



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Šviestukų optinių charakteristikų priklausomybės nuo darbo režimo tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Žymantas Dapkus

Projekto autorius

Prof. Linas Svilainis

Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Šviestukų optinių charakteristikų priklausomybės nuo darbo režimo tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektronikos inžinerija (6211EX012)

Žymantas Dapkus

Projekto autorius

Prof. Linas Svilainis

Vadovas

Prof. Vytautas Markevičius

Recenzentas

Kaunas. 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Žymantas Dapkus

Šviestukų optinių charakteristikų priklausomybės nuo darbo režimo tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Žymanto Dapkus, baigiamasis projektas tema „Šviestukų optinių charakteristikų priklausomybės nuo darbo režimo tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

Žymantas Dapkus

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Dapkus, Žymantas. Šviestukų optinių charakteristikų priklausomybės nuo darbo režimo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. Linas Svilainis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Elektronikos inžinerija, Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: šviestukai, optinės charakteristikos, darbo režimas, senėjimas.

Kaunas 2020. 72 p.

Santrauka

Darbe apžvelgiamos pagrindinės šviestukų tyrimuose naudojamos optinės šviesos šaltinių charakteristikos ir parametrai – šviesos srautas, spalvinė temperatūra, spalvinės koordinatės, ilgaamžiškumas. Pateikiama šviestukų optinių charakteristikų pokyčio įvertinimo ir kompensacijos metodų, sutinkamų elektroniniuose įrenginiuose, kuriuose yra svarbi aukšta šviesos kokybė, analizė. Išskiriamos pagrindinės tiriamos šviestukų savybės – šviesos srautas, spalvinės koordinatės ir voltamperinė charakteristika. Tyrimui atlikti pasirenkami moderniose apšvietimo sistemose naudojami šešių skirtingų tipų šviestukai: gintarinės, citrinų žalios, ciano, mėlynos ir violetinės spalvų. Sudaroma šviestukų charakteristikų tyrimo metodologija ir paruošiama eksperimentinė darbo įranga. Parenkamas šviestukų darbo režimas, kuomet šviestukai veikia tekant 500 mA srovės stipriui ir esant 60 °C aplinkos temperatūrai (temperatūrinio poveikio kameroje). Tokiomis sąlygomis gaunamas šviestukų darbo laiko (senėjimo) paspartinimas apytikriai du kartus. Šviestukų optinių charakteristikų matavimai atliekami dešimt kartų „GL Spectis 1.0 Touch“ spektroskopu diskrečiais laiko tarpais kas 336 val. (2 sav.). Gauti duomenys atvaizduojami grafinėmis priklausomybėmis, atliekama šviesos srauto kitimo aproksimacija ir ekstrapoliacija (progozė) pasirinktais modeliais, kai srovės stipris šviestukuose yra lygus 200 mA ir 500 mA. Šviestukų spalvinių koordinatėjų pokytis tyrimo metu įvertinamas statistiniais metodais. Pateikiamas pavyzdys, kokią įtaką 1800 K, 2700 K ir 6500 K baltos spalvos šviesos parametrų nuokrypiui turi tiriamų šviestukų optinių charakteristikų kitimas.

Dapkus, Žymantas. The Research of Dependence of Optical Characteristics of LEDs upon Operating Mode. Master's Final Degree Project / prof. Linas Svilainis. Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics Engineering, Engineering Science.

Keywords: LED, optical characteristic, operating mode, ageing.

Kaunas, 2020. 72.

Summary

In this work a brief of the main optical characteristics and parameters of the light sources used in research of LEDs is presented. It includes the following properties: luminous flux, colour temperature, chromaticity, lifetime. An estimation and correction methods and algorithms of variation of the optical characteristics of LEDs found in electrical devices, which require high light quality, is reviewed. The principal characteristics of the research of LEDs are distinguished. The properties of LEDs under investigation are luminous flux, colour coordinates (chromaticity) and current-voltage characteristic. Six types of LEDs, found in modern lighting systems, are chosen for observation. The set consists of amber, lime, cyan, blue and violet colour LEDs. The methodology of LEDs research is formed and experimental work environment, along with equipment, is prepared. The operating mode of LEDs working at 500 mA current in 60 degrees environment (programmable temperature chamber) is set. Under such conditions LEDs ageing is accelerated approximately by a factor of 2. The optical characteristics of LEDs are evaluated ten times at discrete time intervals of 336 hours (2 weeks) using “GL Spectis 1.0 Touch” spectrometer. Results are plotted and luminous flux, where electrical current is 200 mA and 500 mA, approximation and trend line are fitted according to the chosen models. Difference in chromaticity coordinates of LEDs during the investigation is evaluated using statistical means. An example of the effect of variation of LEDs optical characteristics to 1800 K, 2700 K and 6500 K CCT white colour light parameters is provided.

Turinys

Įvadas	7
1. Pagrindinės optinės šviesos šaltinių charakteristikos	8
1.1. Šviesos kokybinis įvertinimas	8
1.2. Spalvinė temperatūra	9
1.3. Šviesos srautas	11
1.4. Ilgaamžiškumas	12
2. Šviestukų charakteristikų pokyčio įvertinimo metodai	14
3. Šviestukų optinių charakteristikų tyrimo metodikos sudarymas	19
4. Tyrimo rezultatai ir analizė	26
4.1. Šviesos srauto charakteristikos	27
4.2. Spalvinės koordinatės	38
4.3. Voltamperinės charakteristikos	52
Išvados	55
Literatūros sąrašas	56
Priedai	60
1 priedas. Šviestukų moduliai.....	60
2 priedas. Spektrografas „GL Spectis 1.0 Touch“	61
3 priedas. Laboratorinis maitinimo šaltinis „RND 320-KA3005P“	62
4 priedas. Temperatūrinio poveikio kamera „Terchy MHK-225AK“	63
5 priedas. Matavimo duomenų lentelės	64

Įvadas

Šviesa žmogui – kaip ir didžiajai daliai gyvų organizmų – yra gyvybiškai svarbi. Skiriamas dvejopas šviesos poveikis: vizualus ir nevizualus. Šviesos sudaromas vizualus poveikis yra susijęs su žmogaus regos pojūčiu ir atsakingas už tinkamą ir kokybišką žmogaus matomų spalvų atkūrimą, jų suvokimą. Nevizualus šviesos poveikis – tai šviesos daroma įtaka žmogaus cirkadiniam ritmui. Šviesos poveikis žmogaus bioritmui – aktyvi šių dienų tyrimų sritis. 2017 metais Nobelio fiziologijos ir medicinos premija buvo įteikta trims mokslininkams už cirkadinio ritmo fenomeno gyvuose organizmuose atradimą [1]. Nustatyta, kad žmogaus vidinę savijautą ir sveikatą – nuotaiką, darbingumą, miego kokybę – lemia žmogaus akies tinklainėje esantis melanopsino fotoreceptoriai [2, 3]. Kartu su intensyviais moksliniais tyrimais pastaruoju metu pradėti kurti į žmogų orientuoti (angl. *HCL – human centric lighting*) dirbtiniai šviesos šaltiniai – šviestuvai ir apšvietimo sistemos. Žmogaus cirkadinis ritmas išlaikomas optimaliu ir nepakitusiu, kuomet melanopsino fotoreceptoriai yra stimuliuojami natūralia dienos šviesa. Į žmogų orientuotos šviesos sistemų tikslas – sudaryti tokį šviesos šaltinį, kuris pasižymėtų geriausiomis vizualiomis ir nevizualiomis šviesos savybėmis, t. y., būtų artimas dienos šviesai ir autonomiškai palaikytų žmogaus natūralų cirkadinį ritmą namų ar darbo aplinkoje [4, 5]. Nevizualus šviesos poveikis yra subjektyvus ir kokybinis efektas, todėl jis apibūdinamas ir kiekybiškai įvertinamas vizualiais šviesos parametrais: šviesos intensyvumu, spalvinėmis koordinatėmis, spektro sudėtimi ir kt. Nevizualaus šviesos poveikio pavyzdys – pakankamo intensyvumo natūrali dienos šviesa, turinti spektre daug mėlynos spalvos, pagerina žmogaus budrumą, aktyvumą, padidina darbingumą, tačiau jei tokia šviesa naudojama ne pirmoje dienos pusėje, o vakaro metu, tuomet žmogui gali būti sukeliama miego sutrikimai [1, 6].

Didžiojoje dalyje šiuolaikinių šviestuvų pagrindinis šviesos formavimo šaltinis yra sudarytas iš vienos ar kelių skirtingų spalvų šviesos diodų – šviestukų. Šie puslaidininkiai elementai turi privalumų valdymo, efektyvumo, ilgaamžiškumo ir temperatūriniu atžvilgiu lyginant su įprastais dirbtiniais šviesos šaltiniais (kaitrinėmis, fluorescencinėmis lempomis ir kt.), tačiau jų parametrai kinta priklausomai nuo parinkto darbo režimo – aplinkos temperatūros, srovės stiprio, darbo laiko [7]. Kadangi nevizualus šviesos poveikis žmogui yra susijęs su šviesos šaltinio parametrais, labai svarbu išlaikyti šiuos parametrus tinkamus – kompensuoti jų nuokrypius – po ilgo šviesos šaltinio darbo laiko. Apšvietimo sistemose šviestukų parametrai gali būti įvertinami ir koreguojami remiantis metodais, kuriuose yra arba nėra naudojamas grįžtamasis ryšys.

Šio **darbo tikslas** – ištirti, kaip spalvotų šviestukų, naudojamų apšvietimo įrenginiuose, optinės charakteristikos kinta priklausomai nuo parinkto darbo režimo.

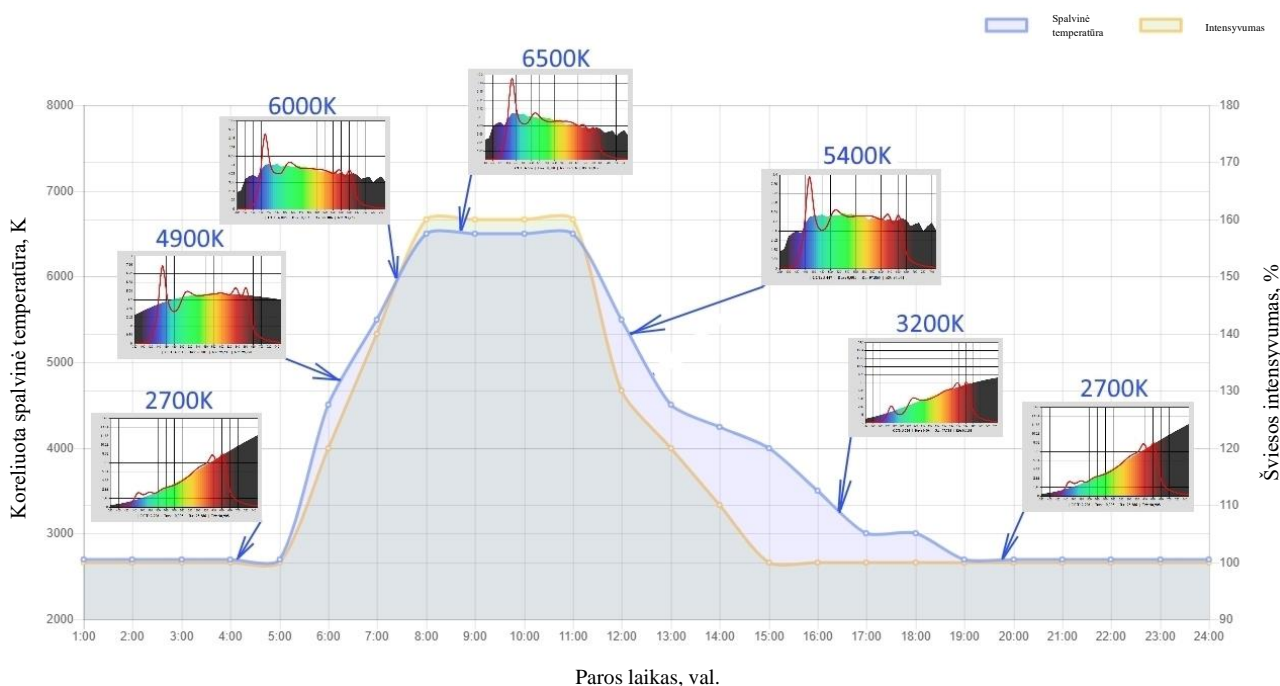
Tikslui pasiekti išsikelti uždaviniai:

- apžvelgti pagrindines optines šviesos šaltinių charakteristikas ir jų pokyčiui įvertinti naudojamus metodus;
- sudaryti tyrimo metodiką ir parengti eksperimentinę įrangą;
- atlikti šviestukų optinių charakteristikų parinktiems darbo režimams tyrimą;
- atlikti šviesos srauto kitimo prognozę, statistiniu metodu įvertinti spalvinių koordinatinių pokyčių ir daromą įtaką baltos spalvos šviesai bei įvertinti voltamperinės charakteristikos pokyčių šviestukams degraduojant.

1. Pagrindinės optinės šviesos šaltinių charakteristikos

Natūrali dienos šviesa – tai etaloniškos spektrinės sudėties baltos spalvos šviesa, kuriai esant yra palaikomas natūralus žmogaus biologinis ritmas. Dirbtinių šviesos šaltinių kuriamos šviesos spektrai su etaloniniu spektru yra palyginami remiantis *D65* apšvietimo standartu. Šiame standarte įvertinama, kokią stimuliuojantį poveikį kuria pasirinktos šviesos spektras kiekvienai iš žmogaus fotoreceptorių grupių, atsakingų už vizualų ir nevizualų šviesos poveikį, lyginant su etaloniniu šviesos spektru [8].

Natūralios šviesos spektras yra dinamiškas – spektro optiniai parametrai kinta priklausomai nuo paros meto (žr. 1.1 pav.). Baltos spalvos atspalvis apibūdinamas koreliuota spalvine temperatūra (angl. *CCT – correlated color temperature*). Išskiriamos trys pagrindinės baltos spalvos šviesos koreliuotos spalvinės temperatūros vertės – 6500 K, 2700 K ir 1800 K. Šių spalvinių temperatūrų šviesa su atitinkamu šviesos srauto (angl. *luminous flux*) kiekiu apibrėžia svarbiausius žmogaus bioritmo paros laikus – rytą (žadinantis šviesos poveikis), popietę (raminantis šviesos poveikis) ir vėlyvą vakarą (atpalaiduojantis šviesos poveikis) [9].



1.1 pav. Dienos šviesos spektro kitimas priklausomai nuo paros laiko [6]

Reikia paminėti, kad norint išgauti kokybišką (artimą etaloniniam) baltos spalvos šviesos spektrą, šviesos kokybę nusakantys parametrai – šviesos spalvų atgavos koeficientai (angl. *CRI – color rendering index*) – R_a ir R_9 atitinkamai turi būti didesni nei 95 ir 90 visame koreliuotos spalvinės temperatūros diapazone [10, 11].

1.1. Šviesos kokybinis įvertinimas

Šviesos kokybei (spalvų atkūrimui) įvertinti ir skirtingiems šviesos šaltiniams tarpusavyje palyginti naudojamas parametras – spalvų atgavos koeficientas. Šis įvertis gaunamas apšvietus 15 spalvų pavyzdžių (angl. *TSC – test color samples*) etaloniniu ir lyginamuoju šviesos šaltiniais ir stebint kaip yra atkuriamą jų etaloniškos spalva (žr. 1.2 pav.). Kiekviena iš šių spalvų vadinama atgavos įverčiu (angl. *rendering score*), turi savo eilės numerį ir yra žymima R_i .

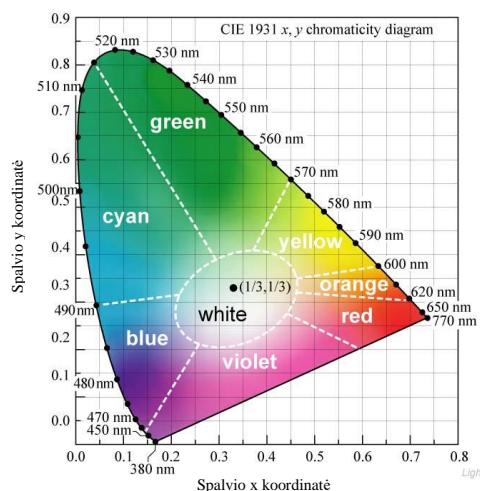


1.2 pav. Etaloniniai spalvų pavyzdžiai, naudojami *CRI* parametro įvertinimui. Iš kairės į dešinę ir iš viršaus į apačią: šviesiai pilkšva raudona, tamsiai pilkšva geltona, ryškiai gelsva žalia, vidutiniškai gelsva žalia, šviesiai melsva žalia, šviesiai mėlyna, šviesiai violetinė, šviesiai rausva violetinė, ryškiai raudona, ryškiai geltona, ryškiai žalia, ryškiai mėlyna, šviesiai gelsva rožinė, vidutiniškai alyvuogių žalia, „Azijos žmogaus odos spalva“ [12]

Etaloninis ir tobuliausias šviesos šaltinis yra natūrali tiesioginė saulės šviesa, arba dienos šviesa (5000–6500 K). Jeigu tikrinamas dirbtinis šviesos šaltinis, kurio temperatūra yra žemesnė nei 5000 K, tuomet kaip etaloninis šviesos šaltinis yra naudojama analogiškos spalvinės temperatūros kaitrinė arba halogeninė lempa. Etaloninio šviesos šaltinio spalvų atgavos koeficientas yra didžiausias ir lygus 100. Bendru atveju, koeficientas yra nustatomas tik pirmoms 8 spalvoms ir yra vadinamas R_a parametru. Dažnai išskiriamas R_9 parametras – intensyvios, ryškios raudonos spalvos atgavos įvertis. Kartais yra naudojamas visų 15 pavyzdinių spalvų įvertis R_e [12]. Kuo dirbtinio šviesos šaltinio spalvos atgavos koeficientas yra didesnis ir artimesnis 100, tuo šio šviesos šaltinio kuriama šviesa yra laikoma aukštesnės kokybės, t. y., tokia šviesa apšviestas objektas yra matomas tikromis jo spalvomis kaip natūralioje dienos šviesoje.

1.2. Spalvinė temperatūra

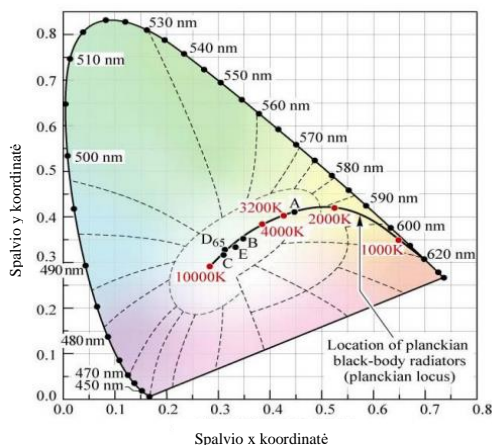
Atsižvelgiant į žmogaus akies spalvų suvokimą yra kuriami spalvų modeliai – erdvės, kuriose objektyviais kriterijais suskirstomas ir pateikiamas šviesos spalvis (angl. *chromaticity*). Plačiausiai naudojamas CIE 1931 spalvų modelis, kuriuo šviesos spalvis pateikiamas Dekarto plokštumoje (paraboloido formos) ir yra nusakomas naudojant x ir y koordinatas (žr. 1.3 pav.) [13].



1.3 pav. CIE 1931 spalvų erdvė [13]

Monochromatinės (vienos spalvos) spalvos šiame modelyje yra išsidėsčiusios paraboloido perimetru. Spalvio sotis mažėja link diagramos centro, kuriame yra balta spalva [13].

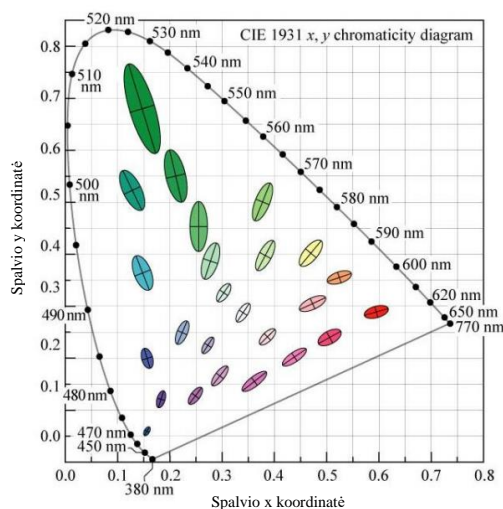
Su spalvų erdve susijęs parametras – spalvinė temperatūra, kuria nusakomas idealaus juodojo spindulio, dienos šviesos arba jai artimo dirbtinio šviesos šaltinio (pvz., kaitrinės lempos) spinduliuojamos baltos šviesos atspalvis. Juodojo spindulio atveju, jo skleidžiamo tam tikros spalvinės temperatūros šviesos koordinatės yra išsidėsčiusios ant Planko lanko (angl. *Planckian locus*) (žr. 1.4 pav.). Spalvinė temperatūra matuojama Kelvino laipsniais (K).



1.4 pav. CIE 1931 spalvų erdvė ir Planko lankas [13]

Kitų dirbtinių šviesos šaltinių, tokių kaip, kietojo kūno šviesos diodai, fluorescencinės lempos, spalvinės koordinatės nėra tiksliai ant Planko kreivės, todėl jų skleidžiamai spalvinei šviesos temperatūrai nusakyti naudojamas koreliuotas spalvinės temperatūros parametras. Šviesos šaltiniai, kurių spalvinė temperatūra yra 2700–3000 K apibūdinami kaip spinduliuojantys šiltai baltą šviesą, 3500–4000 K – neutralią baltą, o 4500–5500 K – šaltai baltą šviesą [13, 14].

Mokslininkas MacAdam'as atliko tyrimus, statistiškai įvertino ir nustatė, kad vidutiniam žmogui tam tikras spalvinis pokytis yra nepastebimas. Šis pokytis yra nematomas, jei bet kurių dviejų spalvinių koordinatė spalvų erdvėje pokytis patenka į MacAdam'o elipsės ribas (žr. 1.5 pav.).



1.5 pav. MacAdam'o elipsės [13]

Šių elipsių dydis priklauso nuo statistinio stebiniųjų įverčio, t.y., koks procentas žmonių nepastebėtų spalvinio pokyčio (65 %, 95 %, 99 %) [13]. Pagal tai skiriamos pirma, antra ir t. t. MacAdam'o elipsės, kurios dar vadinamos SCDM (angl. *Standard Deviation Colour Matching*) elipsėmis [15, 16]. Elipsių palyginimas pateikiamas 1.1 lentelėje.

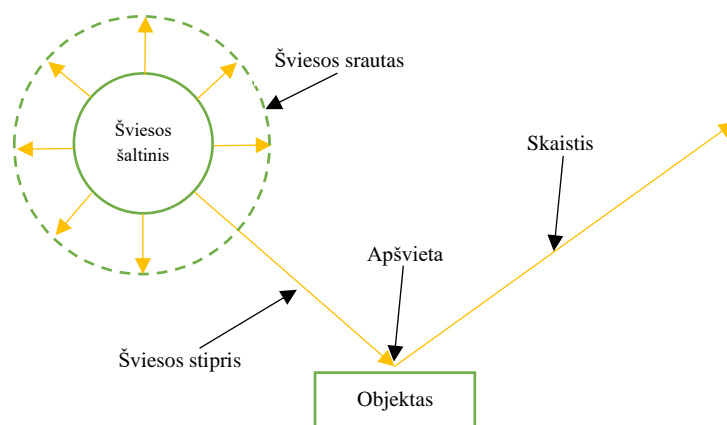
1.1 lentelė. MacAdam'o elipsių palyginimas [15]

SDCM elipsės numeris	Skiriamumas
1	Beveik neįmanoma aptikti skirtumo
2	Skirtumas gali būti pastebėtas naudojantis matavimo instrumentais
3	Yra matomas nedidelis spalvinis skirtumas
4	Yra matomas vidutinis spalvinis skirtumas
5	Yra matomas didelis spalvinis skirtumas

MacAdam'o elipsės naudojamos įvertinti galimą dirbtinių šviesos šaltinių spalvinę paklaidą, nustatyti išsibarstymą – ar yra skirtumas tarp spinduliuojamos šviesos spalvio skirtinguose šaltiniuose (pavyzdžiui, jeigu naudojama apšvietimo sistema, masyvas, sudarytas iš dviejų ar daugiau šviesos šaltinių). Pagal šias elipses į grupes taip pat yra skirstomi šviestukai (angl. *LED binning*), kadangi jų spalvinė temperatūra gamybos metu varijuoja.

1.3. Šviesos srautas

Šviesos srautas – tai charakteristika, kuria apibūdinama šviesos šaltinio skleidžiamos šviesos galia. Šis matas skiriasi nuo bendro šviesos šaltinio emituojamos šviesos spinduliuojamo srauto (angl. *radiant flux*) tuo, kad šviesos srautas yra papildomai įvertinamas atsižvelgiant į žmogaus akies jautrumo nuo skirtingų bangos ilgių priklausomybę. Šviesos srauto SI sistemos matavimo vienetas – liumenas (lm). Vienas liumenas yra apibrėžiamas kaip šviesos srautas, kurį kuria 1 cd šviesos stiprio (angl. *luminous intensity*) šviesos šaltinis 1 steradiano erdviniu kampu (žr. 1.6 pav.) [17].

