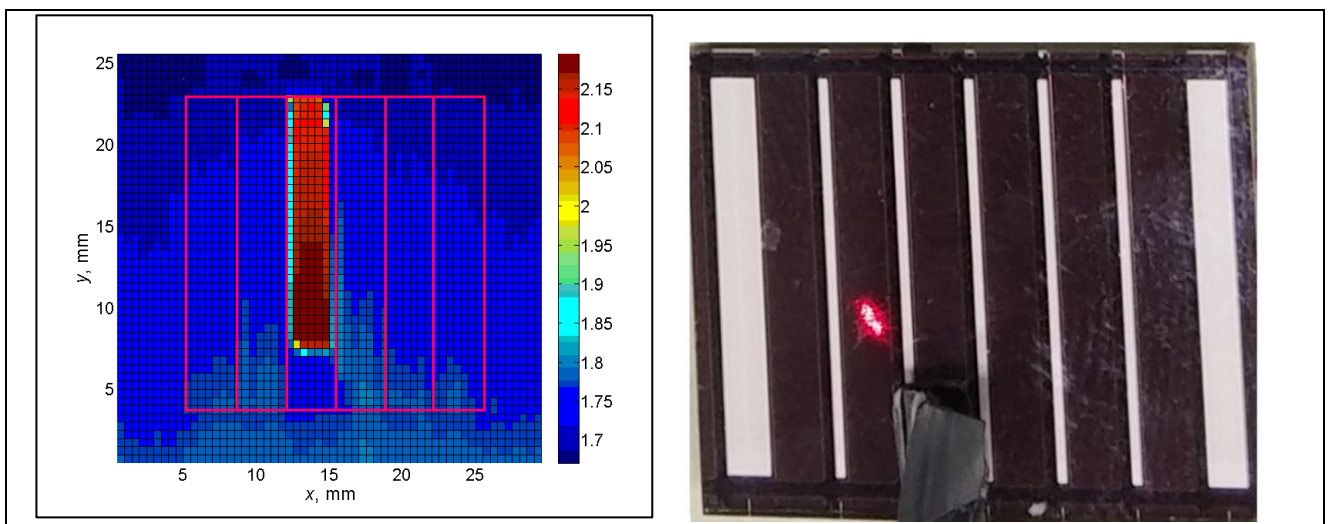
### 3.5.3 Lazero spindulio indukuotų srovių (LBIC) metodo taikymo galimybių įvertinimas

Lygiagrečiai imitatoriaus tobulinimui buvo įvertintos galimybės tiriamaį imitatoriaus maketą su veidrodžių sistema būtų galima įdiegti LBIC (*angl. LaserBeamInducedCurrent*) tyrimų metodiką mažesne fotosrove išsiskiriančių sričių identifikavimui. Tam buvo panaudotas amorfiniosilicijosaulės elementų minimodulis, sudarytas iš šešių nuosekliai sujungtų sričių. Jis buvo apšviestas baltų šviestukų masyvu ir praskenuotas raudonu lazeriu, matuojant elemento fotosrovę. Matavimo rezultatuose, pateikiamuose 35 pav., galima įžiūrėti atskirus segmentus, atskirtus kontaktiniais takeliais. Taip pat, matoma, jog papildomai lazeriu sugeneruota srovė, esant atskirų segmentų srovės ribojimui, yra vos kelių dešimčių  $\mu\text{A}$  eilės. Tikėtina, kad stebimas nežymus fotosrovės pasisikirstymo gradientas kryptimi atsiranda dėl papildomų atspindžių nuo motorizuoto koordinatinio staliuko šono (atspindžio plokštuma tolsta nuo elemento ykryptimi).



35 pav. Baltų šviestukų masyvo apšviesto ir lazerio spinduliu praskenuoto 6 nuosekliai sujungtų segmentų saulės elemento fotosrovės atsakas (mA) (kairėje) ir lazerio spinduliuotės sukeltas fotosrovės pokytis (mA) (dešinėje)

Toliau vieno segmento ketvirtadalis buvo uždengtas, taip specialiai jame sumažinant fotosrovę (kaip parodyta 36 pav. dešinėje). Praskenavus tokį dalinai uždengtą elementą išryškėja zona, kurioje fotosrovė padidėja 25 % (36 pav. kairėje). Taip yra dėl to, jog dalinai uždengtas segmentas riboja viso minimodulio fotosrovę (iki 1,7 mA), o apšvietus jo neuždengtą dalį lazeriu kompensuojamas šis srovės ribojimas, sukuriant papildomų krūvininkų, ir fotosrovė padidėja iki maksimalios vertės. Eksperimento nuotraukoje matomas lazerio spindulio išplitimas dėl keleriopo atspindžio nuo elemento ir nuo stiklo.