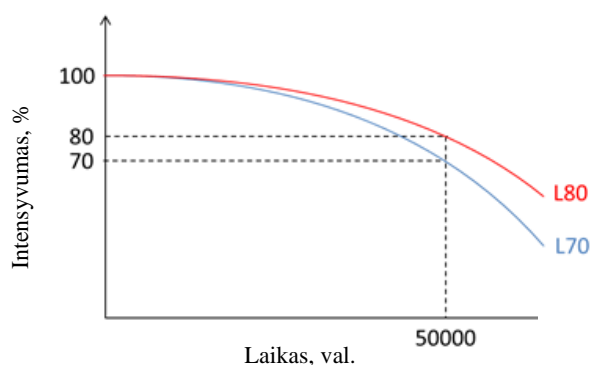


1.6 pav. Šviesos srauto ir susijusių šviesos fotometrinių dydžių iliustracija

Šviesos srauto charakteristika yra viena pagrindinių šviesos šaltinio savybių, į kurias atsižvelgiama projektuojant modernias apšvietimo sistemas – tam, kad būtų užtikrinamas keliamų reikalavimų žmogaus higienos normoms, biologinio ritmo palaikymui, pakankamai apšvietai darbo vietoje laikymasis.

1.4. Ilgaamžiškumas

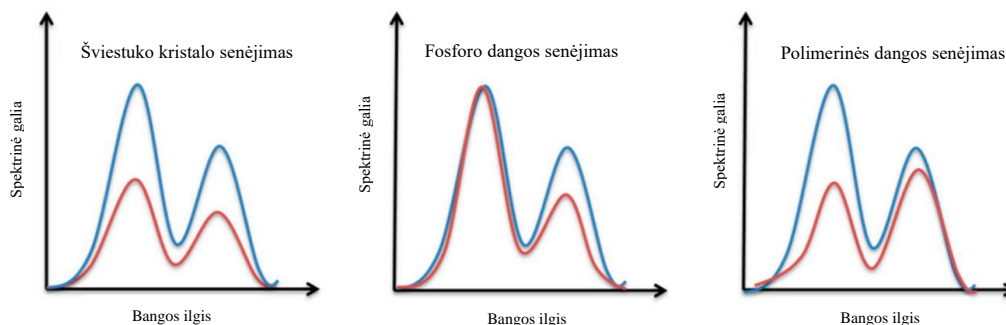
Ilgaamžiškumas – tai parametras, apibūdinantis tinkamą šviesos šaltinio veikimo trukmę. Ilgaamžiškumo sąvoka dažnai yra naudojama apibūdinti šviestukų veikimo trukmę, kuri nusakoma laiko tarpu (valandų skaičiumi), kuriam praėjus šviestuko skleidžiamas šviesos srautas (intensyvumas) sumažėja 20 % arba 30 % nuo pradinio jo srauto dydžio. Šis parametras atitinkamai žymimas L_{80} ir L_{70} . Ilgaamžiškumo parametras yra nustatomas iš šviesos šaltinio intensyvumo charakteristikos (žr. 1.7 pav.) Apšvietimo sistemų gamintojų priimta, kad L_{70} parametras būtų užtikrinamas ne mažesnis nei 50 tūkst. valandų [18]. Kitiems šviesos šaltiniams, pavyzdžiui, kaitrinėms lemputėms, ilgaamžiškumu vadinama gyvavimo trukmė – laiko tarpas, po kurio šaltinis yra sugadinamas ir nustoja funkcionuoti (perdega).



1.7 pav. L_{80} ir L_{70} tipo šviestuko šviesos srauto priklausomybė nuo darbo laiko [18]

Šviestukų ilgaamžiškumas ir senėjimo charakteristika priklauso nuo daugelio faktorių: aplinkos temperatūros, vidinės šviestuko sandaros, kristalo temperatūros, naudojamos srovės dydžio, šviestuko tipo, skleidžiamo spektro ir kt. Įvertinus šiuos parametrus sudaromas šviestuko darbo režimas.

Skiriami trys pagrindiniai šviestuko senėjimo mechanizmai: šviestuko kristalas (p-n sandūra), fosforo danga ir polimerinės medžiagos (silikono, epoksidinės dervos pagrindu) danga (žr. 1.8 pav.). Senėjant šviestuko kristalui stebimas visų spektro dedamųjų galios sumažėjimas. Degraduojant tik fosforo dangai labiau paveikiama yra ilgųjų bangų sritis, o senėjant polimerinei dangai – trumpųjų bangų sritis [19].



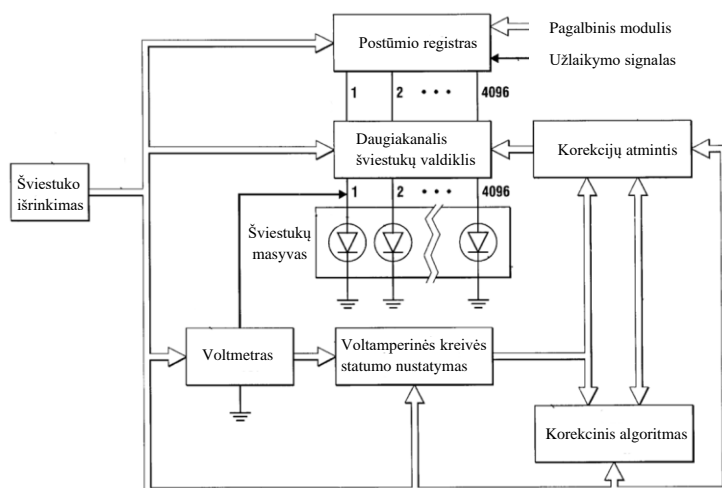
1.8 pav. Šviestuko degradacijos mechanizmai (mėlyna ir raudona kreivės atitinkamai iliustruoja pradinį ir po degradacijos baltos spalvos šviestuko spektrinės galios pasiskirstymą) [19]

Matoma, kad šviestukui senėjant mažėja jo spinduliuojamas šviesos srautas (priklausomai nuo dominuojančio senėjimo mechanizmo – visos spektro dedamosios arba tam tikra bangų sritis).

Taip pat priklausomai nuo pasirinkto šviestuko darbo režimo stebimas spalvinių koordinacijų kitimas, kuris turi didelę įtaką suminio (baltos) šviesos srauto R_a ir R_g parametrams – šviesos kokybei. Tokio tipo šviestukų charakteristikų egzistavimas ir įvertinimas sudaro vieną pagrindinių problemų modernių, į žmogų orientuotų, šviestuvų kuriamos šviesos parametrų kitimui esant ilgalaikiai perspektyvai. Laikui bėgant ir nepriklausomai nuo darbinės aplinkos temperatūros norima išlaikyti šviestuvo (ar apšvietimo sistemos) pradinius šviesos parametrus ir charakteristikas, kurie yra nustatomi gamybos metu. Pavyzdžiui, jeigu apšvietimo sistemoje yra naudojamas ne vienas, bet keli skirtingo tipo šviestukai, tai kiekvieno tipo šviestukų parametrai (šviesos intensyvumas, spalvinės koordinatės ir kt.) laikui bėgant keičiasi skirtingai (stebimos skirtingos optinės charakteristikos). Tokio tipo problemai spręsti yra reikalinga atlikti šviestukų charakteristikų pokyčio nustatymui naudojamų metodų analizę ir, ištyrus plačiausiai naudojamus šviestukus, sudaryti jų optinių charakteristikų kitimo modelį esant pasirinktam darbo režimui.

2. Šviestukų charakteristikų pokyčio įvertinimo metodai

Moderniuose apšvietimo įrenginiuose sutinkami šviestukų optinių charakteristikų nustatymo ir korekcijos algoritmai, kurie yra paremti grįžtamoju ryšiu iš įvairaus tipo jutiklių ar matavimo įtaisų. Vienas iš tokio tipo metodų yra šviestukų senėjimo įvertinimo ir kompensacijos algoritmas (žr. 2.1 pav.) naudojantis voltamperine šviestuko charakteristika. Šis metodas buvo sukurtas pagrindinio spausdinimo prietaisų modulio, sudaryto iš šviestukų masyvo, optinių parametru atstatymui laikui bėgant tam, kad būtų išlaikoma gamintojo numatyta pradinė spausdintuvo spausdinimo kokybė (šviestukų šviesos intensyvumo nuokrypis ne didesnis kaip 1–2 %). Kaip teigiama, algoritmas gali būti panaudotas ir kituose šviestukus naudojančiuose įrenginiuose, kuriuose yra svarbi aukšta šviesos kokybė [20].



2.1 pav. Šviestuko senėjimo korekcijos schema įvertinant voltamperinę charakteristiką [20]

Metodas remiasi kiekvieno kanalo šviestuko įtampos matavimu ir jo voltamperinės kreivės statumo įvertinimu. Postūmio registro, kurį valdo vedantysis modulis, pagalba išrenkamas einamasis daugiakanalio šviestukų valdiklio kanalas, tuomet išmatuojamas šio kanalo šviestuko įtampos kritis esant žinomam srovės stipriui (nustatomas daugiakanalio šviestukų valdiklio pagalba). Esant voltamperinės kreivės statumo nuokrypiams nuo pradinių ar prieš tai buvusių verčių, kurios saugojamos korekcinėje atmintyje, pagal numatytą algoritmą yra atliekama korekcija šviestukų valdymo grandinėje – atitinkamai keičiama kiekvieno kanalo šviestukų srovė. Kiekviena korekcijos iteracija yra išsaugoma ilgalaikėje atmintyje.

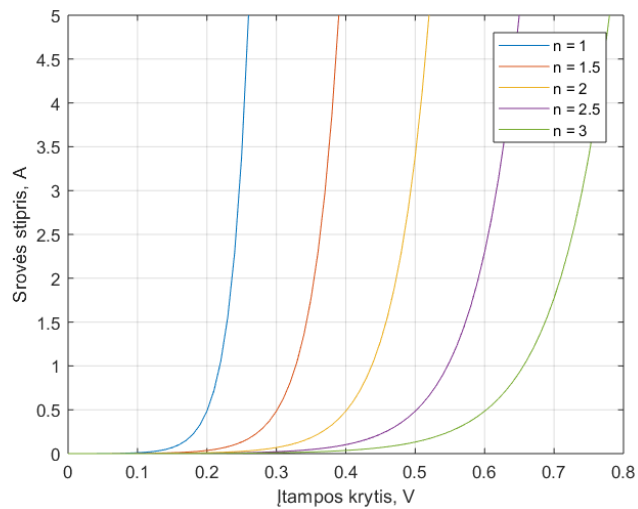
Voltamperinė realaus šviestuko (diodo) charakteristika yra modeliuojama pagal formulę [20]:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eU}{nkT}} - 1 \right), \quad (1)$$

čia: I – srovės stipris, A; I_0 – diodo tamsos sotes srovės stipris, A; e – elektrono krūvis, eV; U – įtampos kritis, V; k – Bolcmano konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K); T – absoliutinė temperatūra, K; n – idealumo rodiklis.

Diodo tamsos sotes srovės stipris – tai parametras, kuriuo vieni nuo kitų skiriasi puslaidininkiniai diodai, šviestukai. Reikšminis dydis 1 formulėje yra idealumo rodiklis n , kuris įprastai yra lygus 1–2, o šviestukams senėjant – didėja. Tuomet gaunamas šviestuko voltamperinės charakteristikos

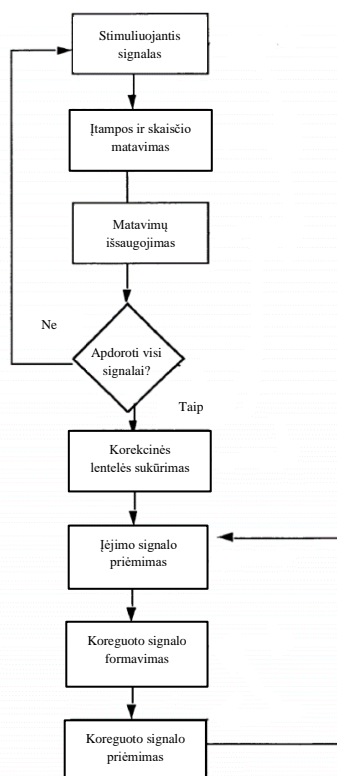
poslinkis – tam pačiam srovės stipriui šviestuke išgauti, reikalinga vis didesnė įtampa, o charakteristikos statumas sumažėja (žr. 2.2 pav.).



2.2 pav. Puslaidininkinio diodo voltamperinės charakteristikos kitimas priklausomai nuo idealumo rodiklio n

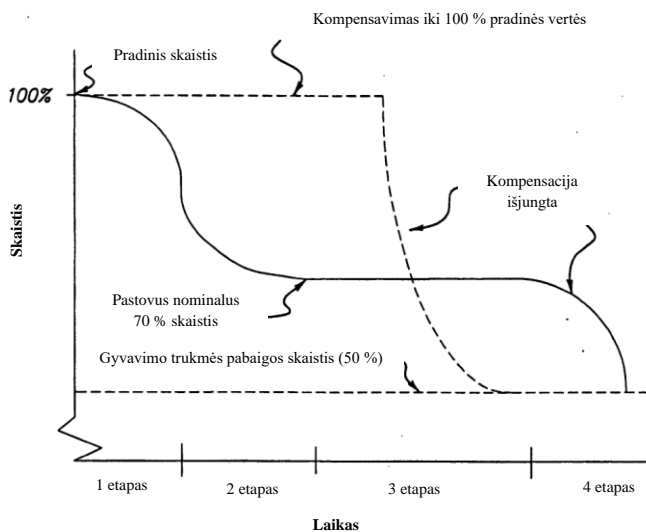
Galima teigti, kad praktiniu požiūriu plačiai naudojamų šviestukų skleidžiamas šviesos srautas yra tiesiogiai susijęs su srovės stipriu, tekančiu šviestuku (žr. 3.6 pav.), todėl žinant šviestuko voltamperinės charakteristikos kitimo modelį galima numatyti šviestuko skleidžiamos šviesos srauto kitimą.

Sekantis metodas (žr. 2.3 pav.) nuo prieš tai buvusio skiriasi tuo, kad papildomai yra įvertinama šviestuko skaisčio (šviesos srauto ir šviesos šaltinio ploto) charakteristika.



2.3 pav. Šviestukų parametrų nustatymo ir kompensavimo algoritmas įvertinant šviestukų įtampą ir skaisčių [21]

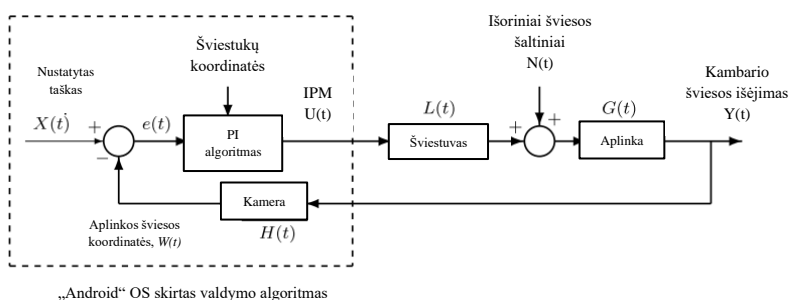
Pateiktas metodas yra pritaikytas organinių šviestukų (angl. *OLED*), iš kurių sudaryti įvairių prietaisų ekranai, parametrų įvertinimui ir atstatymui [21]. Metodas gali būti papildomas įvedant šviestukų skaisčio korekciją keliais etapais priklausomai nuo šviestukų darbo laiko (2.4 pav.).



2.4 pav. Šviestukų parametrų kompensavimas skirtingais etapais [22]

Šiuo atveju šviestuko gyvavimo trukmė (kol šviestuko intensyvumas pasiekia 50 % pradinės vertės) yra suskirstoma į keturias laikines grupes (1–4 etapai). Šviestuko skaistis yra matuojamas ir kompensuojamas iki 100 % jo pradinės vertės, kol pasiekiami pusė likusio gyvavimo laiko tarp 70 % ir 50 % šviestuko intensyvumo (3 etapo vidurys). Tuomet kompensacinis algoritmas yra išjungiamas.

Sutinkamas trečias metodas (žr. 2.5 pav.), kurio pagalba yra valdoma moderni dešimties kanalų apšvietimo sistema.

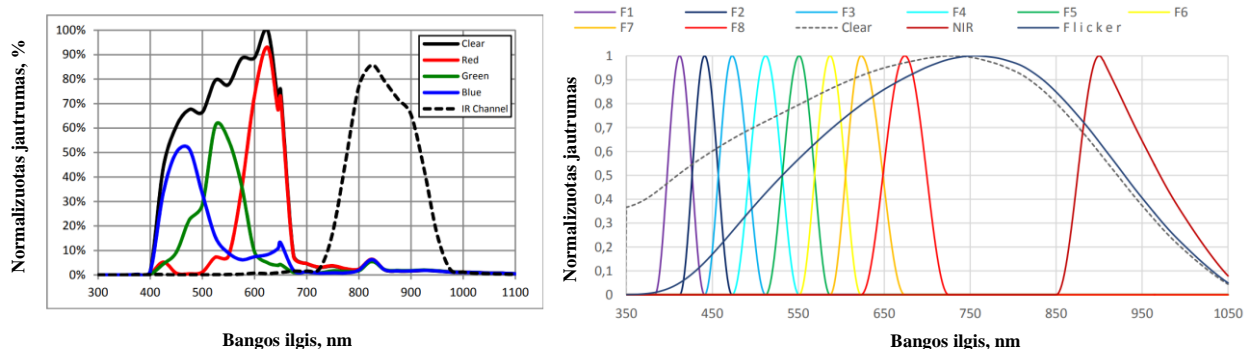


2.5 pav. Daugiakanalės apšvietimo sistemos valdymo algoritmas [23]

Šis metodas remiasi proporcinės ir integralinės dalies valdymo algoritmo implementavimu, kuomet nustatyta pradinė taško vertė yra lyginama su išmanaus mobiliojo telefono kamera užfiksuotos šviesos signalu (spalvinėmis koordinatėmis). Atliekant valdymą taip pat įvertinama ir išorinių šviesos šaltinių daroma įtaka. Metodo tyrimo metu (naudojant 10 kanalų) buvo gautas aukštas R_a įvertis lygus 94, o koreliuotos spalvinės temperatūros paklaida siekė 9,42 % [23].

Kaip grįžtamasis ryšys šviesos šaltinių charakteristikų įvertinimui gali būti naudojami integrinių lustų pagrindų sukurti *RGB* jutikliai ar net mažų gabaritų spektroskopai. Vienas iš klasikinių pavyzdžių – gamintojo „AMS“ siūlomas keturių kanalų (bendras, raudonas, žalias ir mėlynas) šviesos spalvų jutiklis „TCS3400“. 2019 metų pradžioje ši kompanija pristatė modernų vienuolikos

kanalų šviesos jutiklį „AS7341“, kuris žadama, kad bus pritaikomas ir sukels perversmą nešiojamų įrenginių (pvz., išmaniųjų mobiliųjų telefonų) pramonėje [24]. Šių spalvų jutiklių spektrinio jautrumo palyginimas pateiktas 2.6 pav.



2.6 pav. Keturių (kairėje) ir vienuolikos (dešinėje) kanalų šviesos jutiklių spektrinio jautrumo palyginimas [25, 26]

Reikia paminėti, kad norint užtikrinti aukštus kokybinius apšvietimo sistemos šviesos parametrus, šviesos jutiklis privalo turėti ne mažiau nei 24 ar net 32 kanalus, tam, kad būtų kiek įmanoma tiksliau ir optimaliai įvertinamos visos šviesos spektro dedamosios (apšvietimo sistemoje esančių šviestukų skleidžiamos šviesos bangų ilgiai). Tai įgyvendinti galima pasinaudojant kitos šviesos sprendimų kompanijos „Hamamatsu“ siūlomą produktą – mažų gabaritų integrinio lusto tipo spektro analizatoriumi, pvz., „C12880MA“ (žr. 2.7 pav.), kuris užtikrina tolygų spektro įvertinimą 340-850 nm diapazone su 15 nm spektrine skyra [27].



2.7 pav. „Hamamatsu C12880MA“ ypatingai mažų gabaritų spektrografo vaizdas lyginant su vieno euro moneta [27]

Nepaisant to, kad šviestukų senėjimo įvertinimo ir kompensacijos metodai, naudojantys grįžtamąjį ryšį, yra adaptyvūs ir gali dinamiškai reaguoti į šviestukų parametrų nuokrypius, šie algoritmai ir naudojamos priemonės turi trūkumų. Aprašytiems pirmiems dviem metodams realizuoti reikalinga įtampos ir skaisčio (arba šviesos srauto) matavimo sistema, kuri stebėtų šių parametrų kitimą. Dažnai apšvietimo sistemoje šviestukai yra apjungiami į telkinius naudojant mišrų sujungimo būdą, todėl tokioje sistemoje nėra galimybės valdyti kiekvieną šviestuką atskirai ir atlikti jo parametrų matavimus realiu laiku. Trečiam metodui yra reikalingas išorinis įrenginys su vaizdo stebėjimo kamera ir pakankamais procesoriaus resursais valdymo sistemai apdoroti duomenis. Dažnai tokio tipo sistemas yra sudėtinga integruoti į esamą produktą, sistemų realizacija išaugina piniginius ir energetinius kaštus bei įrenginio aptarnavimą padaro sudėtingesniu [20]. Šiuolaikinėse apšvietimo sistemose grįžtamajam ryšiui naudoti integrinių lustų pagrindu sukurtus tris ar daugiau kanalų RGB

spalvų jutiklius šiuo metu yra nepatogu, nes tokio tipo jutikliui yra reikalinga vieta spausdintinio montažo plokštėje bei papildoma optinė sistema šviesai į jutiklį nukreipti. Taip pat tokio tipo jutikliuose šviesos spektras nėra įvertinamas tolygiai (nepaisant to, kad yra pasiekiamas sąlyginai didelis kanalų skaičius) ir jutikliu gaunamos tik atitinkamo bangos ilgio (kanalo) šviesos intensyvumo reikšmės, kurių gali nepakakti tinkamam korekciniam algoritmui realizuoti (pvz., nėra įvertinamos šviesos koordinatės spalvų erdvėje). Šią problemą išsprendžia mažų gabaritų spektroskopai, tačiau pagrindinis jų trūkumas šiuo metu yra didelė kaina (2020 metų duomenimis „Hamamatsu C12880MA mažų gabaritų spektro analizatoriaus kaina siekia apie 400 eurų [28]), kuri tam tikrais atvejais gali viršyti pačios apšvietimo sistemos kainą du ir daugiau kartų. Visgi, kiekvienais metais šviesos jutiklių gamintojams pristatant naujus sprendimus su didesniu šviesos kanalų skaičiumi, būtų galima tikėtis šių jutiklių panaudojimo galimybės aukštos klasės apšvietimo sistemose bei mažų gabaritų spektro analizatorių integrinių grandynų kainos sumažėjimo.

3. Šviestukų optinių charakteristikų tyrimo metodikos sudarymas

Pateikiamas metodas, kuriame nėra realiu laiku naudojami grįžtamieji ryšiai ar šviesos jutikliai šviestukų senėjimui įvertinti, o šviestukų optinių charakteristikų kitimo modelis sudaromas matuojant šviestukų parametrus mobiliu spektroskopu diskrečiais laiko tarpais. Norint išlaikyti numatytą tolydų šviestuko sklaidžiamos šviesos srauto intensyvumą ir spalvines šviesos koordinates laikui bėgant, svarbu žinoti dėsningumą (modelį), kuriuo šie parametrai kinta priklausomai nuo darbo laiko, kad juos būtų galima tam tikrais laiko etapais (pvz., šviestukų galios valdymo plokštėje laiko bazę nustato ir palaiko mikrovaldiklis su realaus laiko laikrodžio funkcija) koreguoti keičiant parametrus valdymo grandinėje. Šiam tikslui atliekamas šviestukų senėjimo tyrimas nustatant tiriamų šviestukų optines charakteristikas – šviesos srautą, spalvines koordinates. Atliekant šį tyrimą yra patogų išmatuoti elektrinius dydžius, todėl papildomai yra įvertinamas šviestukų voltamperinės charakteristikos kitimas laikui bėgant.

Šviestukų senėjimo tyrimui atlikti pasirinkti plačiai apšvietimo sistemose naudojami šešių skirtingų tipų (spalvų) šviestukai: gintarinės (angl. *amber*), citrinų žalios (angl. *lime*), ciano (angl. *cyan*), mėlynos (angl. *blue*), ir du violetinės (angl. *violet*) spalvų šviestukai. Šių šviestukų techniniai parametrai pateikiami 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Tyrimui pasirinktų šviestukų parametrai [29, 30, 31]

Šviestuko gamintojo kodas	Šviestuko spalva	Dominuojantis bangos ilgis, nm	Rekomenduojamas srovės stipris, mA	Maksimalus srovės stipris, mA	Maksimali darbinė temperatūra, °C	Maksimali kristalo sandūros temperatūra, °C
LXZ1-PL02	Gintarinė	588–592	500	700	110	135
LXZ1-PX01	Citrinų žalia	566–569	500	700	110	135
LXZ1-PE01	Ciano	490–510	500	1000	135	150
LXZ1-PB01	Mėlyna	460–480	500	1000	135	150
LHUV-0415-A070	Violetinė I	410–420	500	1000	120	120
LTPL-C034UVH430	Violetinė II	430–435	500	1000	85	125

Tyrimo metu yra atsižvelgiama į šviestukų sklaidžiamos šviesos srauto intensyvumo matavimo ir ilgaamžiškumo (L_{70} ar L_{80} parametru) nustatymo metodinius nurodymus, pateikiamus IES LM-80-08 standarte. Šiame standarte siūloma šviestukų optinių charakteristikų matavimus atlikti esant trims skirtingiems srovės stipriams ir trims skirtingoms šviestuko kristalo temperatūroms – 55 °C, 85 °C ir vienai tyrėjo pasirinktinai. Rekomenduojama ilgaamžiškumo tyrimo matavimus atlikti ne mažiau kaip 6000 valandų, tačiau dėl ypatingai ilgo daugelio šviestuko gyvavimo laikotarpio (dažnai $L_{70} \approx 50$ tūkst. valandų) tokio tipo tyrimą atlikti yra sudėtinga [32]. Taikant TM-21-11 standarte aprašytą duomenų ekstrapoliavimo metodiką galima atlikti mažiau nei 6000 valandų šviestukų veikimo laiko tarpo matavimo duomenų prognozes. Standarte pateikiamas netiesinis regresinis modelis (žr. 2 formulę), kuriuo yra aproksimuojami gauti duomenys [32, 33].

$$\Phi(t) = \beta \cdot e^{-\alpha t}, \quad (2)$$

čia: t – šviestuko veikimo laikas, val.; $\Phi(t)$ – šviesos srauto intensyvumas arba spinduliuojama galia; α – eksponentės mažėjimo koeficientas; β – kreivės formos parametras.

Koeficientai α ir β yra nustatomi matavimų metu gautiems duomenims pritaikius mažiausių kvadratų metodu gautą aproksimuojančią kreivę; nustatomas jos determinacijos koeficientas [33].

Reikia paminėti, kad aprašyta metodika turi trūkumų – norint gauti tikslias ilgalaikes šviestukų optinių parametrų prognozes – kas yra svarbu šio tyrimo atveju – vykdomai duomenų ekstrapoliacijai yra reikalingas kuo ilgesnis duomenų įrašų kiekis, t. y., šviestukų tyrimas turi būti atliekamas kiek įmanoma ilgesnį laiko tarpą šviestukams funkcionuojant. Tokiu atveju TM-21-11 standarte yra numatyta galimybė paspartinti šviestukų senėjimą temperatūriniu poveikiu. Kadangi vykstantys senėjimo procesai yra susiję su cheminių medžiagų degradacijos mechanizmais (žr. 1 skyrių), temperatūrinis poveikis turi atitikti funkciją, pateiktą 3 formulėje [33].

$$\alpha = C \cdot e^{\left(-\frac{E_a}{k_B T_s}\right)}, \quad (3)$$

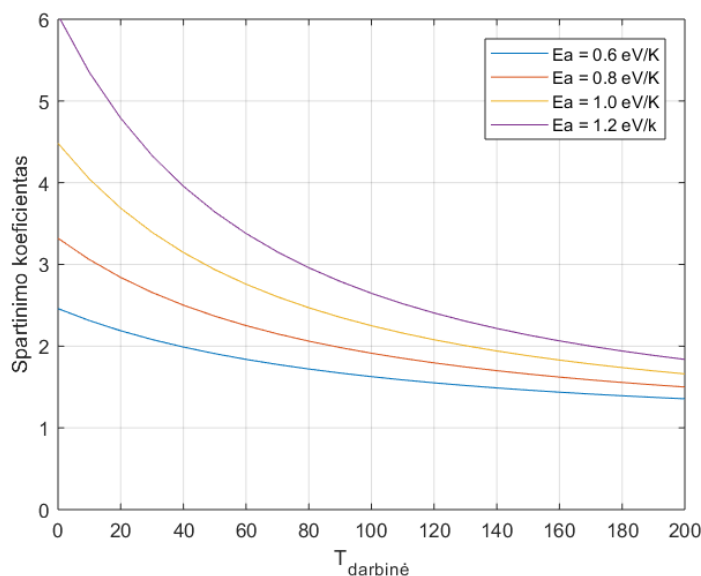
čia: C – eksponentės faktorius; E_a – aktyvacijos energija, eV (cheminiams procesams dažniausiai 0,6–1 eV); k_B – Bolcmano konstanta; T_s – absoliutinė temperatūra, K.

Spartinimo faktorius puslaidininkiniuose elementuose yra nustatomas iš Arenijaus lygties atsižvelgiant į elemento numatytą darbinę temperatūrą ir temperatūrą, kuria yra veikiamas ir testuojamas elementas realioje aplinkoje (žr. 4 formulę) [34].

$$AF = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{darbinė}} - \frac{1}{T_{testavimo}} \right)}, \quad (4)$$

čia: AF – spartinimo faktorius; E_a – temperatūrinė aktyvacijos energija, eV (cheminiams procesams dažniausiai 0,6–1 eV); k_B – Bolcmano konstanta ($8,167 \cdot 10^{-5}$ eV/K); $T_{darbinė}$ – absoliutinė elemento darbinė temperatūra, K; $T_{testavimo}$ – absoliutinė elemento testavimo temperatūra, K.

Iš 3 lygties galima išreikšti spartinimo faktoriaus AF priklausomybę nuo darbinės elemento temperatūros esant skirtingoms temperatūrinės aktyvacijos energijos reikšmėms, kai elemento testavimo temperatūra yra 10 K aukštesnė už jo įprastą darbinę temperatūrą (žr. 3.1 pav.).



3.1 pav. Spartinimo faktoriaus priklausomybė nuo darbinės elemento temperatūros ir temperatūrinės aktyvacijos energijos esant 10 K skirtumui tarp elemento darbinės ir testavimo temperatūrų

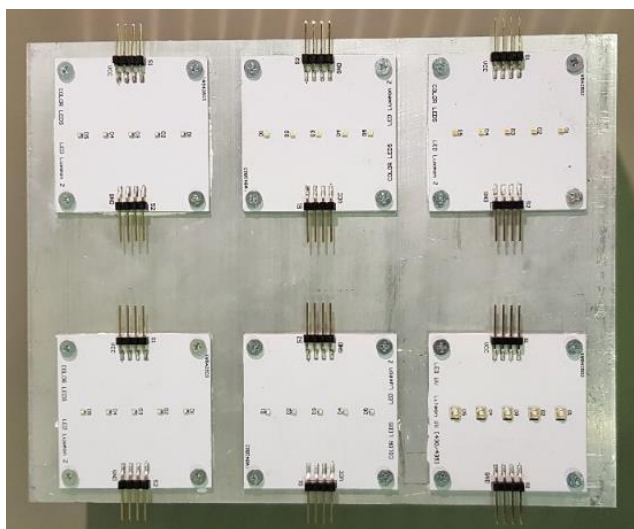
Dažnai yra sutariama, kad 10–15 °C temperatūros pokytis proceso vyksmui atitinka dviejų kartų spartinimo faktorių, kuomet elemento įprasta darbinė temperatūra yra 75–125 °C temperatūrų diapazone (temperatūrinė aktyvacijos energija apytiksliai lygi 0,8 eV) [35]. Norint nustatyti tikslų temperatūrinio poveikio paspartinimo koeficientą, būtų galima šviestukų ilgaamžiškumo kreives, gautas eksperimentiniu būdu, palyginti su gamintojo pateikiamomis didesnio tikslumo šviestukų ilgaamžiškumo kreivėmis, tačiau daugelis gamintojų nėra atlikę išsamių šviestukų senėjimo tyrimų arba ši informacija nėra laisvai pateikiama komponentų duomenų lapuose.

Šviestukų optinių charakteristikų tyrimui suprojektuotos ir pagamintos spausdintinio montažo plokštės (plokščių brėžiniai pateikiami 1 priede), kuriose lygiagrečiu jungimu sumontuota po penkis to paties tipo šviestukus (žr. 3.2 pav.). Tinkamą šviestuko šilumos nuvedimą užtikrina iš aliuminio medžiagos sudarytas plokštės pagrindas.



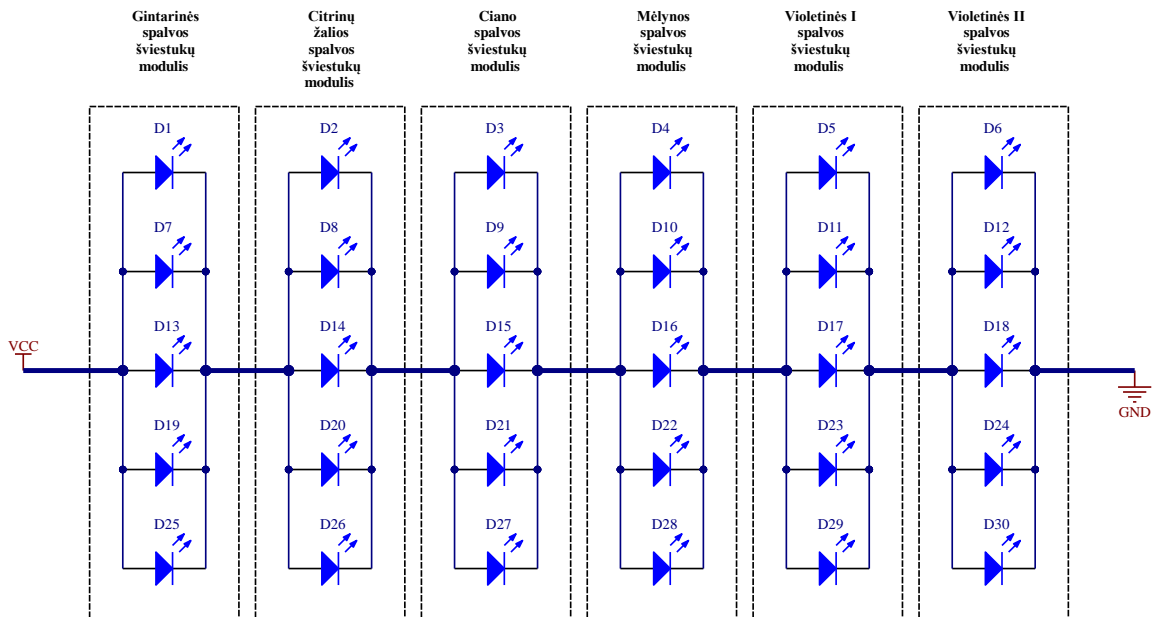
3.2 pav. Pagaminti ir funkcionuojantys skirtingų tipų šviestukų moduliai (iš kairės į dešinę: citrinų žalios, violetinės II, mėlynos, ciano, violetinės I ir gintarinės spalvų šviestukų moduliai)

Šviestukų senėjimui paspartinti vykdomas šviestukų poveikis temperatūra, kurio metu šviestukai funkcionuoja aukštoje aplinkos temperatūroje, todėl realizuotas papildomas šilumos nuvedimas iš šviestukų modulių pasyviu aušintuvu (žr. 3.3 pav.). Pasirinkto pasyvaus aušintuvo matmenys: 19x20x5 cm (plotis, ilgis, aukštis). Geram šilumos perdavimui iš šviestukų modulių į pasyvų aušintuvą užtikrinti šviestukų modulių ir pasyvaus aušintuvo sąlyčio paviršius padengiamas silikoninio tipo temperatūrai laidžia pasta. Šviestukų moduliai tvirtai sujungiami su aušintuvu panaudojant po keturis varžtus kiekvieno modulio kampuose.



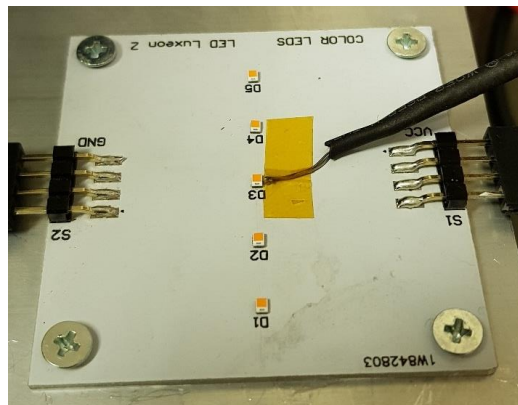
3.3 pav. Eksperimentui naudojami šešių skirtingų tipų šviestukų moduliai su pasyviu aušintuvu

Atliekant tyrimą visi šviestukų moduliai yra sujungiami nuosekliai. Pasirinkti kiekvieno tipo šviestukai yra iš tos pačios gaminių partijos (angl. *bin*) skirstant pagal voltamperinę charakteristiką ir sklaidžiamą bangos ilgį, todėl priimama, kad tyrimo metu srovės stipris pasiskirsto tolygiai ir kiekviename šviestuke yra vienodas. Bendra jungimo schema pateikiama 3.4 pav.



3.4 pav. Šviestukų modulių jungimo schema atliekant šviestukų temperatūrinio poveikio tyrimą

Ši sistema, sudaryta iš šešių skirtingų tipų šviestukų modulių, sujungtų nuosekliai, yra patalpinama į temperatūrinio poveikio kamerą (žr. 3.7 pav.). Pagal standarto LM-80-08 rekomendacijas yra svarbu stebėti ne tik sistemos aplinkos temperatūrą (nustatytą temperatūrinio poveikio kameros temperatūros vertę), bet ir šviestukų kristalo temperatūrą. Apytiksliam p-n sandūros temperatūros įvertinimui naudojamas metodas [36, 37], kuomet temperatūros matavimas termopora atliekamas kiek įmanoma arčiau šviestuko korpuso ar lydvietės (žr. 3.5 pav.).



3.5 pav. Šviestukų temperatūros matavimas termopora

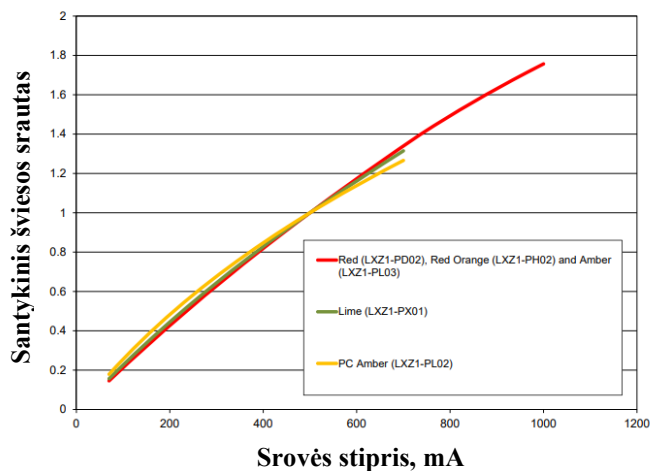
Tuomet apytikslė šviestuko kristalo temperatūra yra apskaičiuojama pagal 5 formulę [36, 37].

$$T_j = \theta_{th} \cdot P_{pilnutinė} + T_{plokštės}, \quad (5)$$

čia: T_j – šviestuko kristalo temperatūra, °C; θ_{th} – temperatūrinė šviestuko varža, °C/W; $P_{pilnutinė}$ – pilnutinė galia, randama kaip srovės stiprio ir įtampos kryžio šviestuke sandauga, W; $T_{plokštės}$ – plokštės arba šviestuko korpuso temperatūra, °C.

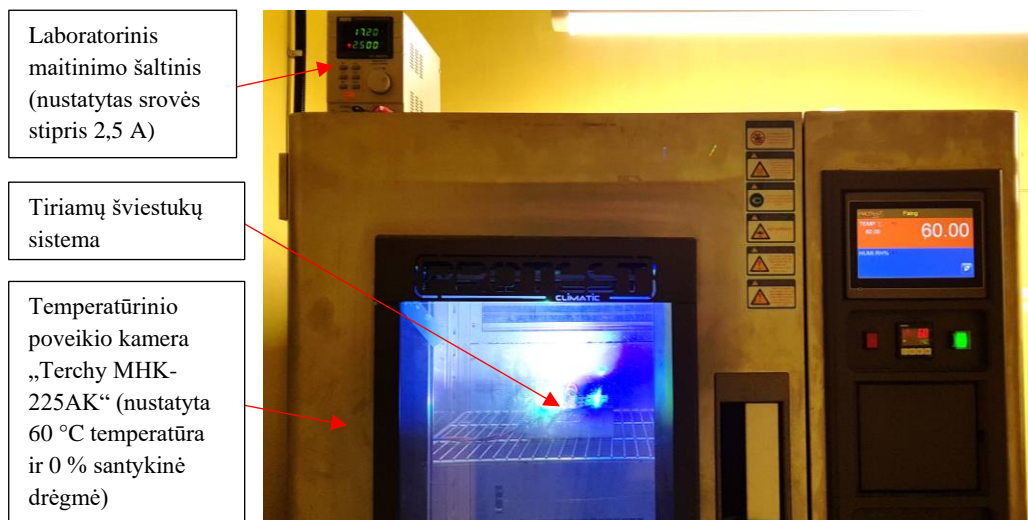
Pateikta formulė pritaikoma pradinių matavimų šviestukų kristalų apytikrei temperatūrai įvertinti (žr. 4.1 lentelę).

Kadangi daugelio gamintojų šviestukų optinių parametų nominalios vertės yra specifikuojamos esant 500 mA srovės stipriui (pvz., šviesos santykinis srautas, kuomet srovės stipris 500 mA, yra lygus 1 (žr. 3.6 pav.)) bei šis srovės stipris yra rekomenduojamas įprastam šviestukų darbui, šviestukų senėjimo tyrimui su išoriniu temperatūriniu poveikiu pasirinkta būtent ši srovės stiprio vertė visiems tiriamiems šviestukams (kiekvienam moduliui suminis srovės stipris lygus 2,5 A).



3.6 pav. Šviestukų santykinio šviesos srauto priklausomybė nuo srovės stiprio [29]

Iš šviestukų modulių ir pasyvaus aušintuvo sudaryta sistema prijungiama prie laboratorinio maitinimo šaltinio, veikiančio pastovios srovės (angl. *CC - constant current*) režimu; išėjimo srovės stipris nustatomas (apribojamas) 2,5 A. Šviestukų sistemos temperatūrinio poveikio tyrimo aplinka pateikiama 3.7 pav.



3.7 pav. Šviestukų sistemos temperatūrinio poveikio tyrimo aplinka

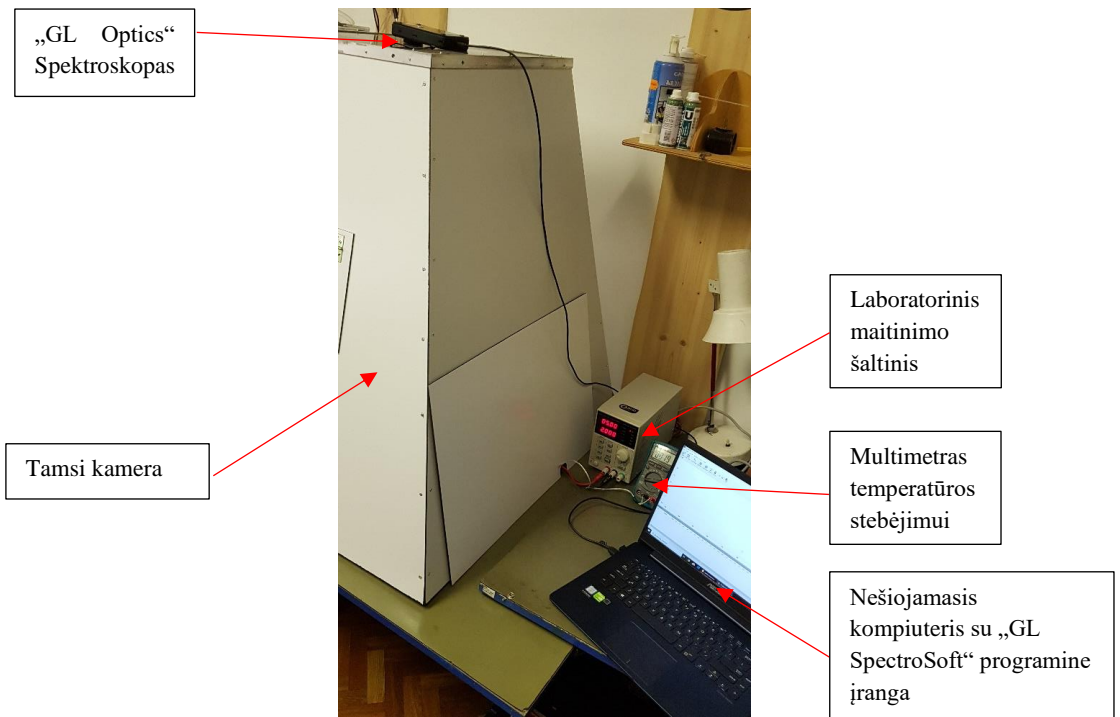
Temperatūrinio poveikio kameros vidaus temperatūra nustatoma 60 °C, o santykinė drėgmė 0 % (temperatūrinio poveikio kameros techninė specifikacija pateikiama 4 priede). Atlikti šviestukų korpuso (lydvietės) temperatūros matavimai ir apskaičiuotos (pagal 5 formulę) jų apytikrės kristalų temperatūros pateikiamos 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Šviestukų temperatūros matavimo ir apskaičiuotos kristalų vidutinės temperatūros duomenys (šviestukams funkcionuojant 60 °C temperatūros aplinkoje)

Šviestuko spalva	Vidutinė galia, W	Temperatūrinė varža, °C / W	Vidutinė lydvietės temperatūra, °C	Apskaičiuota vidutinė kristalo temperatūra, °C
Gintarinė	1,485	5	89,7	97,1
Citrinų žalia	1,46	5	90,1	97,4
Ciano	1,405	5	92,3	99,3
Mėlyna	1,53	5	90,6	98,3
Violetinė I	1,525	2,5	89,2	93,0
Violetinė II	1,535	3	88,6	93,2

Iš šviestukų duomenų lapų matoma, kad rekomenduojama šviestukų p-n sandūros temperatūra, kuriai esant pateikiamos šviestukų optinės ir elektrinės charakteristikos, yra lygi 85 °C. Gauti skaičiavimų rezultatai indikuoja, kad šviestukams funkcionuojant 60 °C temperatūros aplinkoje, kristalo temperatūra apytikriai pakyla iki 93–99,3 °C, t. y. sudaromas mažiausiai 10 °C (įvertinant galimas matavimo ± 2 °C matavimo paklaidas) laipsnių pokytis nei rekomenduojama darbinė šviestuko sandūros temperatūra. Atsižvelgus į teorinę analizę ir atliktus matavimus, nustatoma, kad tyrimo metu šviestukų senėjimas yra vidutiniškai paspartinamas du kartus ($AF = 2$).

Tyrimo metu analizuojami šviestukų optiniai parametrai, reikšmingi šiame tyrime – šviestuko spinduliuojamos šviesos srautas (intensyvumas), spalvinės šviestuko koordinatės (x ir y – CIE 1931 spalvų erdvėje) bei elektriniai parametrai – įtampos kryptis šviestuke ir per šviestuką tekančios srovės stipris (sandauga lygi elektrinei šviestuko galiai). Šviestukų spektro (optinių charakteristikų) matavimas atliekamas kalibruotu gamintojo „GL Optics“ nešiojamu spektrografu „GL Spectis 1.0 Touch“ (spektrografo vaizdas ir parametrai pateikiami 2 priede), o gauti duomenys atvaizduojami ir analizuojami „GL SpectroSoft“ ir „Microsoft Excel“ programinės įrangos paketuose. Šviestukų optiniai parametrai matuojami šviestukų modulius įdėjus į tamsią ir nuo aplinkos šviesos izoliuotą patalpą, kaip tai yra rekomenduojama atlikti LM-79-08 standarte [32]. Elektriniai šviestukų parametrai – įtampos kryptis ir srovės stipris – įvertinami laboratoriniame maitinimo šaltinyje „RND 320-KA3005P“ integruotu skaitmeniniu įtampos ir srovės indikatoriumi (laboratorinio maitinimo šaltinio vaizdas ir specifikacijos pateikiami 3 priede). Optinių ir elektrinių šviestukų parametru tyrimo aplinka pateikiama 3.8 pav.



3.8 pav. Šviestukų optinių ir elektrinių parametų tyrimo aplinka

Šviestukų charakteristikų matavimas atliekamas diskrečiais laiko tarpais kas 336 val. (2 sav.) esant tai pačiai nusistovėjusiai $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) aplinkos (kambario) ir šviestukų sistemos temperatūrai. Kiekvienas šviestukų parametras tyrimo metu yra matuojamas esant penkiems skirtingiems šviestukų darbo režimams pagal srovę: 100 mA, 200 mA, 300 mA, 400 mA, 500 mA ir 600 mA. Šiuose srovės stiprio taškuose parametro matavimas yra atliekamas dešimt kartų, apskaičiuojama ir pateikiama vidutinė jo reikšmė.