36 pav. Baltų šviestukų masyvo apšviesto ir lazerio spinduliu praskenuoto 6 nuosekliai sujungtų segmentų saulės elemento fotosrovės atsakas (mA), uždengus ~25% vieno segmento (kairėje) ir šio eksperimento nuotrauka (dešinėje)

Taigi, galima spręsti, jog imitatoriaus kuriama spinduliuotė yra pakankamai tolygi, o eksperimento struktūra yra pakankamai nesudėtinga, norint ištirti fotosrovės ribojimus, sukeltus mažesne fotosrove pasižyminčių saulės elementų.

## Išvados

1. Dėl veidrodžių sistemos nulemtu homogeniško saulės imitatoriaus energinės apšviestos pasiskirstymo, su tik 17-23 didelės galios šviestukais galima pasiekti  $(8 \times 8) \text{ cm}^2$  AAA klasės reikalavimus atitinkantį apšviečiamą plotą, o ABA klasės reikalavimus -  $(10 \times 13) \text{ cm}^2$ . Šiuos plotus riboja veidrodžių sistemos netobulumas ir 400-500 nm intervalo šviesos trūkumas, kurį ateityje galima būtų kompensuoti pridėdant papildomą mėlynų šviestukų grupę.

2. PC1D programa sumodeliavus standartinio silicio saulės elemento fotoatsaką į imitatoriaus kuriamą spinduliuotę gautas santykinai didelis  $J_{sc} = 52,5 \text{ mA/cm}^2$  trumpo jungimo srovės tankis,  $U_{oc}(\text{max}) = 0,693 \text{ V}$  atviros grandinės įtampa ir  $P_{\text{max}}(\text{max}) = 30,6 \text{ mW/cm}^2$  maksimali pasiektina galia yra lemiami imitatoriaus emisijos spektro, nes  $1000 \text{ W/m}^2$  energinė apšvieta yra pasiekama nenaudojant ultravioletinės ir ilgesnių nei  $1.1 \mu\text{m}$  bangų ilgių infraraudonosios spinduliuotės šaltinių.

3. Kompiuterinio modeliavimo metodais ištirta, jog panaudojus  $9 \times 9$  modulių matricą, apšviečiančią matavimo plokštumą atstumu  $h = 270 \text{ mm}$ , galima sukurti AAA klasės reikalavimus atitinkančią spinduliuotę  $1 \text{ m}^2$  plote. Homogeniškesnis energinės apšvietos pasiskirstymas dėl veidrodžių sistemos imitatoriaus kraštuose leistų modulių skaičių sumažinti daugiau nei 2 kartus optimizavus atstumą iki matavimo plokštumos.

4. Atlikus lazerio spindulio indukuotų srovių (LBIC) tyrimą, saulės elementų modulį kartu apšviečiant baltų šviestukų masyvu, nustatyta, jog tokio imitatoriaus kuriama spinduliuotė yra pakankamai tolygi, norint ištirti fotosrovės ribojimus, sukeltus mažesne fotosrove pasižyminčių saulės elementų.

## Lite ratūros šaltinių sąrašas

- [1] Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC
- [2] International Electrotechnical Commission standard IEC 60904-3 Ed. 2.0
- [3] Jörg Petrasch, Patrick Coray, Anton Meier, Max Brack, Peter Häberling, Daniel Wuillemin and Aldo Steinfeld, A Novel 50kW 11,000 suns High-Flux Solar Simulator Based on an Array of Xenon Arc Lamps, *J. Sol. Energy Eng* 129(4), 405-411 (Aug 25, 2006) (7 pages) doi:10.1115/1.2769701
- [4] B.H. Hamadani, K. Chua, J. Roller, M.J. Bennahmias, B. Campbell, H.W. Yoon, B. Dougherty, Towards realization of a large-area light-emitting diode-based solar simulator, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 21(4), 779–789 (2013).
- [5] S. Kohraku, K. Kurokawa, A fundamental experiment for discrete-wavelength LED solar simulator, *Sol. Energ. Mat. Sol. Cells* 90(18-19), 3364-3370 (2006).
- [6] G. Grandi, A. Ienina, M. Bardhi, Effective Low-Cost Hybrid LED-Halogen Solar Simulator, *IEEE Transactions on Industry Applications* 50(5), 3055 – 3064 (2014).
- [7] F. Plyta, T. R. Betts, R. Gottschalg, Potential for LED solar simulators, *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*; 6744248: 701-705 (2013).
- [8] Ž. Vosylius, „Energinės apšvietos ir saulės elementų fotoatsako pasiskirstymo modeliavimas didelio ploto (>1m<sup>2</sup>) saulės imitatoriams, naudojamiems šviestukų masyvus“, Mokslinio tiriamojo darbo ataskaita, 2016, Vilnius.
- [9] ASTM International standard ASTM E927 – 10.
- [10] Japanese Standards Association standard JIS C 8912:1998/Amendment 2:2011.
- [11] D. Kolberg, F. Schubert, N. Lontke, A. Zwigart, D.M. Spinner, Development of tunable close match LED solar Simulator with extended spectral range to UV and IR, *Silicon PV*: 17-20 April 2011, Freiburg, Germany.
- [12] A. Novičkovas, A. Baguckis, A. Mekys, and V. Tamošiūnas, Compact Light-Emitting Diode-Based AAA Class Solar Simulator: Design and Application Peculiarities *IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS* 5(4):1-6 · JULY 2015
- [14] G. Grandi, An. Ienina, M. Bardhi, Effective Low-Cost Hybrid LED-Halogen Solar Simulator, *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 50, No. 5, September/October 2014 3055
- [15] <http://www.ledengin.com/products/emitters#LZ4>
- [16] <http://www.helios32.com/Eulumdat.htm>
- [17] <https://www.tu-ilmenau.de/techphys1/team-solution-processed-photovoltaics/equipment/light-beam-induced-current/>
- [18] <https://www2.pvlighthouse.com.au/resources/PC1D/PC1Dmod6/PC1Dmod6.aspx>