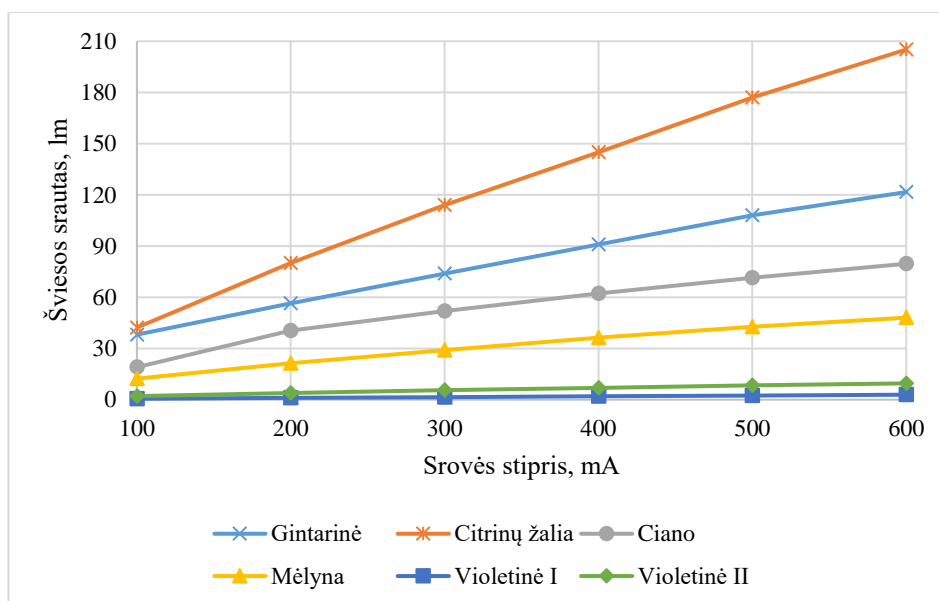
4. Tyrimo rezultatai ir analizė

Šviestukų senėjimo metu optinių charakteristikų kitimui įvertinti reikalingi pradiniai šviestukų parametrai, kurių vertės būtų laikomos atraminėmis. Išmatuotų naujų (0 darbo valandų) šviestukų elektrinių ir optinių parametru duomenys (vidutinės reikšmės) pateikiami 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Pradinės vidutinės šviestukų elektrinių ir optinių parametru vertės

Šviestuko spalva	Vidutinė įtampa, V	Vidutinis srovės stipris, mA	Vidutinė korpuso-plokštės temperatūra, °C	Apskaičiuota vidutinė kristalo temperatūra, °C	Vidutinė x koordinatė	Vidutinė y koordinatė	Vidutinis šviesos srautas, lm
Gintarinė	2,81	100	34	35,4	0,57838	0,41743	38,124
	2,87	200	34	36,9	0,57793	0,41793	56,416
	2,91	300	36	40,4	0,57640	0,41833	73,911
	2,94	400	37	42,9	0,57550	0,41907	90,942
	2,97	500	38	45,4	0,57458	0,41959	108,049
	2,99	600	39	48,0	0,57364	0,42015	121,641
Citrinų žalia	2,76	100	35	36,4	0,40763	0,55737	42,257
	2,81	200	36	38,8	0,40772	0,55700	80,022
	2,86	300	36	40,3	0,40777	0,55661	113,972
	2,89	400	38	43,8	0,40806	0,55611	145,045
	2,92	500	39	46,3	0,40848	0,55562	176,947
	2,96	600	40	48,9	0,40898	0,55519	205,134
Ciano	2,48	100	35	36,2	0,08778	0,65859	19,055
	2,63	200	36	38,6	0,08661	0,63933	40,476
	2,71	300	38	42,1	0,08509	0,61830	51,843
	2,76	400	39	44,5	0,08444	0,60327	62,169
	2,81	500	42	49,0	0,08430	0,59157	71,39
	2,86	600	46	54,6	0,08458	0,58188	79,644
Mėlyna	2,76	100	35	36,4	0,09950	0,15897	12,335
	2,89	200	35	37,9	0,10251	0,15258	21,318
	2,97	300	36	40,5	0,10655	0,13876	29,135
	3,01	400	37	43,0	0,10926	0,13117	36,327
	3,06	500	40	47,7	0,11105	0,12635	42,749
	3,1	600	41	50,3	0,11222	0,12342	48,087
Violetinė I	2,87	100	34	34,7	0,16795	0,0064	0,559
	2,93	200	35	36,5	0,16798	0,0066	1,051
	2,98	300	37	39,2	0,16789	0,00615	1,449
	3,01	400	37	40,0	0,16799	0,0065	2,001
	3,05	500	39	42,8	0,16806	0,00662	2,463
	3,08	600	40	44,6	0,16807	0,0069	2,928
Violetinė II	2,81	100	35	35,8	0,16409	0,0106	2,123
	2,89	200	35	36,7	0,16412	0,01064	3,929
	2,95	300	36	38,7	0,16433	0,01065	5,513
	3,01	400	37	40,6	0,16437	0,01058	6,997
	3,07	500	37	41,6	0,16431	0,01085	8,352
	3,12	600	37	42,6	0,16414	0,01113	9,57

Matavimų metu nustatoma naujų šviestukų spinduliuojamos šviesos srauto priklausomybė nuo per šviestuką tekančios srovės stiprio (žr. 4.1 pav.). Šie duomenys gali būti panaudojami kuriant dinamišką šviestukų senėjimo kompensacijos algoritmą.



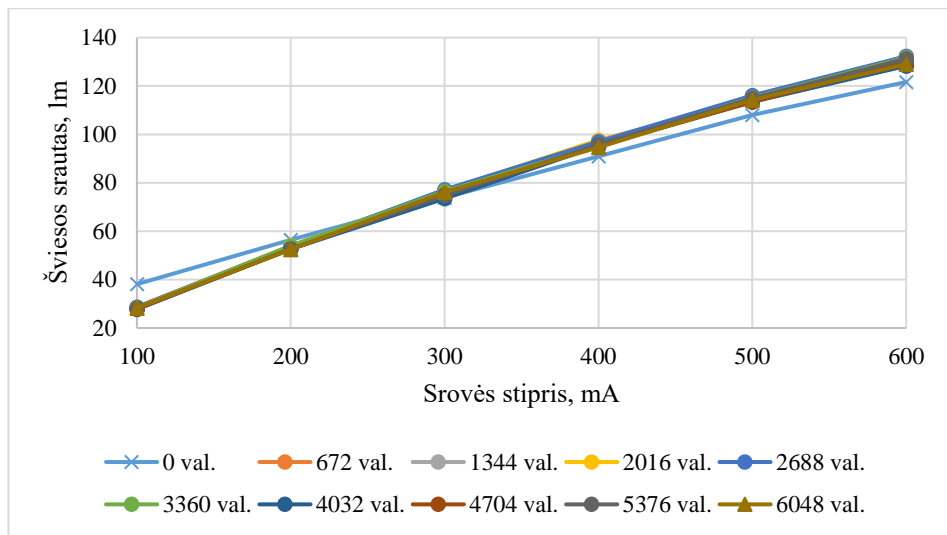
4.1 pav. Šviestukų pradinės spinduliuojamos šviesos srauto priklausomybė nuo per šviestuką tekančios srovės stiprio

Iš 4.1 pav. pateiktų grafinių priklausomybių matoma, kad didžiausią šviesos srautą, nepriklausomai nuo tekančio srovės stiprio, kuria citrinų žalios spalvos šviestukai, o mažiausią – violetinės I spalvos šviestukai (esant 0 valandų šviestukų darbo laikui). Taip pat galima teigti, kad praktiniu požiūriu, visų tipų šviestukų šviesos srautas su srovės stipriu, tekančiu per juos, yra susijęs tiesine priklausomybe.

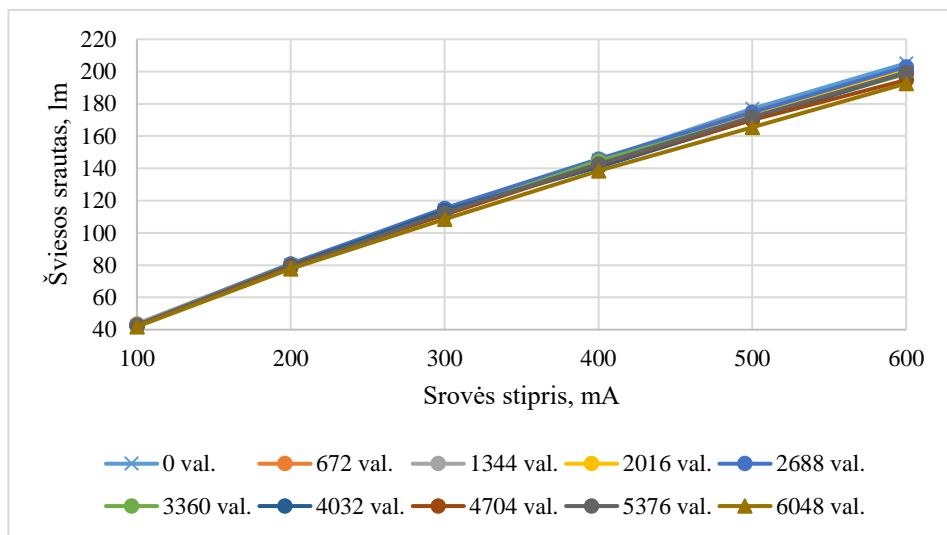
Iš viso tyrimo metu atliekama dešimt šviestukų optinių ir elektrinių charakteristikų matavimų (visi vidutinės matavimų vertės pateikiamos 5 priede „Matavimų duomenų lentelės“) diskrečiais laiko tarpais kas 336 val. Atsižvelgiant į paspartinimo faktorių dėl temperatūrinio poveikio, šviestukų charakteristikos yra pateikiamos ir analizuojamos su perskaičiuotu laiku, t. y. diskrečiais matavimo laiko intervalais, padaugintais iš spartinimo koeficiento, lygaus 2: 0 val., 672 val., 1344 val., 2016 val., 2688 val., 3360 val., 4032 val., 4704 val., 5376 val. ir 6048 val. Tokiu atveju yra išpildoma standarte IES LM-80-08 pateikiama tyrimo rekomendacija dėl šviestukų darbo laiko, ne mažesnio kaip 6000 val.

4.1. Šviesos srauto charakteristikos

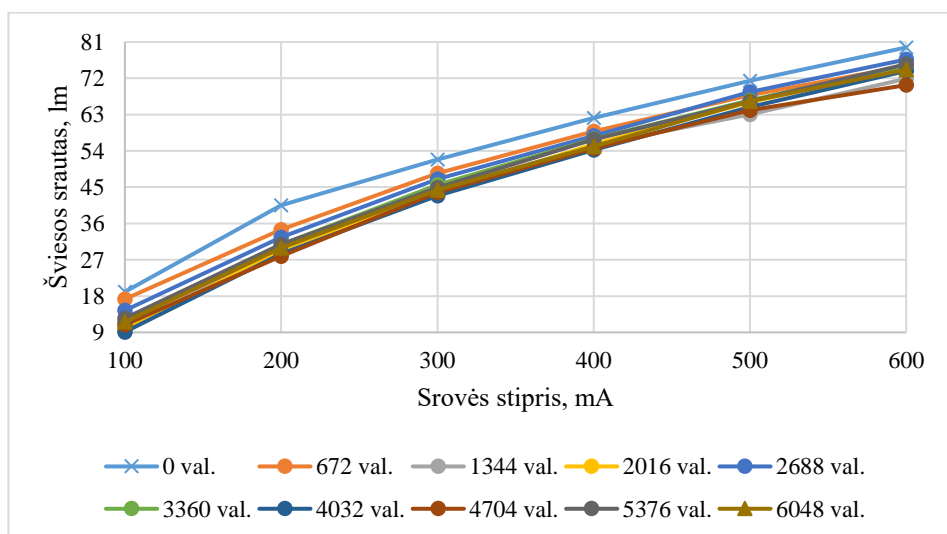
Tiriamų šviestukų šviesos srauto charakteristikų kitimas esant skirtingam šviestukų darbo laikui pateikiamas 4.2–4.7 pav.



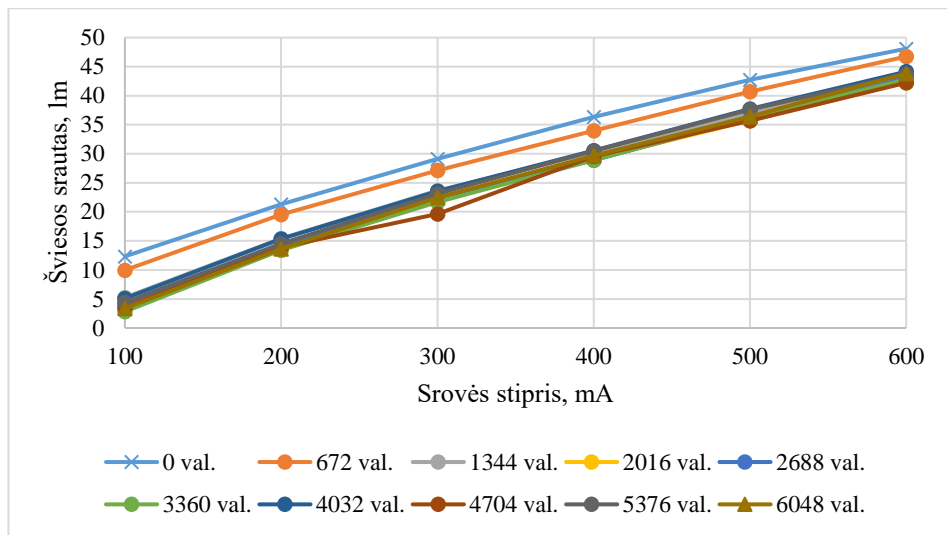
4.2 pav. Gintarinės spalvos šviestukų šviesos srauto charakteristikos priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko



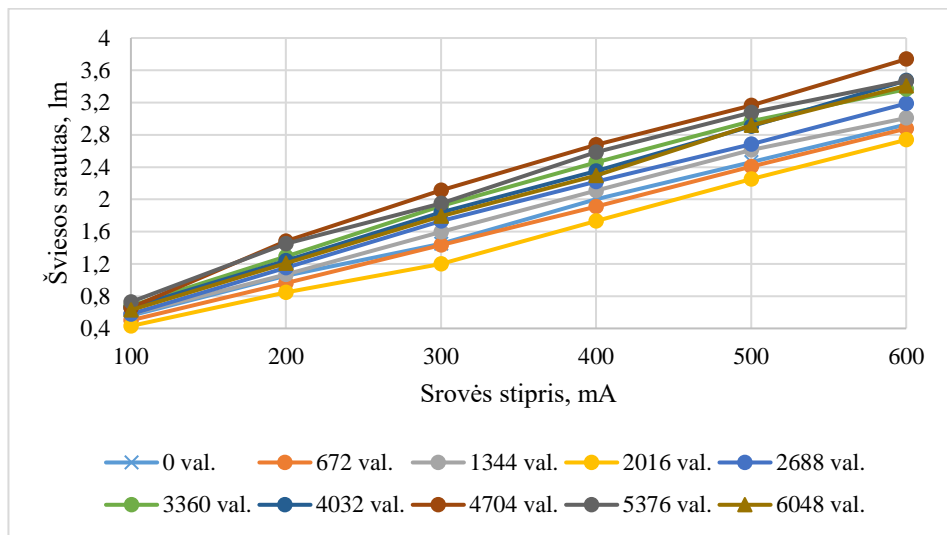
4.3 pav. Citrinų žalios spalvos šviestukų šviesos srauto charakteristikos priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko



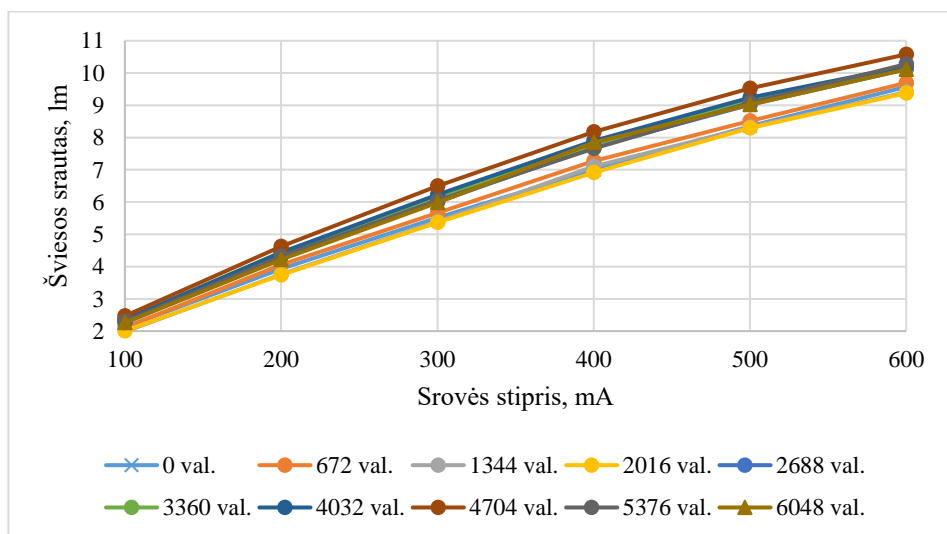
4.4 pav. Ciano spalvos šviestukų šviesos srauto charakteristikos priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko



4.5 pav. Mėlynos spalvos šviestukų šviesos srauto charakteristikos priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko



4.6 pav. Violetinės I spalvos šviestukų šviesos srauto charakteristikos priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko



4.7 pav. Violetinės II spalvos šviestukų šviesos srauto charakteristikos priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko

Iš gautų šviestukų šviesos srauto charakteristikų priklausomybės nuo šviestuko darbo laiko grafikų yra matoma, kad, nepriklausomai nuo šviestuku tekančio srovės stiprio, šviesos srautas labiausiai sumažėjo ciano ir mėlynos spalvos šviestukuose, o didžiausias pokytis gautas pirmomis 672–1344 šviestukų darbo laiko valandomis. Gintarinės spalvos šviestukuose, srovės stipriui esant 300–600 mA, stebimas bendras šviesos srauto padidėjimas visame šviestukų darbo laiko diapazone. Didžiausias šviesos srauto charakteristikų išsibarstymas matomas violetinės I ir violetinės II spalvų šviestukuose, mažiausias – citrinų žalios spalvos.

Šviestukų šviesos srauto charakteristikų pokyčiui įvertinti ir kitimo modeliui sudaryti pasirenkami du matavimo taškai, kuriuose srovės stipris yra lygus 200 mA ir 500 mA. Pirmasis, 200 mA taškas, pasirenkamas dėl to, kad ši šviestukais tekančios srovės stiprio vertė yra dažnai naudojama moderniose, į žmogų orientuoto apšvietimo, sistemose, pvz., kuomet yra kuriama nedidelio intensyvumo šiltai baltos spalvos šviesa, skirta antrai dienos pusei, tokiu būdu suteikiant žmogui poilsio ir jaukumo būseną. Antrasis taškas – gamintojo rekomenduojama šviestukų darbinė srovės stiprio vertė, kuriai esant specifikuojamos šviestukų optinės ir elektrinės charakteristikos. Matavimų metu gautos vidutinės šviestukų šviesos srauto (intensyvumo) vertės yra normuojamos pagal atramines, 0 valandų šviestukų darbo laiko, matavimo reikšmes. Atlikus normavimą, yra palengvinamas šviesos srauto pokyčio įvertinimas ir išlaikoma TM-21-11 standarte pateikiama rekomendacija gautų matavimo duomenų ekstrapoliacijai atlikti. Normuoti šviestukų šviesos srauto matavimų duomenys, kuomet srovės stipris šviestukuose lygus 200 mA, pateikiami 4.2 lentelėje, o esant 500 mA srovės stipriui – 4.3 lentelėje.

4.2 lentelė. Normuotos vidutinės šviesos srauto matavimų vertės ($I = 200$ mA)

Laikas, val.	0	672	1344	2016	2688	3360	4032	4704	5376	6048
Spalva										
Gintarinė	1	0,9558	0,9488	0,9589	0,9497	0,9554	0,9316	0,9328	0,9317	0,9307
Citrinų žalia	1	1,0060	1,0120	0,9905	1,0087	0,9983	0,9972	0,9921	0,9817	0,9710
Ciano	1	0,8519	0,7297	0,7189	0,8056	0,7591	0,7027	0,6888	0,7610	0,7392
Mėlyna	1	0,9166	0,7229	0,6289	0,6666	0,6282	0,7207	0,6534	0,6811	0,6404
Violetinė I	1	0,9134	1,0171	0,8069	1,0961	1,2293	1,1789	1,4101	1,3806	1,1503
Violetinė II	1	1,0328	0,9562	0,9506	1,1074	1,1301	1,1295	1,1759	1,0988	1,0720

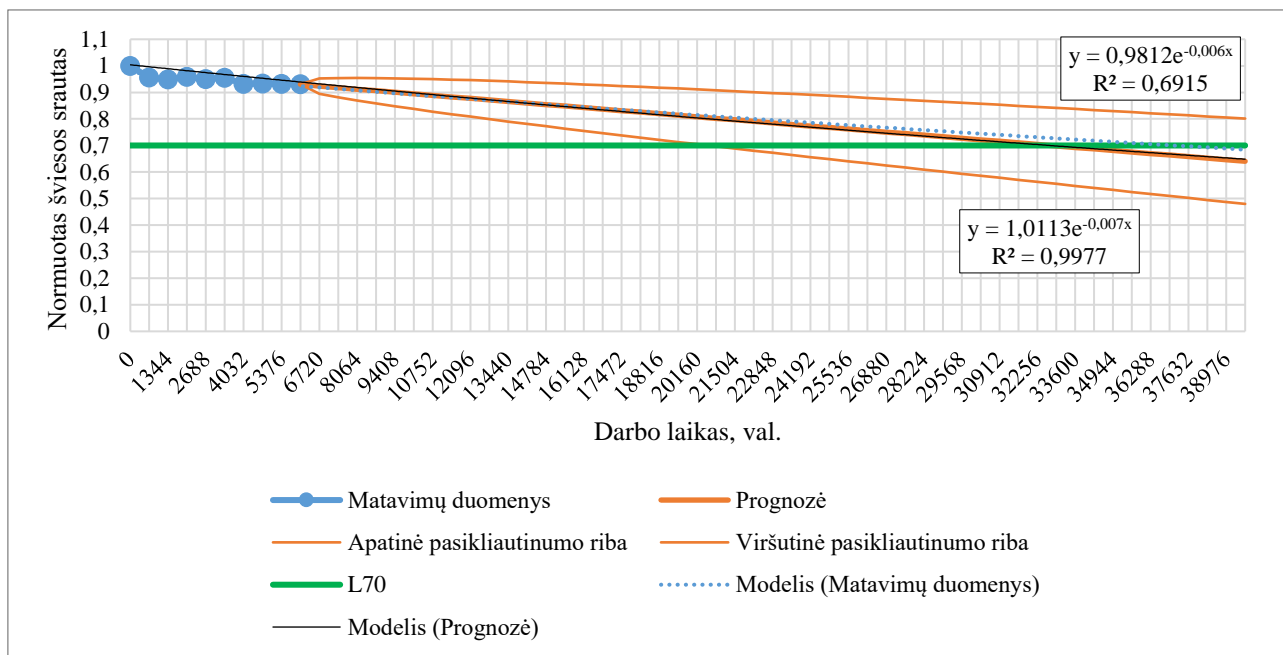
4.3 lentelė. Normuotos vidutinės šviesos srauto matavimų vertės ($I = 500$ mA)

Laikas, val.	0	672	1344	2016	2688	3360	4032	4704	5376	6048
Spalva										
Gintarinė	1	1,0641	1,0589	1,0511	1,0738	1,0661	1,0502	1,0497	1,0637	1,0568
Citrinų žalia	1	0,9883	0,9763	0,9799	0,9875	0,9680	0,9616	0,9609	0,9706	0,9349
Ciano	1	0,9501	0,8832	0,9250	0,9608	0,9317	0,9093	0,8977	0,9290	0,9290
Mėlyna	1	0,9526	0,8637	0,8362	0,8455	0,8465	0,8818	0,8348	0,8800	0,8519
Violetinė I	1	0,9777	1,0601	0,9143	1,0893	1,2054	1,1803	1,2854	1,2489	1,1855
Violetinė II	1	1,0196	0,9964	0,9931	1,0799	1,0983	1,1058	1,1397	1,0868	1,0797

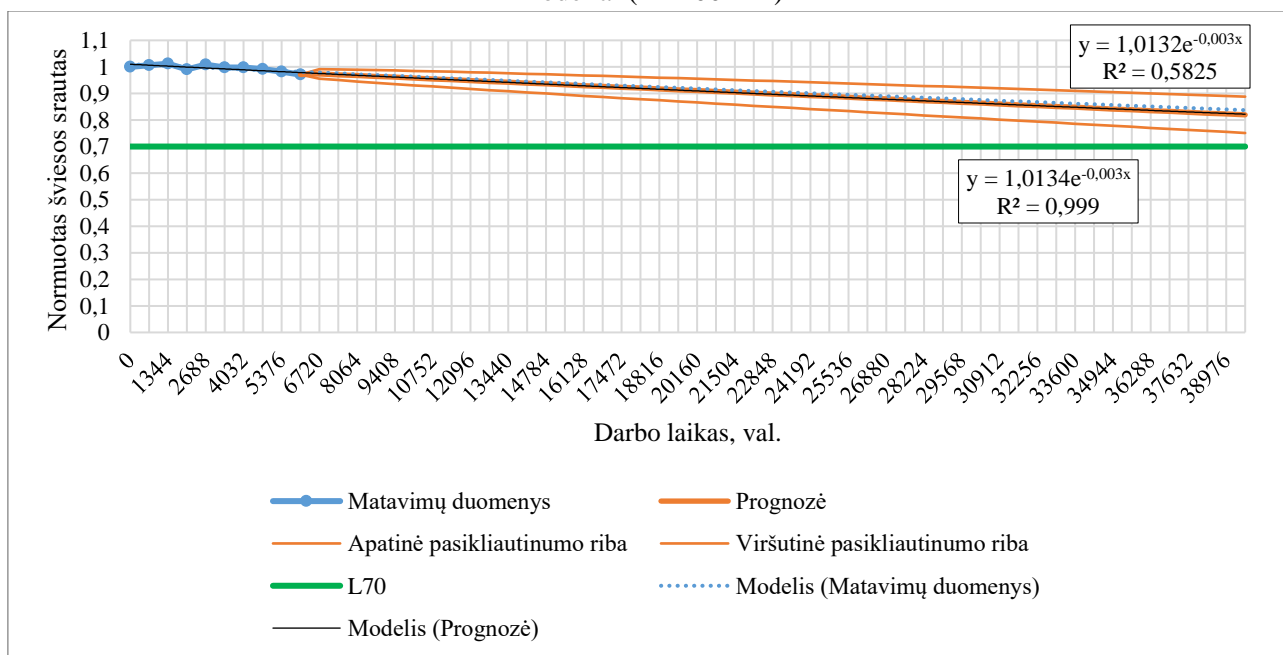
Šviestukų šviesos srauto prognozė atliekama naudojantis integruota „Microsoft Excel“ duomenų ekstrapoliavimo funkcija. Ši funkcija remiasi eksponentinio išlyginimo (angl. *exponential smoothing*) algoritmu [38]. Prognozavimo metodas yra paremtas trijų dėmenų – adityvaus arba multiplikatyvaus pobūdžio paklaidos, tendencijos ir periodiškumo – įvertinimu [39]. Šviesos srauto prognozės reikšmingumo lygmuo pasirenkamas 0,95. Pritaikius mažiausių kvadratų metodą,

normuotos vidutinės šviesos srauto matavimų ir sudarytos prognozės vertės aproksimuojamos eksponentiniu regresiniu modeliu, apskaičiuojamas determinacijos koeficientas R^2 . Iš gautų grafinių priklausomybių nustatomos L_{70} parametro vertės, kuomet yra remiamasi sudarytais matavimo duomenų ir prognozės modeliais.

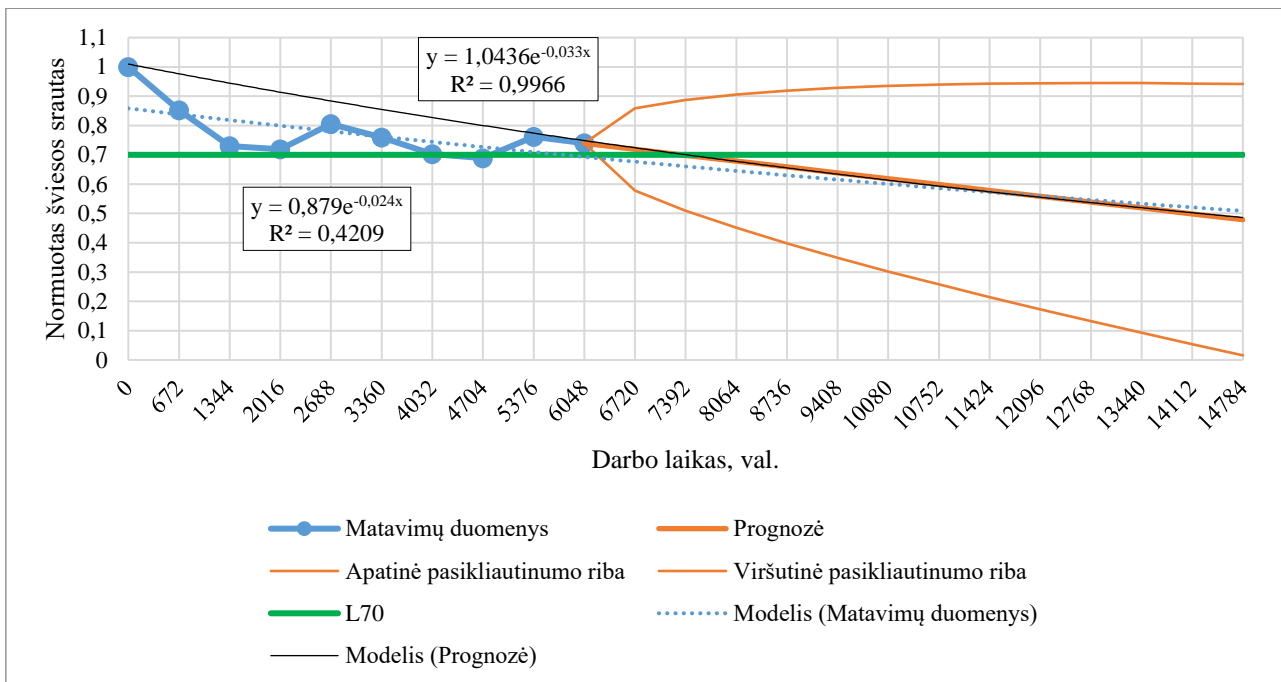
Šviestukų šviesos srauto matavimų duomenys (ištininė šviesiai mėlynos spalvos linija), prognozės su apatiniais ir viršutiniais pasikliautiniais intervalais (oranžinės spalvos linijos), matavimo duomenų aproksimacijos (punktyrinė šviesiai mėlynos spalvos linija) ir prognozės duomenų aproksimacijos (ištininė juoda plona linija), kuomet srovės stipris lygus 200 mA, pateikiami 4.8–4.13 pav., o srovės stipriui esant 500 mA – 4.14–4.19 pav.



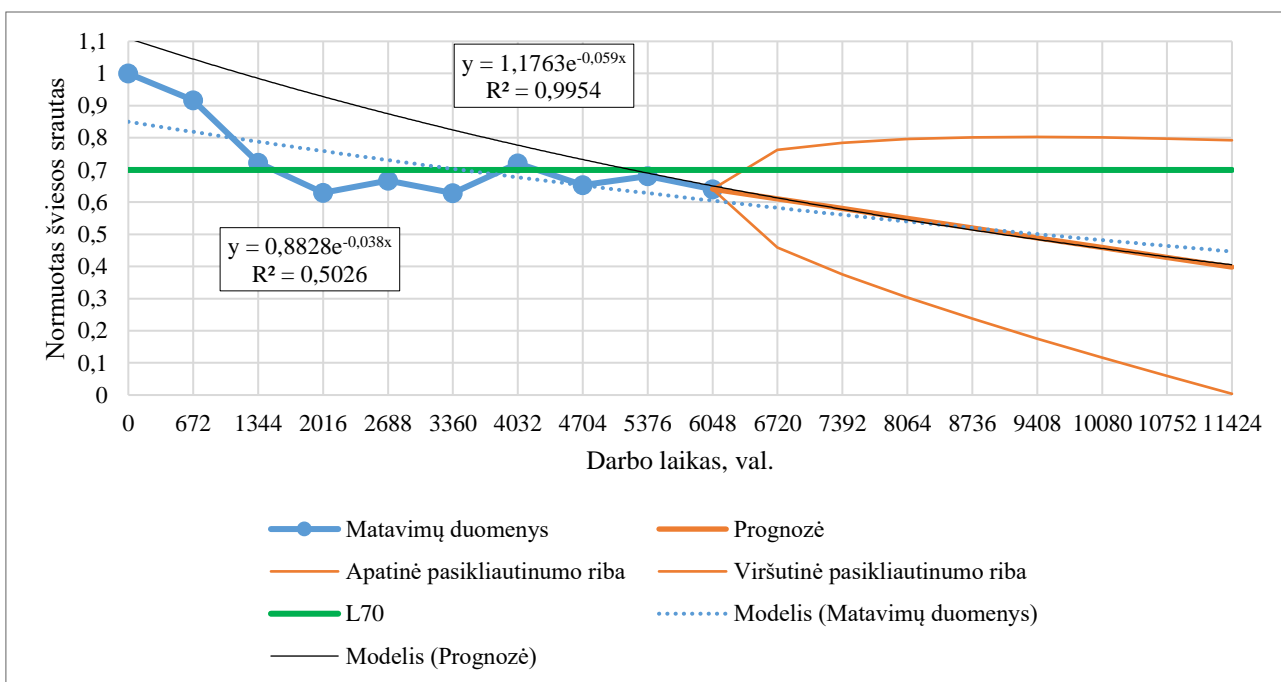
4.8 pav. Nustatyta gintarinės spalvos šviestukų šviesos srauto charakteristika, prognozė ir aproksimuojantys modeliai ($I = 200$ mA)



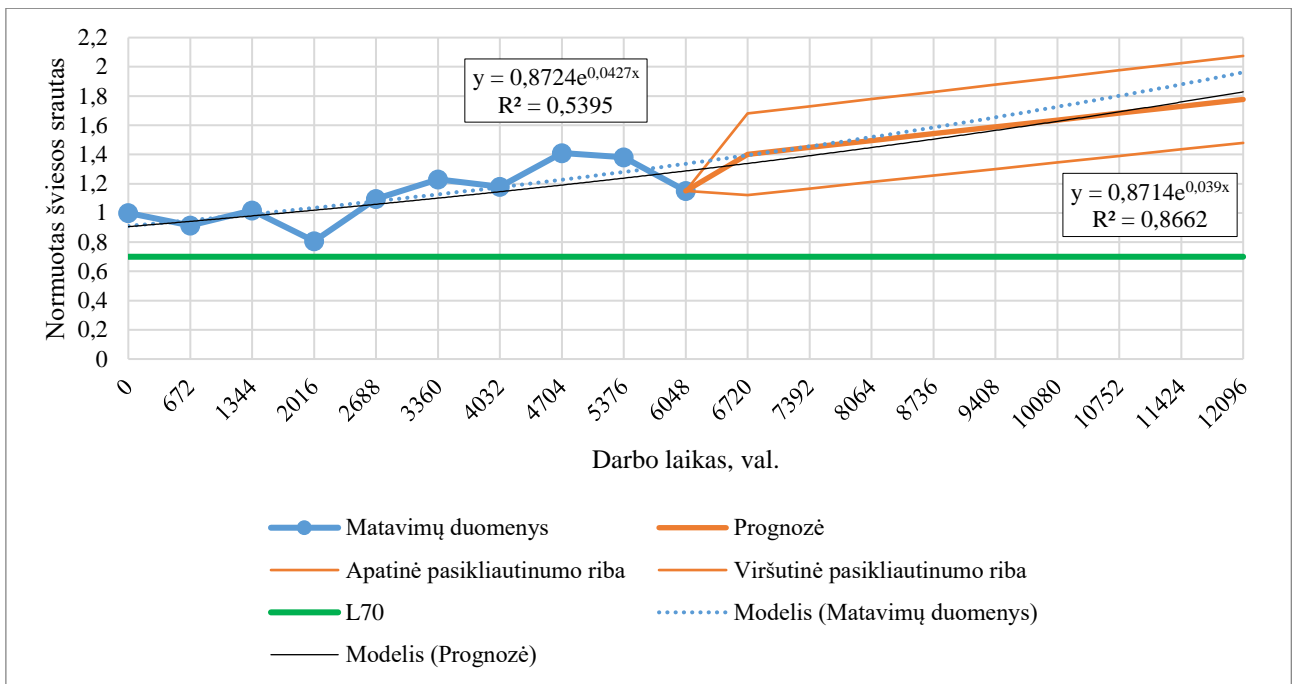
4.9 pav. Nustatyta citrinų žalios spalvos šviestukų šviesos srauto charakteristika, prognozė ir aproksimuojantys modeliai ($I = 200$ mA)



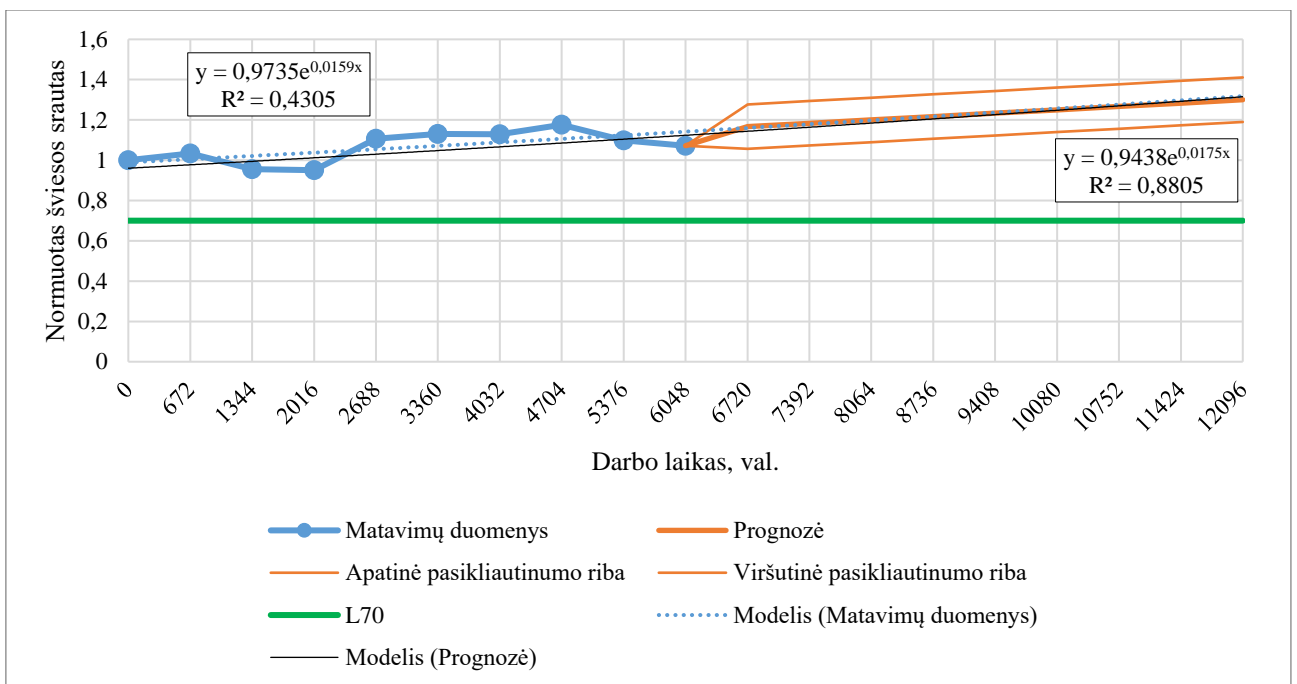
4.10 pav. Nustatyta ciano spalvos šviestukų šviesos srauto charakteristika, prognozė ir aproksimuojantys modeliai ($I = 200 \text{ mA}$)



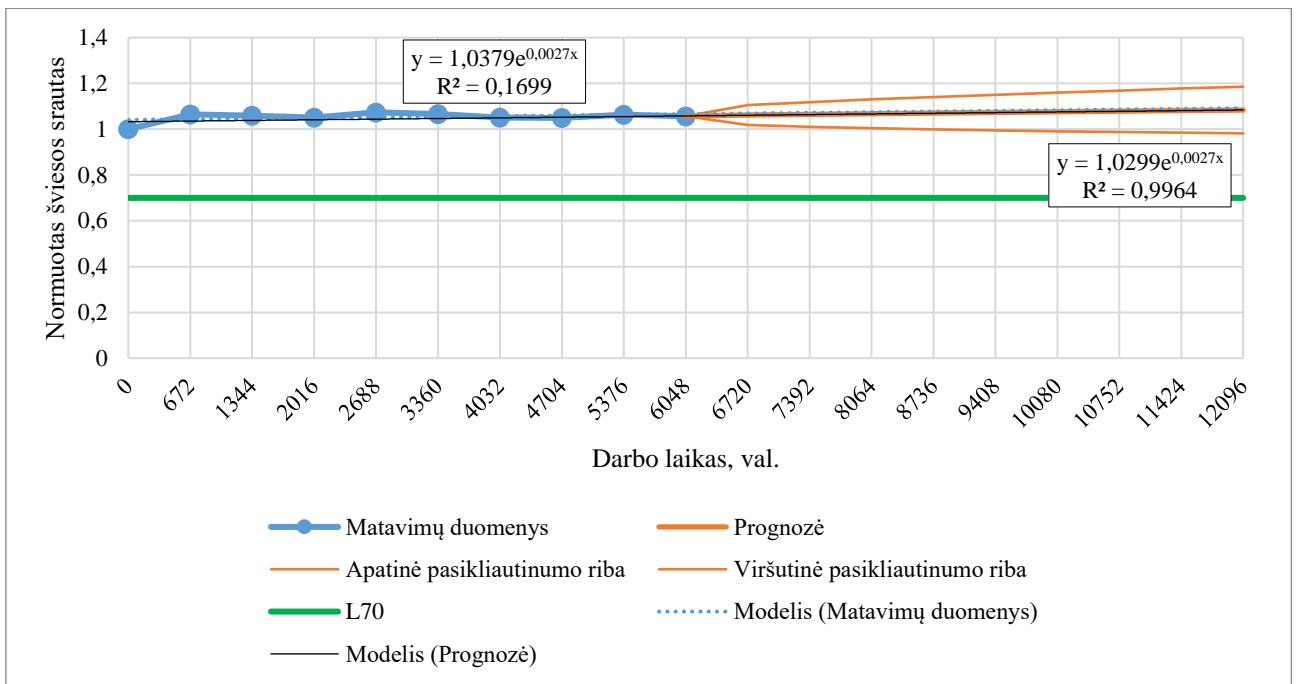
4.11 pav. Nustatyta mėlynos spalvos šviestukų šviesos srauto charakteristika, prognozė ir aproksimuojantys modeliai ($I = 200 \text{ mA}$)



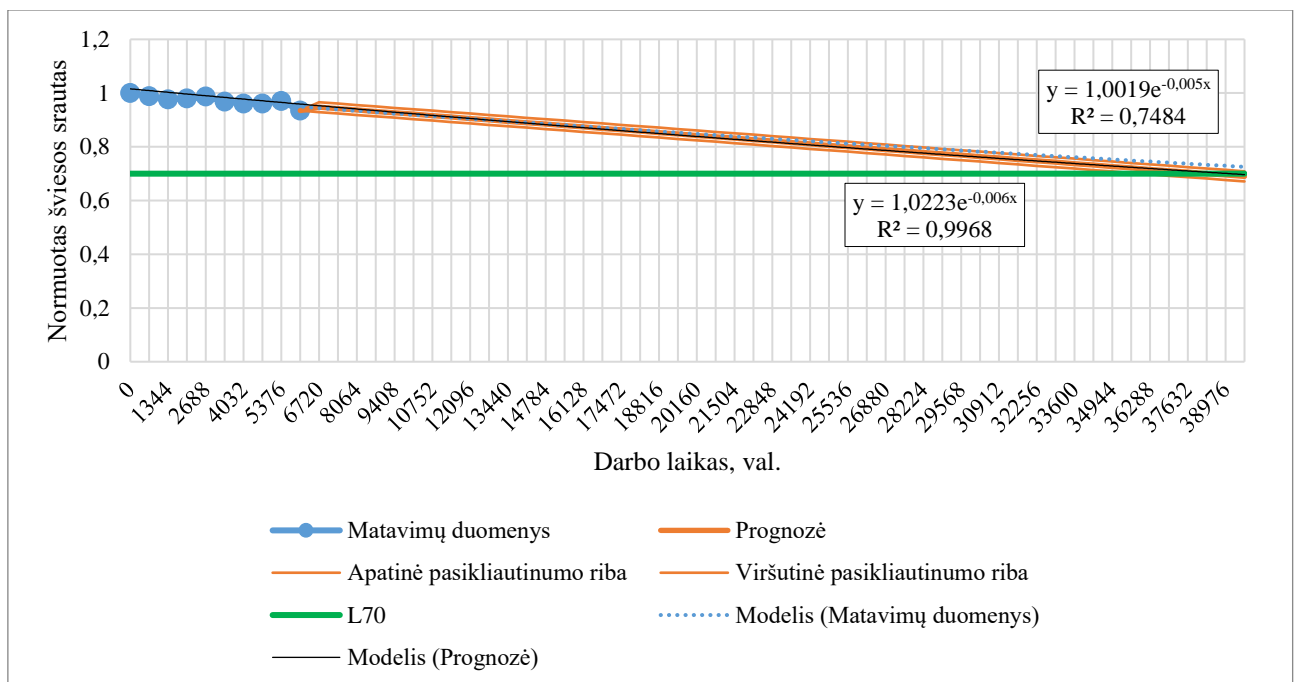
4.12 pav. Nustatyta violetinės I spalvos šviestukų šviesos srauto charakteristika, prognozė ir aproksimuojantys modeliai ($I = 200 \text{ mA}$)



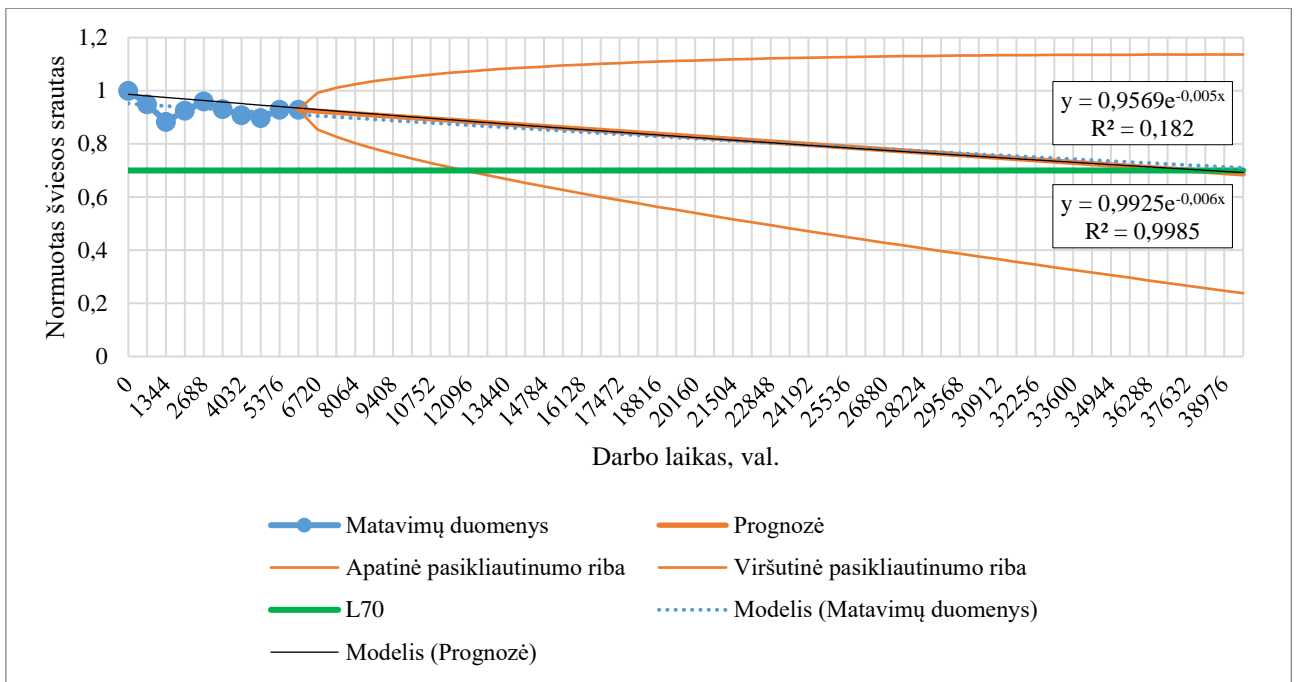
4.13 pav. Nustatyta violetinės II spalvos šviestukų šviesos srauto charakteristika, prognozė ir aproksimuojantys modeliai ($I = 200 \text{ mA}$)



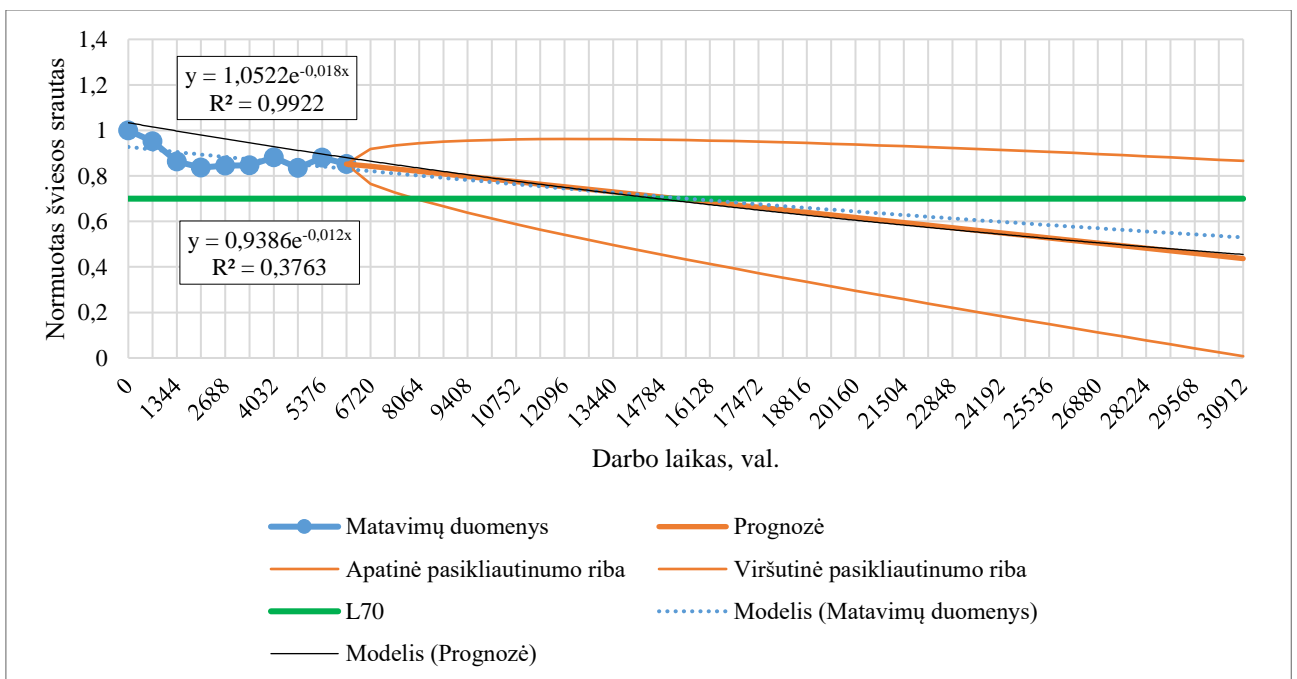
4.14 pav. Nustatyta gintarinės spalvos šviestukų šviesos srauto charakteristika, prognozė ir aproksimuojantys modeliai ($I = 500 \text{ mA}$)