- [19] Institute for Energy Technology, Norway, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Germany, „PC1Dmod 6.2, User Manual“. (2016)
- [20] [http://www.pveducation.org/sites/default/files/PVCDROM/Characterisation/PDF/PC1D5\\_9.pdf](http://www.pveducation.org/sites/default/files/PVCDROM/Characterisation/PDF/PC1D5_9.pdf)
- [13] International Standard IEC 60904-9, Edition 2.0



## Santrauka

Šio darbo tikslas – suprojektuoti ir pagaminti šviestukinį saulės imitatorių, atitinkantį AAA klasei keliamus reikalavimus, panaudojant veidrodžių sistemą.

Darbe nagrinėjamas penkių skirtingų tipų šviestukų saulės imitatoriaus su veidrodžių sistema teorinis modelis bei, surinkus tokį imitatorių, išmatuoti jo kuriamos spinduliuotės parametrai. Tyrime nustatyta kvadratu išdėstytų veidrodžių sistemos įtaka energinės apšvietos skirstiniui ir spektriniam pasiskirstymui matavimo plokštumoje, įvertinta tokio imitatoriaus klasė pagal tris tarptautinių standartų pateikiamus kriterijus. Taip pat, apžvelgiamos LBIC metodo įtraukimo į sistemą bei didelio ploto modulinio imitatoriaus sukūrimo galimybės, sumodeliuotas fotovoltinio elemento fotoatsakas į kuriamą spinduliuotę.

Sukurtas imitatorius generuoja AAA klasę atitinkančią spinduliuotę ( $8 \times 8$ ) cm<sup>2</sup> plote. Taip pat, ( $10 \times 13$ ) cm<sup>2</sup> stačiakampio formos plote užtikrinama ABA klasei keliamus reikalavimus atitinkanti spinduliuotė. Imitatoriaus kokybę galima pagerinti patobulinus veidrodžių sistemą; pakeitus vieną baltą šviestuką mėlynu-UV šviestuku pagerėtų spektrinis atitikimas, o padidinus raudonų šviestukų indėlį – energinės apšvietos tolygumas, tačiau aukojant spektrinį atitikimą. Taip pat pademonstruota, jog šiame imitatoriuje galima įdiegti LBIC matavimus, norint ištirti fotosrovės ribojimus, sukeltus mažesne fotosrove pasižyminčių saulės elementų. Panaudojus  $9 \times 9$  modulių matricą, apšviečiančią matavimo plokštumą atstumu  $h = 270$  mm, galima sukurti AAA klasės reikalavimus atitinkančią spinduliuotę 1 m<sup>2</sup> plote.

## Summary

The aim of this work was the design, production and investigation of the AAA-class solar simulator employing high-power light emitting diodes and a mirror system.

Results of simulation of solar simulator employing arrays of 5 different types of light emitting diodes and mirrors, as well as properties of the irradiance generated by a produced simulator, are covered in this work. The influence of a system of mirrors on the irradiance and the spectral distributions at the measurement plane was investigated allowing to classify manufactured simulator in three categories according to IEC60904-9 Ed. 2 international standard. Moreover, incorporation of LBIC method and possibility of making a large area module are deduced and the response of photovoltaic elements was calculated.

It has been established that this kind of simulator is able to generate AAA-class irradiance in ( $8 \times 8$ ) cm<sup>2</sup> area. Also, ABA-class is ensured in ( $10 \times 13$ ) cm<sup>2</sup> rectangular area. The quality may be improved by optimising mirror-system. Replacing one white LED with blue-UV one should lead to a better spectral match and increasing the influence of red LEDs may result in better uniformity of irradiance. It has also been shown that it is possible to incorporate LBIC method in order to reveal the current limiting cells of the solar panel.  $9 \times 9$  matrix of imitator modules without mirrors could provide AAA-class irradiance in 1 m<sup>2</sup> area from the height of 270 mm.