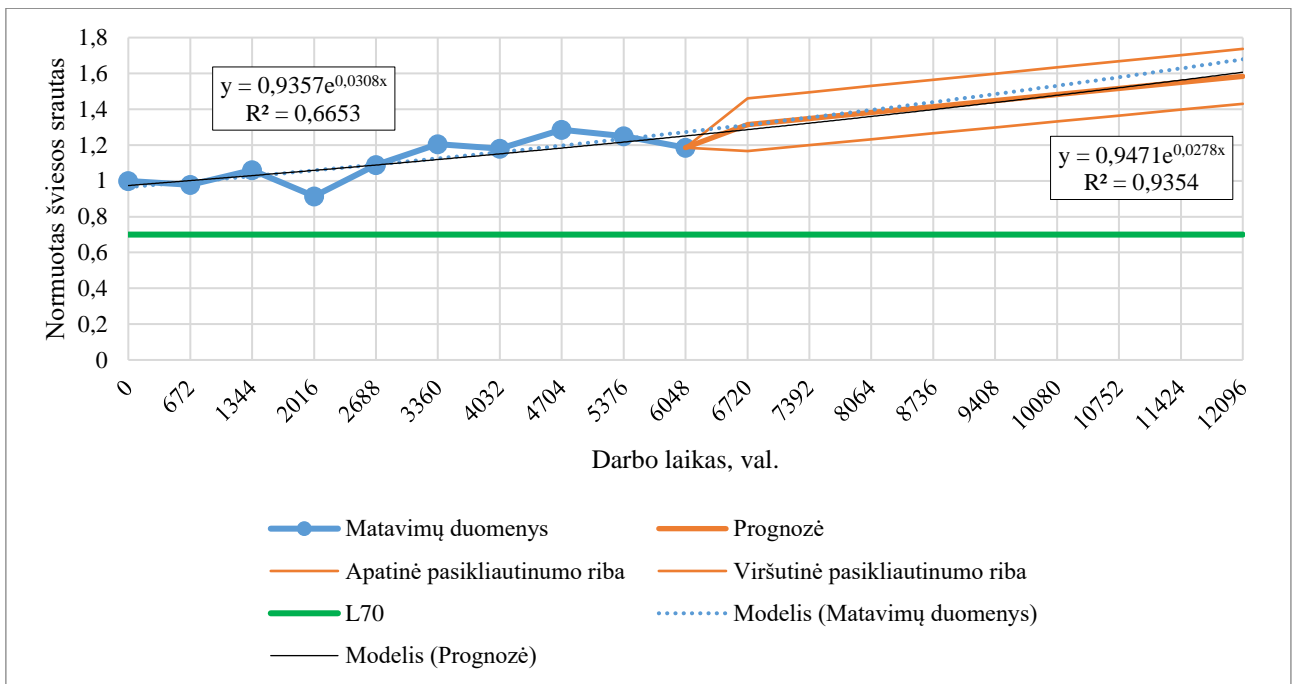
4.15 pav. Nustatyta citrinų žalios spalvos šviestukų šviesos srauto charakteristika, prognozė ir aproksimuojantys modeliai ($I = 500 \text{ mA}$)



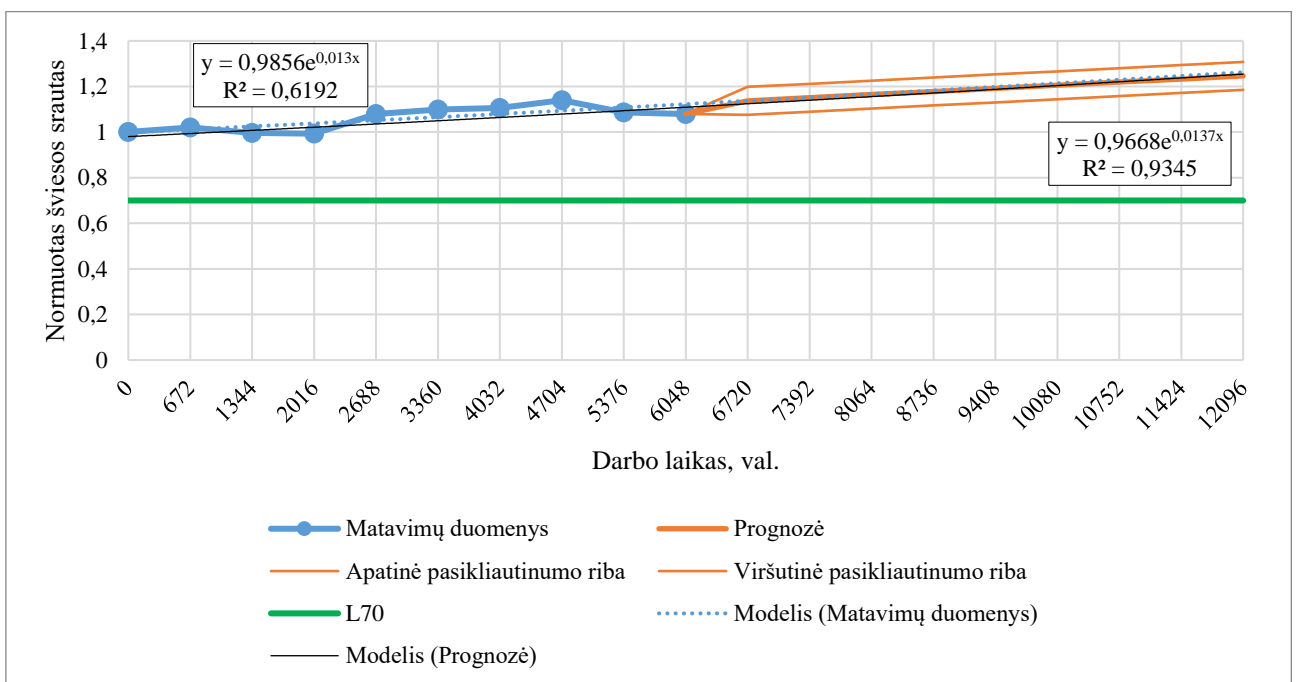
4.16 pav. Nustatyta ciano spalvos šviestukų šviesos srauto charakteristika, prognozė ir aproksimuojantys modeliai ($I = 500 \text{ mA}$)



4.17 pav. Nustatyta mėlynos spalvos šviestukų šviesos srauto charakteristika, prognozė ir aproksimuojantys modeliai ($I = 500 \text{ mA}$)



4.18 pav. Nustatyta violetinės I spalvos šviestukų šviesos srauto charakteristika, prognozė ir aproksimuojantys modeliai ($I = 500$ mA)



4.19 pav. Nustatyta violetinės II spalvos šviestukų šviesos srauto charakteristika, prognozė ir aproksimuojantys modeliai ($I = 500$ mA)

Sudaryti šviestukų šviesos srauto modeliai, jų determinacijos koeficientas R^2 , pobūdis ir tikėtina parametro L_{70} vertė pagal matavimų rezultatus pateikiami 4.4 lentelėje, o pagal gautas prognozės vertes – 4.5 lentelėje.

4.4 lentelė. Šviestukų šviesos srauto modeliai pagal matavimų duomenis

Šviestuko spalva	Srovės stipris, mA	Modelis	Determinacijos koeficientas R^2	Pobūdis	L_{70} , val.
Gintarinė	200	$y = 0,9812e^{-0,006x}$	0,6915	Mažėjantis	36960
	500	$y = 0,0379e^{-0,0027x}$	0,1699	Didėjantis	–
Citrinų žalia	200	$y = 1,0132e^{-0,003x}$	0,5825	Mažėjantis	>39648
	500	$y = 1,0019e^{-0,005x}$	0,7484	Mažėjantis	>39648
Ciano	200	$y = 0,879e^{-0,024x}$	0,4209	Mažėjantis	5376–6048
	500	$y = 0,9569e^{-0,005x}$	0,182	Mažėjantis	>39648
Mėlyna	200	$y = 0,8828e^{-0,038x}$	0,5026	Mažėjantis	3360
	500	$y = 0,9386e^{-0,012x}$	0,3763	Mažėjantis	14784–16128
Violetinė I	200	$y = 0,8724e^{0,0427x}$	0,5395	Didėjantis	–
	500	$y = 0,9357e^{0,0308x}$	0,6653	Didėjantis	–
Violetinė II	200	$y = 0,9735e^{0,0159x}$	0,4305	Didėjantis	–
	500	$y = 0,9856e^{0,0013x}$	0,6192	Didėjantis	–

4.5 lentelė. Šviestukų šviesos srauto modeliai pagal prognozės duomenis

Šviestuko spalva	Srovės stipris, mA	Modelis	R^2	Pobūdis	L_{70} apat., val.	L_{70} , val.	L_{70} viršut., val.
Gintarinė	200	$y = 0,0113e^{-0,007x}$	0,9977	Mažėjantis	20160–20832	32256–32928	>39648
	500	$y = 1,0299e^{0,0027x}$	0,9964	Didėjantis	–	–	–
Citrinų žalia	200	$y = 1,0134e^{-0,003x}$	0,999	Mažėjantis	>39648		
	500	$y = 1,0223e^{-0,006x}$	0,9968	Mažėjantis	36288–36960	38304–38976	>39648
Ciano	200	$y = 0,0436e^{-0,033x}$	0,9966	Mažėjantis	6048–6720	6720–7392	–
	500	$y = 0,9925e^{-0,006x}$	0,9985	Mažėjantis	12096–12768	37632–38304	–
Mėlyna	200	$y = 0,1763e^{-0,059x}$	0,9954	Mažėjantis	<6048	4704–5376	–
	500	$y = 0,0522e^{-0,018x}$	0,9922	Mažėjantis	8064–8736	14784–15456	>39648
Violetinė I	200	$y = 0,8714e^{0,039x}$	0,8662	Didėjantis	–	–	–
	500	$y = 0,9471e^{0,0278x}$	0,9354	Didėjantis	–	–	–
Violetinė II	200	$y = 0,9438e^{0,0175x}$	0,8805	Didėjantis	–	–	–
	500	$y = 0,9668e^{0,0137x}$	0,9345	Didėjantis	–	–	–

Atlikus gautų rezultatų analizę matoma, kad srovės stipriui esant 200 mA, gintarinės, citrinų žalios, ciano ir mėlynos spalvų šviestukų šviesos srautas pagal matavimo ir prognozės vertes yra mažėjančio pobūdžio. Gintarinės ir citrinų žalios šviestukų šviesos srauto sumažėjimas po 6048 darbo valandų yra nedidelis ir atitinkamai neviršija ~7 % ir ~4 % pradinio intensyvumo lygio. Įvertinus matavimo duomenų ir prognozės modelius, labiausiai tikėtina gintarinės spalvos L_{70} parametro vertė 32256–36960 val., citrinų žalios spalvos šviestukų – daugiau nei 39648 val. Ciano ir mėlynos spalvų šviestukų intensyvumo po 6048 darbo valandų sumažėjimas yra didelis ir atitinkamai siekia apie 26 % ir 36 % pradinio lygio. Stebimas didžiausias šio tipo šviestukų šviesos srauto kritis pirmomis 0–1344 šviestukų darbo valandomis. Dėl šviesos intensyvumo verčių svyravimo laikui bėgant, gaunamas platus prognozės pasikliautino intervalo reikšmių diapazonas, tačiau labiausiai tikėtina L_{70} parametro vertė šių spalvų šviestukams atitinkamai yra lygi tik 5376–7392 val. ir 3360–5376 val.

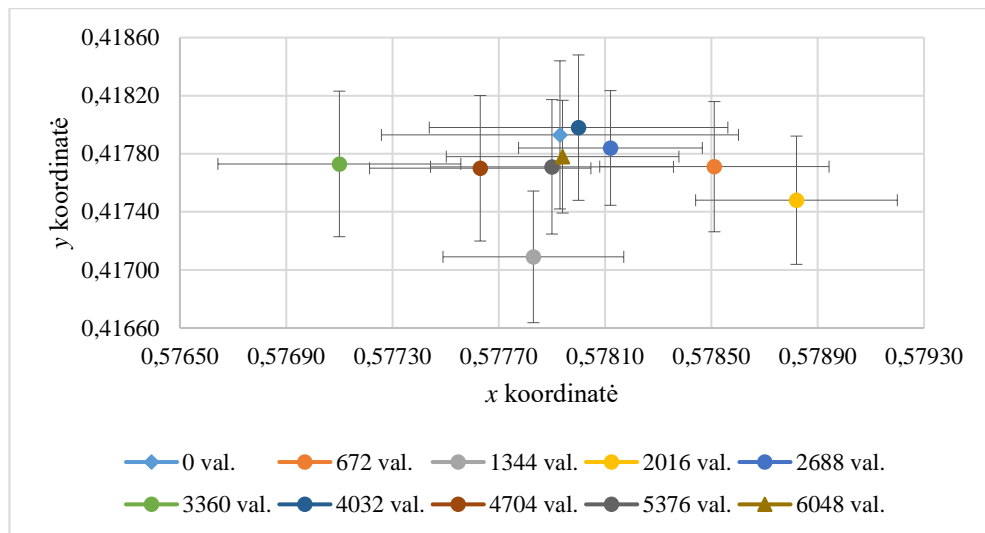
Įvertinus šviesos srauto priklausomybę nuo šviestukų darbo laiko 500 mA srovės stiprio matavimo taške, matoma, kad citrinų žalios, ciano ir mėlynos spalvų šviestukų šviesos srauto kitimo pobūdis taip pat yra mažėjantis. Šviestukų šviesos intensyvumo sumažėjimas po 6048 darbo valandų apytikriai sudaro 6 %, 7 % ir 15 % atitinkamai citrinų žalios, ciano ir mėlynos spalvų šviestukų pradinio šviesos srauto lygio. Atsižvelgiant į matavimo duomenų ir prognozės modelius, labiausiai tikėtina citrinų žalios spalvos šviestukų L_{70} parametro vertė yra didesnė nei 39648 val. Ciano ir mėlynos spalvų šviestukų intensyvumo prognozės verčių sklaida, kaip ir 200 mA srovės stiprio atveju, stebima didelė, tačiau labiausiai tikėtina L_{70} parametro vertė ciano spalvos šviestukams yra didesnė nei 37632 val., o mėlynos spalvos šviestukams – 14784–16128 val.

Gintarinės spalvos šviestukų, kuomet srovės stipris lygus 200 mA, violetinės I ir violetinės II spalvų šviestukų, kuomet srovės stipris lygus 200 mA ir 500 mA, šviesos srauto kitimas turi didėjantį pobūdį. Šiuo atveju, nustatyti L_{70} parametro vertes galima tik atlikus daugiau matavimų laikui bėgant. Šviesos intensyvumo augimą, kuris violetinės I spalvos šviestukams siekia apytikriai 15 % ir 19 % atitinkamai srovės stipriui esant lygiam 200 mA ir 500 mA, galima paaiškinti vadinamu šviestukų „gijimo“ efektu (angl. *LED healing*), kuris pasireiškia tam tikrą valandų skaičių didelės galios apšvietimo sistemose naudojamuose šviestukuose, sudarytuose iš galio nitrido GaN medžiagos [40].

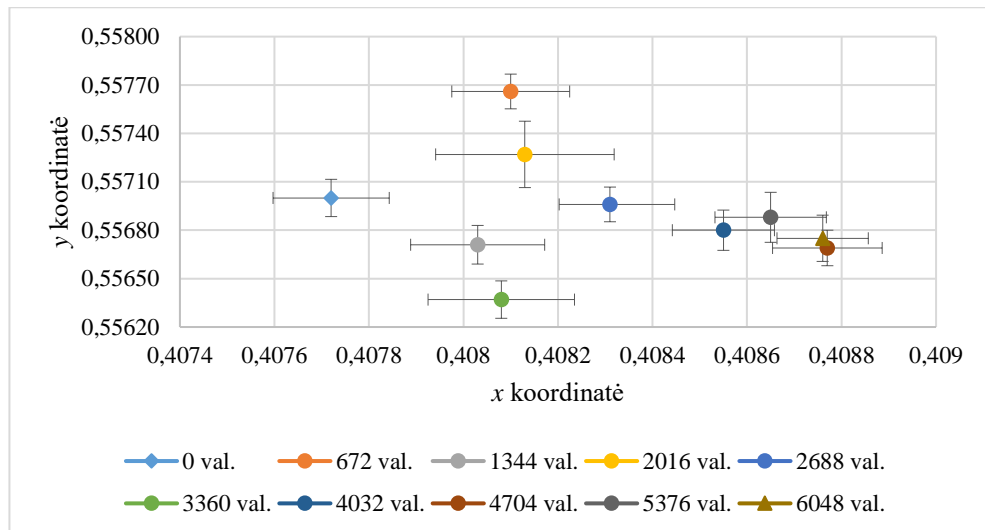
Tiksliausiai mažėjančio pobūdžio eksponentiniu regresiniu modeliu aproksimuojami gintarinės ($I = 200$ mA) ir citrinų žalios ($I = 200$ mA ir $I = 500$ mA) spalvų šviestukų šviesos srauto matavimo duomenys. Determinacijos koeficientas R^2 gintarinės spalvos šviestukų atveju ($I = 200$ mA) lygus 0,6915, o citrinų žalios – 0,5825 ir 0,7484 atitinkamai esant 200 mA ir 500 mA darbo režimams. Prasčiausiai mažėjančiu eksponentiniu modeliu aproksimuojami gintarinės, ciano ir mėlynos spalvų šviestukai ($I = 500$ mA), kurių modelio R^2 atitinkamai lygus tik 0,1699, 0,182 ir 0,3763.

4.2. Spalvinės koordinatės

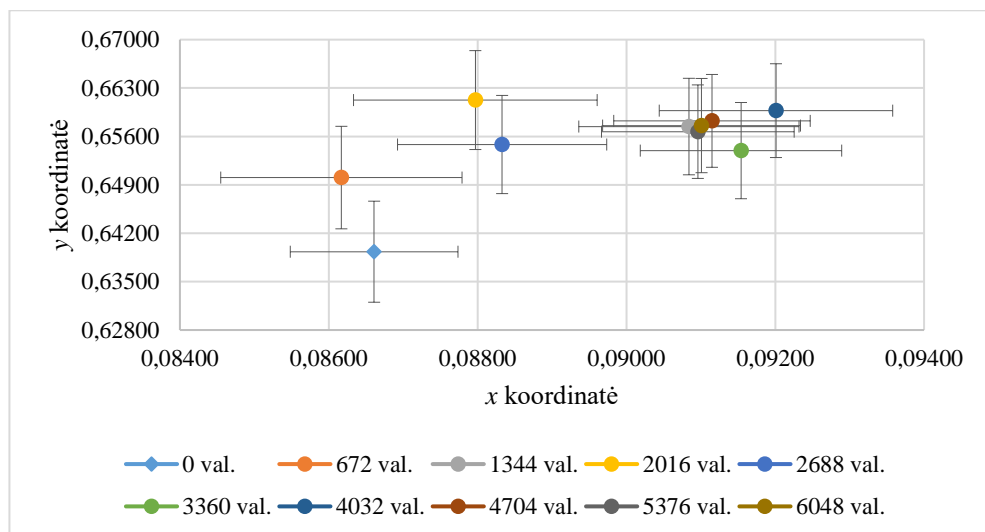
Šviestukų spalvinių x ir y koordinatinių pokyčių įvertinti pasirenkami matavimo taškai, kai srovės stipris, tekantis šviestuku, lygus 200 mA ir 500 mA. Spalvinių šviestukų koordinatinių išsidėstymas, priklausomai nuo šviestukų darbo laiko, kuomet srovės stipris lygus 200 mA pateikiamas 4.20–4.25 pav., o srovės stipriui esant 500 mA – 4.26–4.31 pav. Grafinėse priklausomybėse pradinė (0 val.) x ir y koordinatinių vertė pažymėta rombo formos ženklu, tarpinės vertės – skritulio, o paskutinė reikšmė (6048 val.) – trikampio. Plonomis ištisinėmis juodos spalvos linijomis nurodoma kiekvienos imties matavimo verčių sklaida (± 1 standartinis nuokrypis).



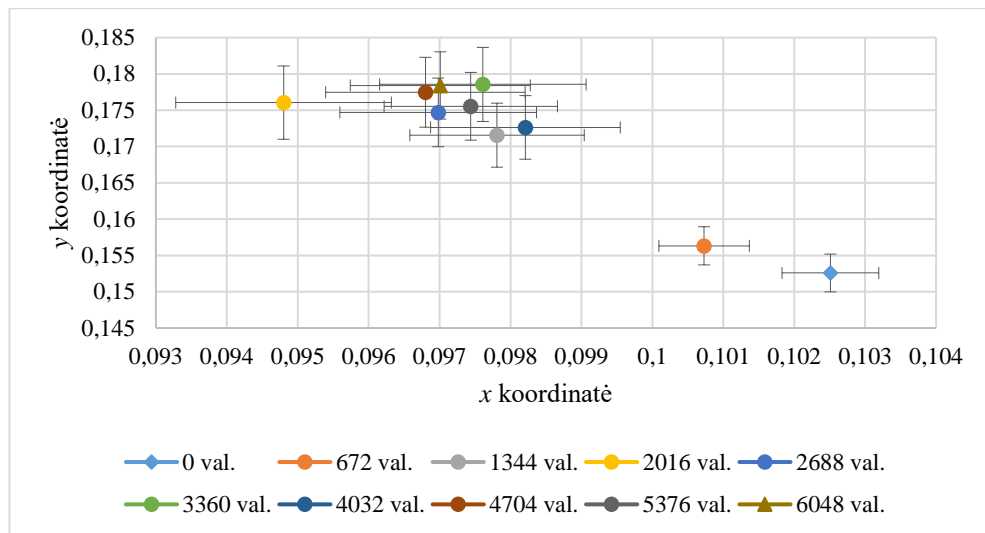
4.20 pav. Gintarinės spalvos šviestukų spalvinių x ir y koordinačių priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko ($I = 200$ mA)



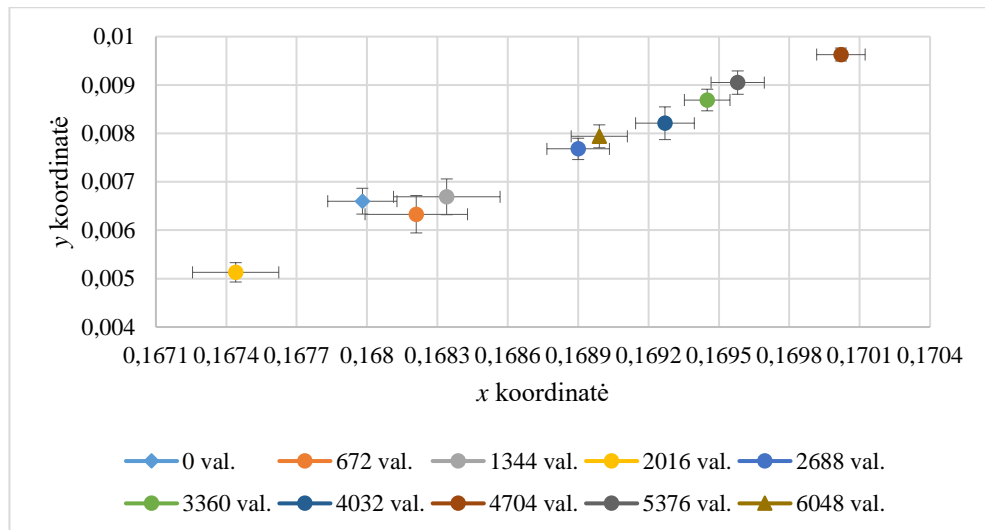
4.21 pav. Citrinų žalios spalvos šviestukų spalvinių x ir y koordinačių priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko ($I = 200$ mA)



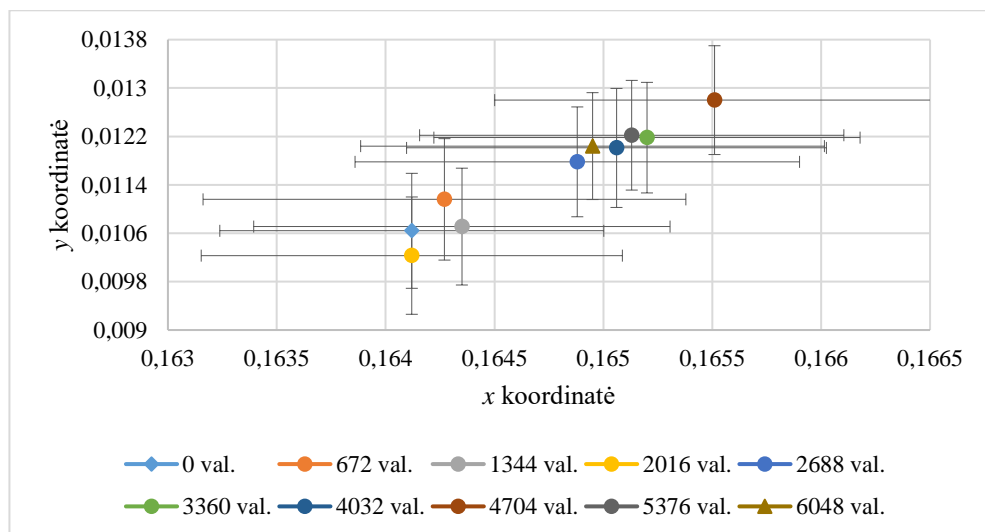
4.22 pav. Ciano spalvos šviestukų spalvinių x ir y koordinačių priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko ($I = 200$ mA)



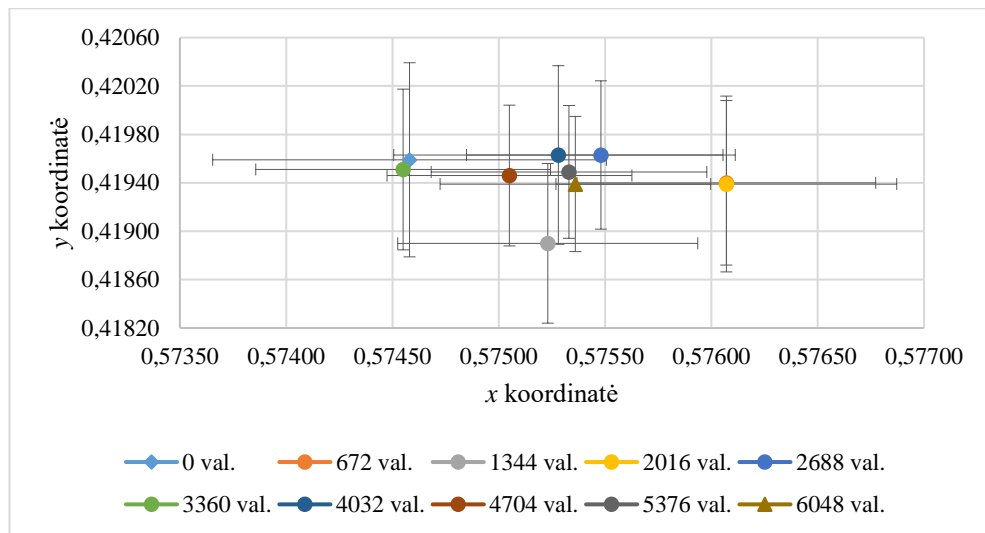
4.23 pav. Mėlynos spalvos šviestukų spalvinių x ir y koordinatėjų priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko ($I = 200$ mA)



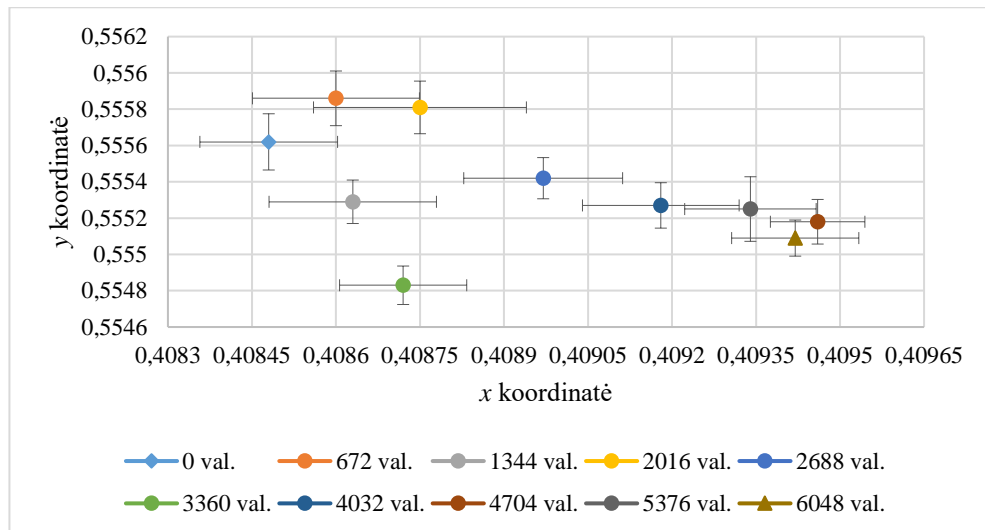
4.24 pav. Violetinės I spalvos šviestukų spalvinių x ir y koordinatėjų priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko ($I = 200$ mA)



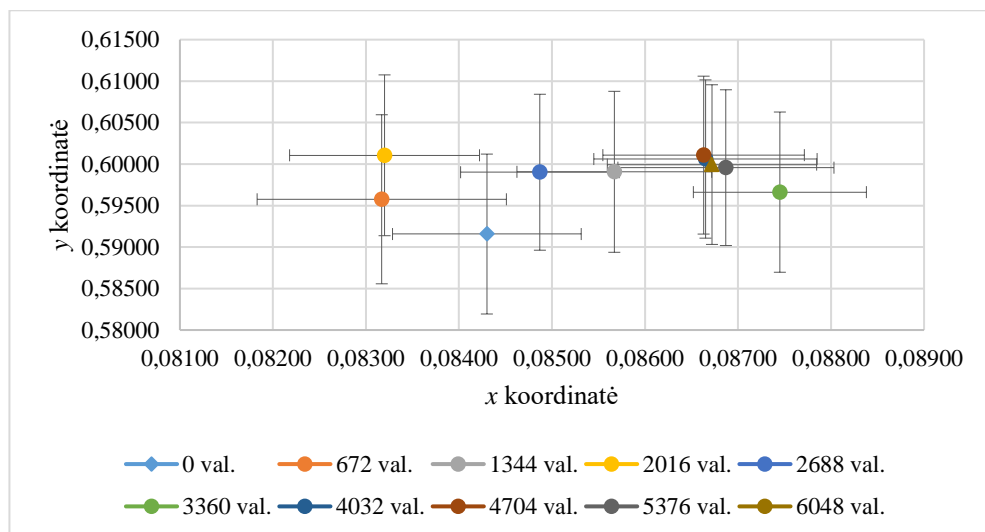
4.25 pav. Violetinės II spalvos šviestukų spalvinių x ir y koordinatėjų priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko ($I = 200$ mA)



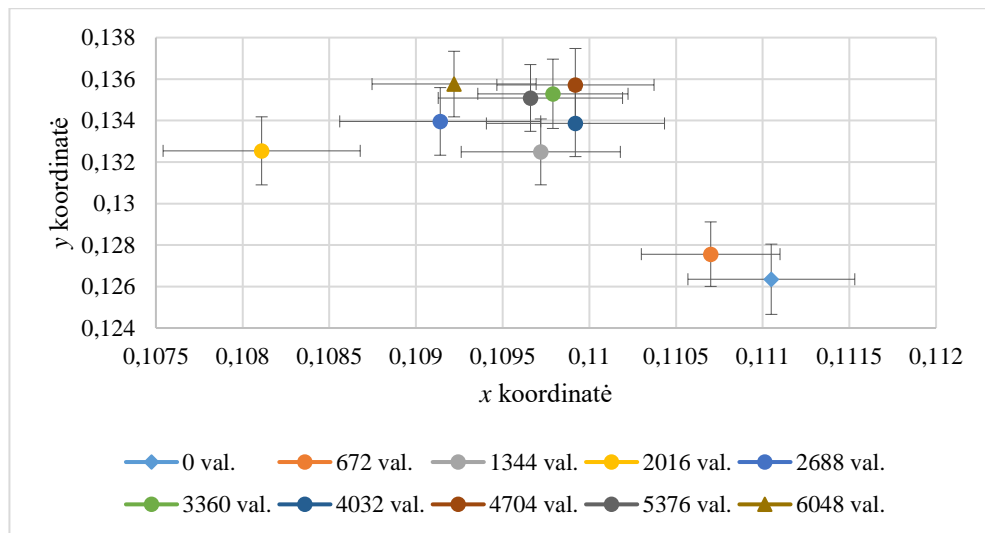
4.26 pav. Gintarinės spalvos šviestukų spalvinių x ir y koordinačių priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko ($I = 500$ mA)



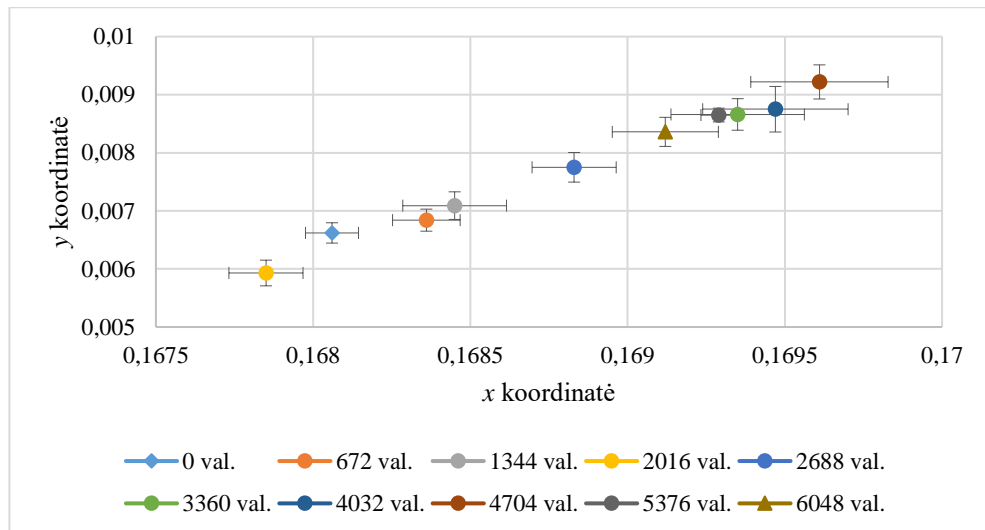
4.27 pav. Citrinų žalios spalvos šviestukų spalvinių x ir y koordinačių priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko ($I = 500$ mA)



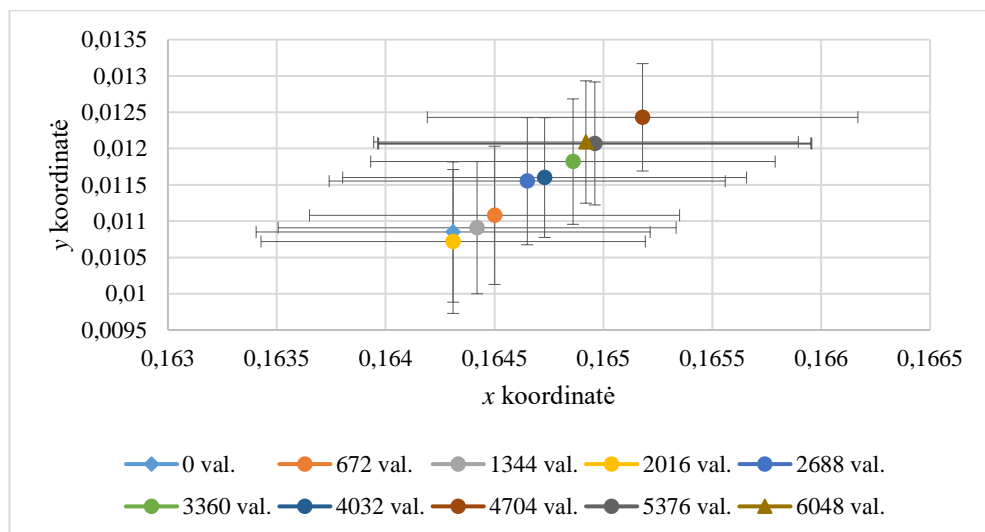
4.28 pav. Ciano spalvos šviestukų spalvinių x ir y koordinačių priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko ($I = 500$ mA)



4.29 pav. Mėlynos spalvos šviestukų spalvinių x ir y koordinačių priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko ($I = 500$ mA)

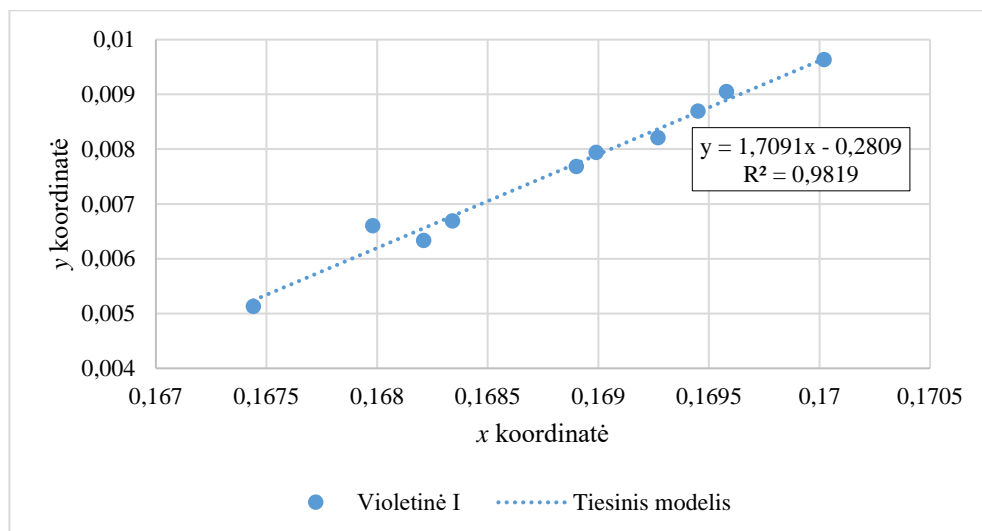


4.30 pav. Violetinės I spalvos šviestukų spalvinių x ir y koordinačių priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko ($I = 500$ mA)

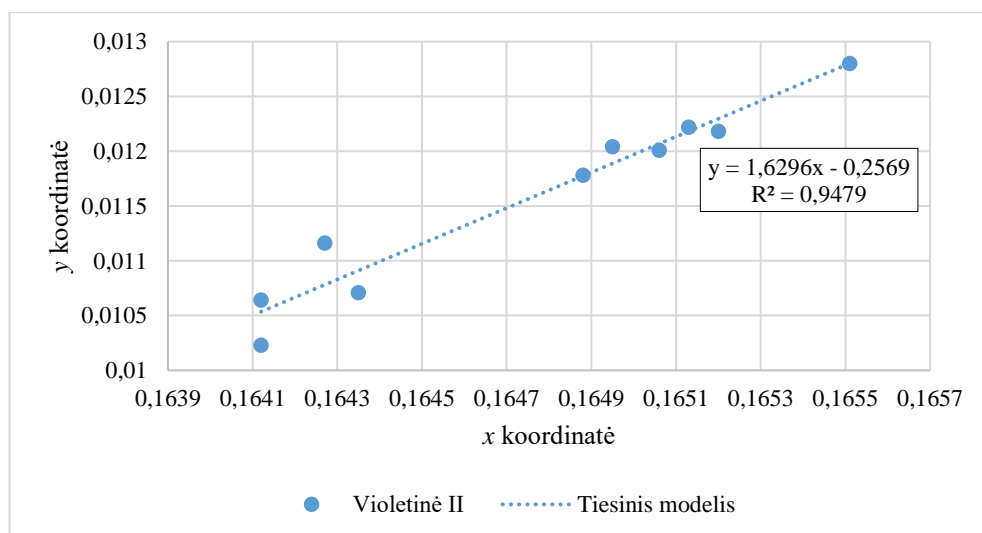


4.31 pav. Violetinės II spalvos šviestukų spalvinių x ir y koordinačių priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko ($I = 500$ mA)

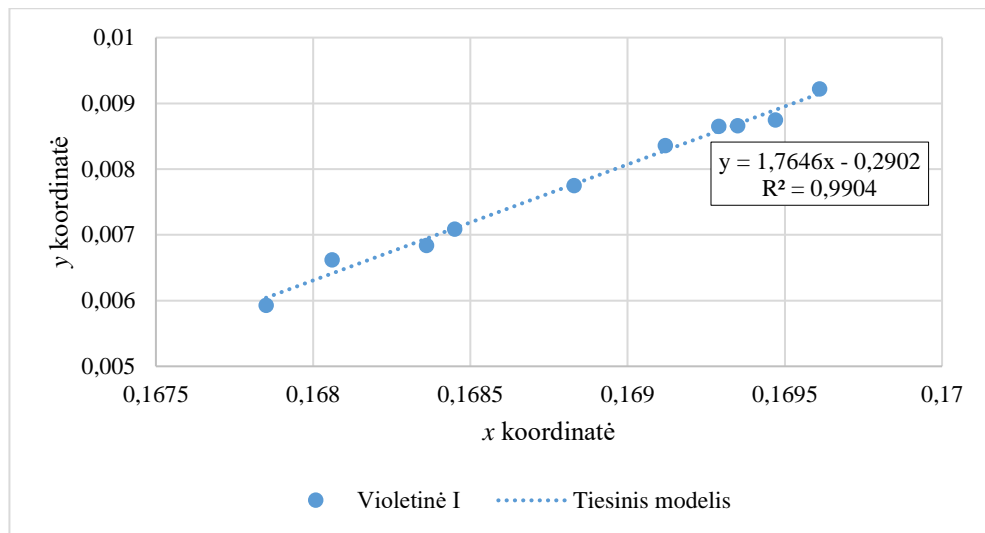
Iš gautų grafinių priklausomybių matoma, kad gintarinės, citrinų žalios, ciano, mėlynos ($I = 200 \text{ mA}$ ir $I = 500 \text{ mA}$) ir violetinės I ($I = 500 \text{ mA}$) spalvų šviestukų spalvinių koordinatėjų pokytis, priklausomai nuo šviestukų darbo laiko, yra nedeterminuotas – stebimas įvairus spalvinių x ir y koordinatėjų išsidėstymas, nesudarantis aiškaus kitimo modelio. Reikia paminėti, kad darbo režimui esant 200 mA ir 500 mA , violetinės I ir violetinės II spalvos šviestukų spalvinių koordinatėjų pokytis yra išskirtiniai atvejai, kadangi šių tipų šviestukų x ir y koordinatės išsidėstę vienoje tiesėje (žr. 4.32–4.35 pav.).



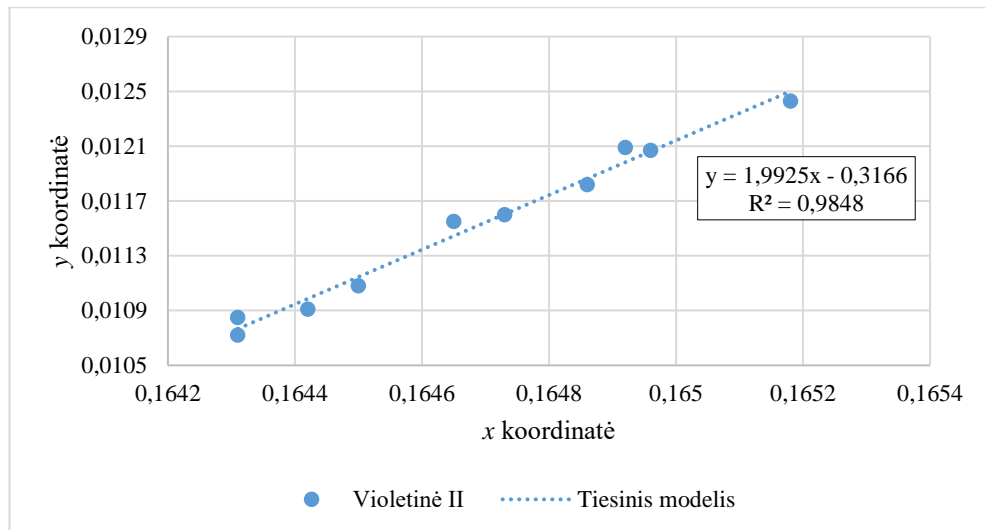
4.32 pav. Violetinės I spalvos šviestukų spalvinių x ir y koordinatėjų aproksimacija tiesiniu modeliu ($I = 200 \text{ mA}$)



4.33 pav. Violetinės II spalvos šviestukų spalvinių x ir y koordinatėjų aproksimacija tiesiniu modeliu ($I = 200 \text{ mA}$)



4.34 pav. Violetinės I spalvos šviestukų spalvinių x ir y koordinačių aproksimacija tiesiniu modeliu ($I = 500$ mA)



4.35 pav. Violetinės II spalvos šviestukų spalvinių x ir y koordinačių aproksimacija tiesiniu modeliu ($I = 500$ mA)

Violetinės I spalvos šviestukų x ir y koordinačių išsidėstymą, kai srovės stipris lygus 200 mA ir 500 mA laikui bėgant atitinkamai galima aproksimuoti tiesiniais regresiniais modeliais $y = 1,7091x - 0,2809$ ir $y = 1,7646x - 0,2902$, o violetinės II spalvos šviestukų – $y = 1,6296x - 0,2569$ ir $y = 1,9925x - 0,3166$. Spalvinių x ir y koordinačių išsidėstymo aproksimacija tiesiniu modeliu įvertinama apskaičiuojant determinacijos koeficientą R^2 , kuris šiais atvejais yra didesnis nei 0,94 ir parodo aukštą adekvatumo lygmenį.

Kadangi, atliekant matavimus yra stebima spalvinių koordinačių verčių sklaida, spalvinių x ir y koordinačių pokyčiui įvertinti atliekama statistinė analizė. Nustatyti, ar yra reikšminis skirtumas tarp vidutinių pradinių spalvinių koordinačių (0 val.) ir galutinių spalvinių koordinačių (6048 val.), kuomet srovės stipris yra lygus 200 mA ir 500 mA, pasirenkama suporuoto „t“ testo metodika (angl. *paired t-test for difference in means*). Šio tipo testas yra skirtas statistiniam vidutinių reikšmių palyginimui, kuomet yra stebima (atliekami matavimai) viena ir ta pati populiacijos imtis prieš ir po intervencijos (šiuo atveju – temperatūrinio poveikio), o stebėjimų skaičius yra nedidelis (mažesnis už 30) [41, 42].

Sudaromos nulinė (H_0) ir alternatyvi (H_a) hipotezės, kurios tikrinamos „t“ testo metu:

- $H_0: \mu_{galut.} - \mu_{prad.} = 0$ (nėra reikšminio skirtumo tarp vidutinių pradinių ir galutinių koordinačių verčių)
- $H_a: \mu_{galut.} - \mu_{prad.} \neq 0$ (yra reikšminis skirtumas tarp vidutinių pradinių ir galutinių koordinačių verčių)

Tyrimo metu reikšmingumo lygmuo α pasirenkamas 0,95. Kritinė „t“ testo reikšmė $t_{krit.} = 2,262$ nustatoma naudojantis Studento skirstinio kritinių reikšmių lentelę [43]. Šiuo atveju yra atliekamas dvipusis (angl. *two-tailed*) „t“ testas, kuriame laisvės laipsnių skaičius (angl. *degrees of freedom*) $df = 9$. Laisvės laipsnių skaičius apskaičiuojamas pagal 6 formulę.

$$df = n - 1, \quad (6)$$

čia: df – laisvės laipsnių skaičius; n – stebėjimų skaičius.

„T“ testo įvertis nustatomas remiantis 7 ir 8 formulėmis [44]:

$$t = \frac{\bar{x}_{skirt.} - 0}{s_{\bar{x}}}, \quad (7)$$

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_{skirt.}}{\sqrt{n}}, \quad (8)$$

čia: t – „t“ testo įvertis; $\bar{x}_{skirt.}$ – vidutinė skirtumų reikšmė; $s_{\bar{x}}$ – standartinė vidurkio paklaida, $s_{skirt.}$ – standartinis skirtumų nuokrypis; n – imties (stebėjimų) dydis.

Apskaičiuoti spalvinių x ir y koordinačių statistiniai duomenys, kai srovės stipris lygus 200 mA, atitinkamai pateikiami 4.6 ir 4.7 lentelėse, o srovės stipriui esant 500 mA – 4.8 ir 4.9 lentelėse.

4.6 lentelė. Spalvinių x koordinačių statistiniai duomenys ($I = 200$ mA)

Šviestuko spalva	X koordinatė (0 val.)			X koordinatė (6048 val.)			X koordinačių skirtumas			T testas	
	Vidurkis	Standartinis nuokrypis	Standartinė vidurkio paklaida	Vidurkis	Standartinis nuokrypis	Standartinė vidurkio paklaida	Vidurkis	Standartinis nuokrypis	Standartinė vidurkio paklaida	T įvertis	P vertė
Gintarinė	0,57793	0,000672	0,000212	0,57794	0,000438	0,000138	0,000010	0,000705	0,000223	0,045	0,965185919
Citrinų žalia	0,40772	0,000123	0,000039	0,40876	0,000097	0,000031	0,00104	0,000126	0,000040	26,000	0,000000001
Ciano	0,08661	0,001127	0,000356	0,09101	0,001330	0,000420	0,0044	0,000748	0,000237	18,593	0,000000017
Mėlyna	0,10251	0,000682	0,000216	0,09701	0,001270	0,000402	-0,0055	0,000894	0,000283	-19,445	0,000000012
Violetinė I	0,16798	0,000148	0,000047	0,16899	0,000120	0,000038	0,00101	0,000137	0,000043	23,308	0,000000002
Violetinė II	0,16412	0,000882	0,000279	0,16495	0,001065	0,000337	0,00083	0,001102	0,000348	2,383	0,041046087

4.7 lentelė. Spalvinių y koordinačių statistiniai duomenys ($I = 200$ mA)

Šviestuko spalva	Y koordinatė (0 val.)			Y koordinatė (6048 val.)			Y koordinačių skirtumas			T testas	
	Vidurkis	Standartinis nuokrypis	Standartinė vidurkio paklaida	Vidurkis	Standartinis nuokrypis	Standartinė vidurkio paklaida	Vidurkis	Standartinis nuokrypis	Standartinė vidurkio paklaida	T įvertis	P vertė
Gintarinė	0,41793	0,000510	0,000161	0,41778	0,000388	0,000123	-0,00015	0,000604	0,000191	-0,785	0,45254554406
Citrinų žalia	0,55700	0,000115	0,000037	0,55675	0,000143	0,000045	-0,00025	0,000118	0,000037	-6,708	0,00008771397
Ciano	0,63933	0,007307	0,002311	0,65757	0,006815	0,002155	0,01824	0,001496	0,000473	38,554	0,0000000003
Mėlyna	0,15258	0,002600	0,000822	0,17841	0,004631	0,001465	0,02583	0,002195	0,000694	37,213	0,0000000004
Violetinė I	0,00660	0,000267	0,000084	0,00794	0,000237	0,000075	0,00134	0,000320	0,000101	13,225	0,00000033510
Violetinė II	0,01064	0,000950	0,000300	0,01204	0,000883	0,000279	0,0014	0,001151	0,000364	3,847	0,00392486307

4.8 lentelė. Spalvinių x koordinačių statistiniai duomenys ($I = 500$ mA)

Šviestuko spalva	X koordinatė (0 val.)			X koordinatė (6048 val.)			X koordinačių skirtumas			T testas	
	Vidurkis	Standartinis nuokrypis	Standartinė vidurkio paklaida	Vidurkis	Standartinis nuokrypis	Standartinė vidurkio paklaida	Vidurkis	Standartinis nuokrypis	Standartinė vidurkio paklaida	T įvertis	P vertė
Gintarinė	0,57458	0,000926	0,000293	0,57536	0,000636	0,000201	0,000780	0,0004104	0,000130	6,010	0,000200060
Citrinų žalia	0,40848	0,000123	0,000039	0,40942	0,000114	0,000036	0,000940	0,0001647	0,000052	18,053	0,000000022
Ciano	0,08430	0,001014	0,000321	0,08672	0,001125	0,000356	0,002420	0,0003259	0,000103	23,481	0,000000002
Mėlyna	0,11105	0,000481	0,000152	0,10922	0,000473	0,000150	-0,001830	0,0002406	0,000076	-24,052	0,000000002
Violetinė I	0,16806	0,000084	0,000027	0,16912	0,000169	0,000053	0,001060	0,0002011	0,000064	16,668	0,000000045
Violetinė II	0,16431	0,000905	0,000286	0,16492	0,000975	0,000308	0,000610	0,0001595	0,000050	12,093	0,000000721

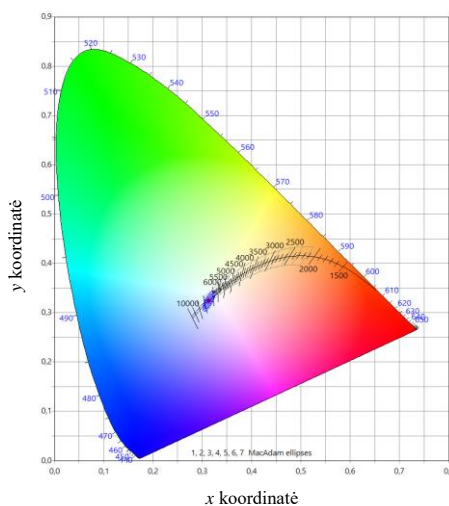
4.9 lentelė. Spalvinių y koordinačių statistiniai duomenys ($I = 500$ mA)

Šviestuko spalva	Y koordinatė (0 val.)			Y koordinatė (6048 val.)			Y koordinačių skirtumas			T testas	
	Vidurkis	Standartinis nuokrypis	Standartinė vidurkio paklaida	Vidurkis	Standartinis nuokrypis	Standartinė vidurkio paklaida	Vidurkis	Standartinis nuokrypis	Standartinė vidurkio paklaida	T įvertis	P vertė
Gintarinė	0,41959	0,000802	0,000254	0,41939	0,000559	0,000177	-0,00020	0,000313	0,000099	-2,023	0,0738115128053
Citrinų žalia	0,55562	0,000155	0,000049	0,55509	0,000099	0,000031	-0,00053	0,000125	0,000040	-13,390	0,0000003011189
Ciano	0,59157	0,009635	0,003047	0,59994	0,009621	0,003042	0,00837	0,000395	0,000125	67,085	0,0000000000002
Mėlyna	0,12635	0,001693	0,000535	0,13576	0,001581	0,000500	0,00941	0,001326	0,000419	22,438	0,0000000032850
Violetinė I	0,00662	0,000175	0,000055	0,00836	0,000250	0,000079	0,00174	0,000313	0,000099	17,557	0,0000000285581
Violetinė II	0,01085	0,000966	0,000306	0,01209	0,000843	0,000266	0,00124	0,000259	0,000082	15,136	0,0000001042743

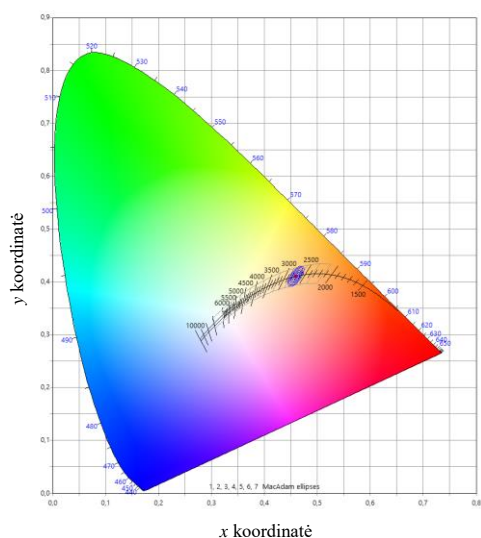
Atlikus statistinę spalvinių x ir y koordinacių analizę yra matoma, kad citrinų žalios, ciano, mėlynos, violetinės I ir violetinės II spalvų šviestukų x ir y koordinacių ($I = 200$ mA) „t“ testo įverčio absoliutinės reikšmės yra didesnės už kritinę vertę $t_{krit.} = 2,262$ ($\alpha = 0,95$), todėl nulinė hipotezė H_0 yra paneigiama ir galima teigti, kad egzistuoja reikšminis skirtumas tarp pradinių ir galutinių šių koordinacių verčių. Gintarinės spalvos šviestukų x ir y spalvinių koordinacių pokyčio „t“ testo absoliutus įvertis yra mažesnis (atitinkamai 0,045 ir 0,785) nei nustatyta kritinė vertė, todėl šiuo atveju nulinė hipotezė H_0 paliekama galioti ir negalima teigti, kad tarp pradinių ir galutinių x ir y koordinacių verčių yra reikšminis skirtumas. Esant 500 mA srovės stipriui, gauta, kad visais atvejais, išskyrus gintarinės spalvos šviestukų y spalvinių koordinacių pokytį, egzistuoja reikšminis skirtumas tarp pradinių ir galutinių x ir y spalvinių koordinacių. Gintarinės spalvos šviestukų y koordinacių skirtumo „t“ testo įverčio absoliutinė reikšmė yra mažesnė už nustatytą kritinę vertę ($2,023 < 2,262$), todėl šiuo atveju nulinė hipotezė H_0 paliekama galioti ir negalima teigti, kad tarp pradinės ir galutinės y koordinatės verčių egzistuoja reikšminis skirtumas.

Įvertinus kiekvieno tipo šviestukų pradinių (0 val.) ir galutinių (6048 val.) spalvinių x ir y koordinacių skirtumų sklaidą (standartinį nuokrypį) yra matoma, kad didžiausią išsibarstymą iš x ($I = 200$ mA) koordinacių grupės turi violetinės II spalvos tipo šviestukai, y ($I = 200$ mA) koordinacių grupės – mėlynos spalvos šviestukai, x ($I = 500$ mA) koordinacių grupės – gintarinės spalvos šviestukai, o y ($I = 500$ mA) koordinacių grupės – mėlynos spalvos šviestukai.

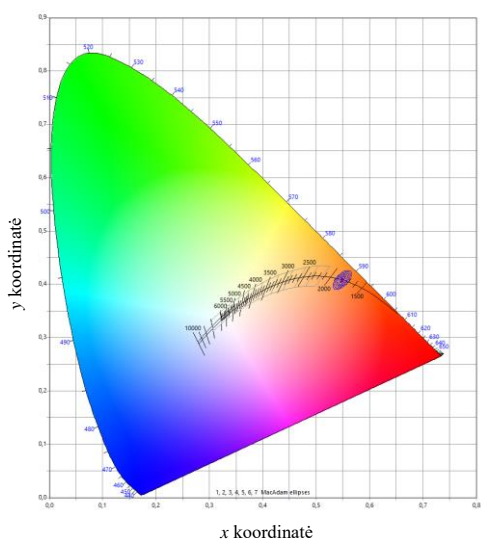
Pateikiamas pavyzdys, kokią įtaką baltos spalvos šviesos parametrui turi tiriamų šviestukų spalvinių koordinacių (spekto) pokytis laikui bėgant. Pasirenkamos trys skirtingos baltos spalvos šviesos spalvinės temperatūros – 6500 K, 2700 K ir 1800 K. Remiantis nustatytais pradiniais (0 val., 500 mA) šviestukų spektro duomenimis suprojektuojami atraminiai (šiam pavyzdyje – etaloniniai) 6500 K, 2700 K ir 1800 K baltos spalvos šviesos šaltinių spektrai. Priimama sąlyga, kad pagalbinių (papildomų) spektro dedamųjų šviesos šaltinių optinės charakteristikos yra pastovios ir laikui bėgant nekinta (šio darbo metu netiriamos). Gautos pradinės 6500 K, 2700 K ir 1800 K baltos spalvos šviesos spalvinės x ir y koordinatės bei šiuose taškuose esančios 7 MacAdam'o elipsės CIE 1931 spalvų erdvėje pateikiami 4.36–4.38 pav. Įvertinami pradinės baltos spalvos parametrai – nuokrypis nuo Planko lanko (Duv), spalvų atgavos koeficientai R_a ir R_g [45]. Nustatoma, kad atraminės 6500 K, 2700 K ir 1800 K baltos spalvos šviesos nuokrypis nuo Planko lanko yra lygus 0 (nėra nuokrypio), o R_a ir R_g parametrai atitinkamai lygūs 99 ir 99, 97 ir 96, 96 ir 95 (žr. 4.10–4.12 lenteles, „0 val.“ eilutę).



4.36 pav. Pradinė (etaloninė) 6500 K baltos spalvos šviesos spalvinių koordinacių pozicija CIE 1931 spalvų erdvėje

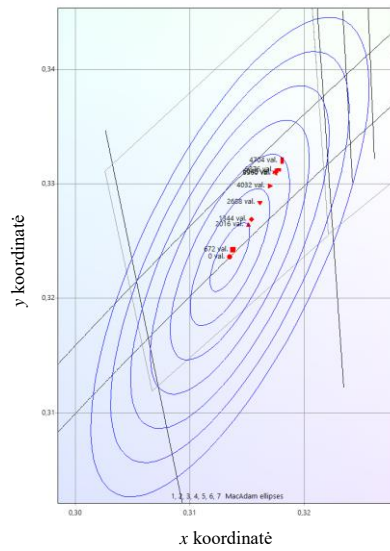


4.37 pav. Pradinė (etaloninė) 2700 K baltos spalvos šviesos spalvinių koordinatėjų pozicija CIE 1931 spalvų erdvėje

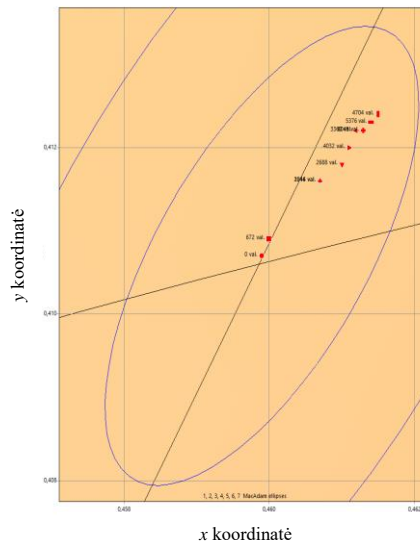


4.38 pav. Pradinė (etaloninė) 1800 K baltos spalvos šviesos spalvinių koordinatėjų pozicija CIE 1931 spalvų erdvėje

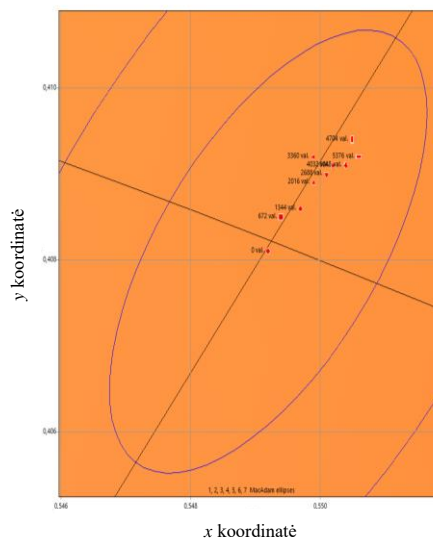
Priimama, kad baltos spalvos šviesos srautas projektavimo metu palaikomas vienodas ir 6500 K spalvinės temperatūros atveju nustatomas 5000 lm, 2700 K atveju – 3125 lm, o 1800 K atveju – 2500 lm. Atliekamas modeliavimas, kaip kinta baltos spalvos šviesos parametrai priklausomai nuo tiriamų šviestukų 0–6048 val. darbo laiko. Sudarant naują tašką, pakitę šviestukų spektriniai duomenys įtraukiami tomis pačiomis, kaip atraminio taško, proporcijomis, tokiu būdu išlaikant numatytą pastovų šviesos srautą. Gautos 6500 K, 2700 K ir 1800 K baltos spalvos šviesos spalvinių koordinatėjų priklausomybės nuo tiriamų šviestukų darbo laiko atitinkamai pateikiamos 4.39 pav., 4.40 pav. ir 4.41 pav., o apskaičiuoti šviesos parametrai – 4.10–4.12 lentelėse.



4.39 pav. 6500 K baltos šviesos spalvinių koordinatėjų kitimo priklausomybė nuo darbo laiko CIE 1931 spalvų erdvėje



4.40 pav. 2700 K baltos šviesos spalvinių koordinatėjų kitimo priklausomybė nuo darbo laiko CIE 1931 spalvų erdvėje



4.41 pav. 1800 K baltos šviesos spalvinių koordinatėjų kitimo priklausomybė nuo darbo laiko CIE 1931 spalvų erdvėje

4.10 lentelė. 6500 K spalvinės temperatūros šviesos parametų priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko

Darbo laikas, val.	x koordinatė	y koordinatė	CCT, K	Duv	R _a	R ₉	Elipsės nr.
0	0,3135	0,3236	6502	0	99	99	1
672	0,3138	0,3242	6480	0,0002	99	99	1
1344	0,3154	0,3269	6373	0,0008	99	97	2
2016	0,3151	0,3264	6392	0,0007	99	97	2
2688	0,3161	0,3284	6326	0,0012	99	96	2
3360	0,3175	0,3309	6238	0,0018	99	94	3
4032	0,3170	0,3298	6270	0,0015	99	95	3
4704	0,3181	0,3320	6201	0,0021	99	94	3
5376	0,3177	0,3312	6226	0,0018	99	94	3
6048	0,3175	0,3310	6237	0,0018	99	94	3

4.11 lentelė. 2700 K spalvinės temperatūros šviesos parametų priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko

Darbo laikas, val.	x koordinatė	y koordinatė	CCT, K	Duv	R _a	R ₉	Elipsės nr.
0	0,4599	0,4107	2700	0	97	96	1
672	0,46	0,4109	2700	0,0001	97	95	1
1344	0,4607	0,4116	2696	0,0003	96	95	1
2016	0,4607	0,4116	2696	0,0003	96	95	1
2688	0,461	0,4118	2693	0,0003	96	95	1
3360	0,4612	0,4122	2694	0,0005	96	95	1
4032	0,4611	0,412	2694	0,0004	96	95	1
4704	0,4615	0,4124	2691	0,0005	96	95	1
5376	0,4614	0,4123	2692	0,0005	96	95	1
6048	0,4613	0,4122	2692	0,0005	96	95	1

4.12 lentelė. 1800 K spalvinės temperatūros šviesos parametų priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko

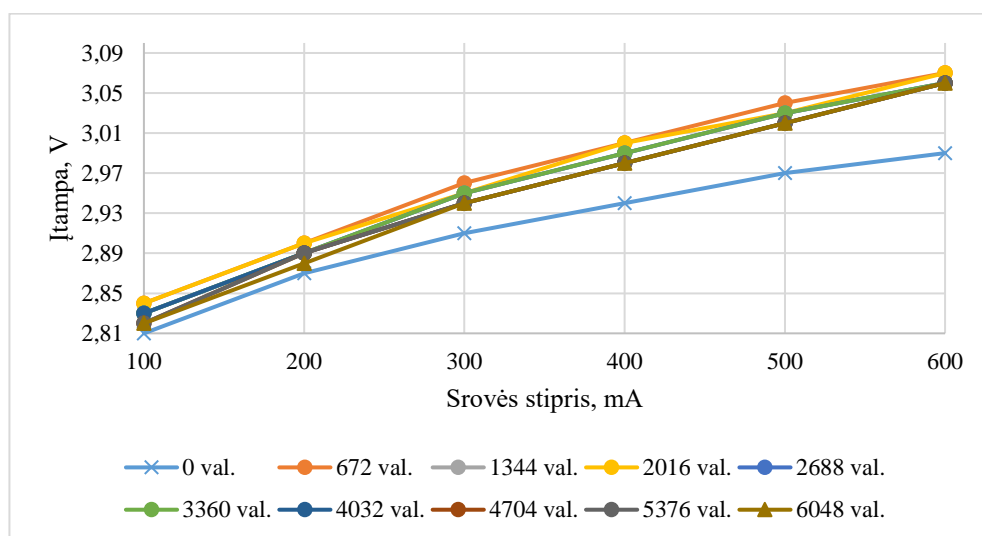
Darbo laikas, val.	x koordinatė	y koordinatė	CCT, K	Duv	R _a	R ₉	Elipsės nr.
0	0,5492	0,4081	1800	0	96	95	1
672	0,5494	0,4085	1801	0,0001	96	94	1
1344	0,5497	0,4086	1799	0,0001	96	95	1
2016	0,5499	0,4089	1799	0,0002	96	94	1
2688	0,5501	0,409	1798	0,0003	96	94	1
3360	0,5499	0,4092	1801	0,0003	96	95	1
4032	0,5502	0,4091	1798	0,0003	96	94	1
4704	0,5505	0,4094	1798	0,0004	96	94	1
5376	0,5506	0,4092	1796	0,0004	96	94	1
6048	0,5504	0,4091	1797	0,0003	96	94	1

Iš gautų rezultatų yra matoma, kad šviestukų optinių charakteristikų kitimas laikui bėgant labiausiai pasireiškia 6500 K spalvinės temperatūros baltos spalvos šviesai – šiuo atveju stebimas x ir y spalvinių koordinatė pokytis iš 1 į 3 elipsę ir 0,0018 nuokrypis nuo Planko lanko (Duv), -264 K spalvinės temperatūros poslinkis bei R_9 spalvų atgavos įverčio sumažėjimas nuo 99 ir 94. Tam

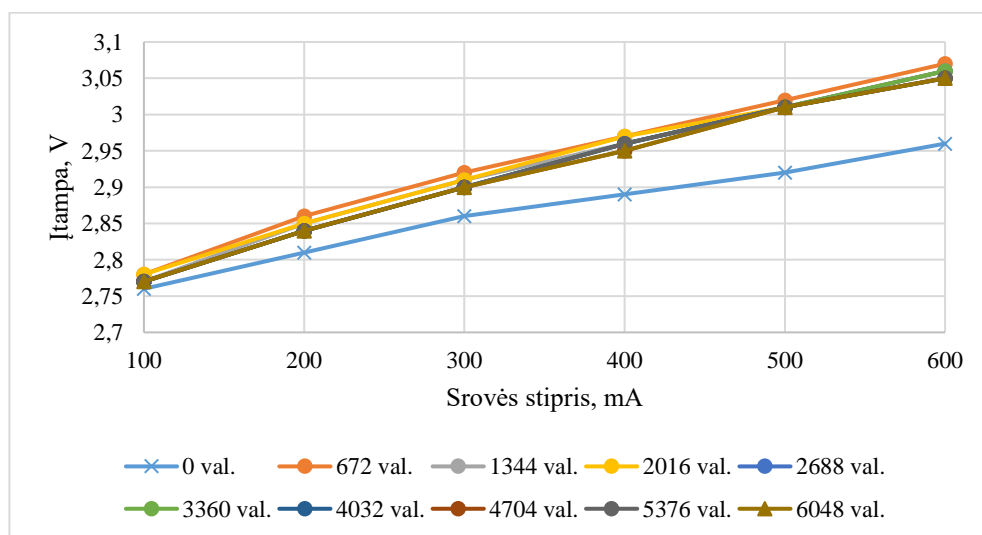
įtakos turi didelis mėlynos ir ciano spalvų šviestukų optinių charakteristikų pokytis priklausomai nuo jų darbo laiko. 2700 K ir 1800 K spalvinės temperatūros atvejais gautas nuokrypis nuo Planko lanko atitinkamai sudaro 0,0005 ir 0,0003, o koreliuotos spalvinės temperatūros pokytis – -8 K ir -3 K. 2700 K baltos spalvos šviesos R_a ir R_9 įverčiai atitinkamai sumažėja po 1 procentinį punktą, o 1800 K atveju gaunamas tik R_9 įverčio sumažėjimas 1 procentiniu punktu. Reikia pažymėti, kad 2700 K ir 1800 K baltos spalvos šviesos atveju nėra gaunamas koordinatinių poslinkis į aukštesnės eilės, nei pirmoji, elipses.

4.3. Voltamperinės charakteristikos

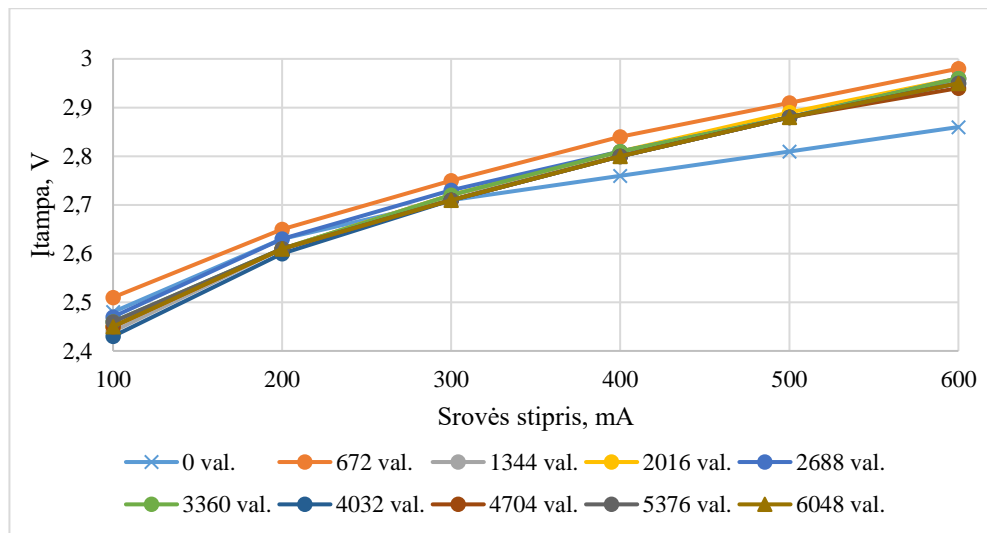
Šviestukų voltamperinių charakteristikų priklausomybės nuo šviestukų darbo laiko pateikiamos 4.42–4.47 pav.



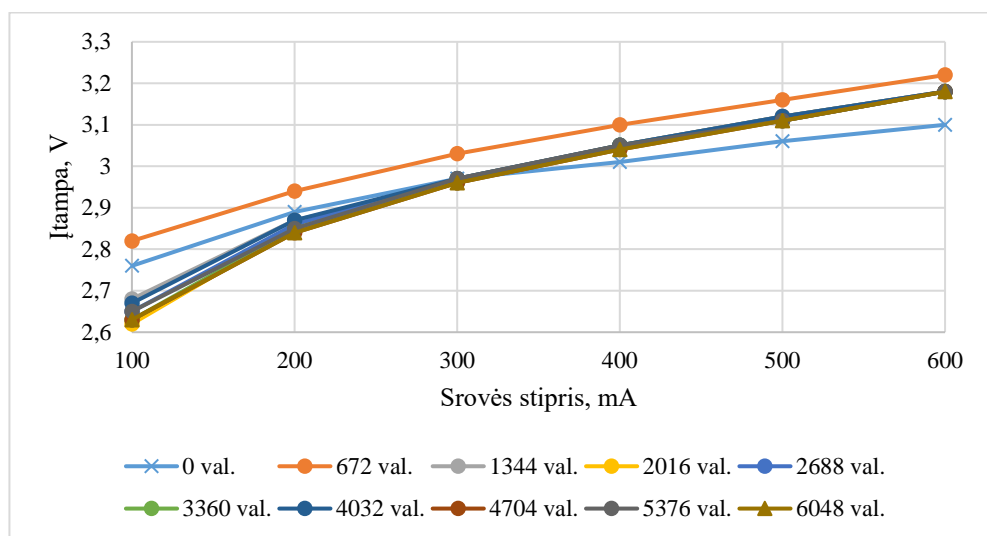
4.42 pav. Gintarinės spalvos šviestukų voltamperinės charakteristikos priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko



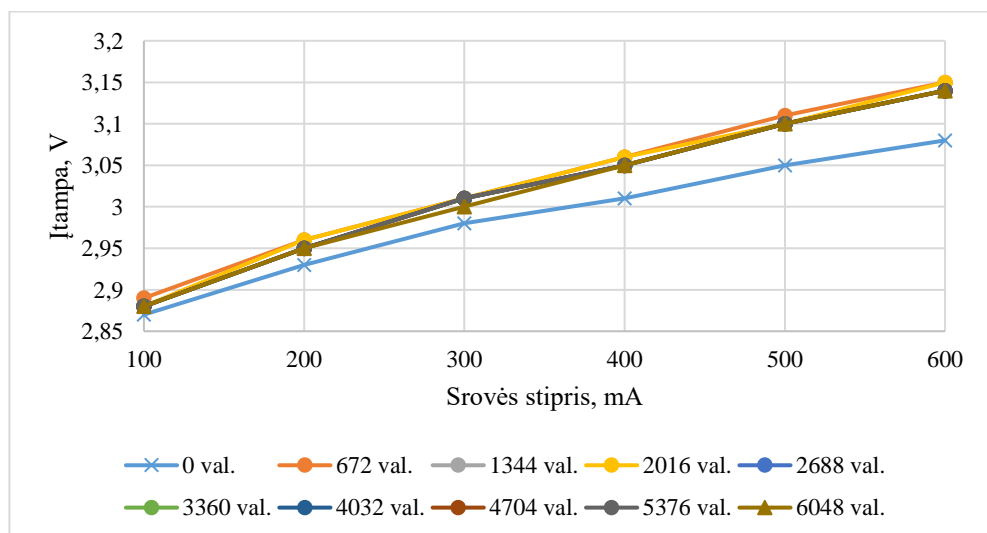
4.43 pav. Citrinų žalios spalvos šviestukų voltamperinės charakteristikos priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko



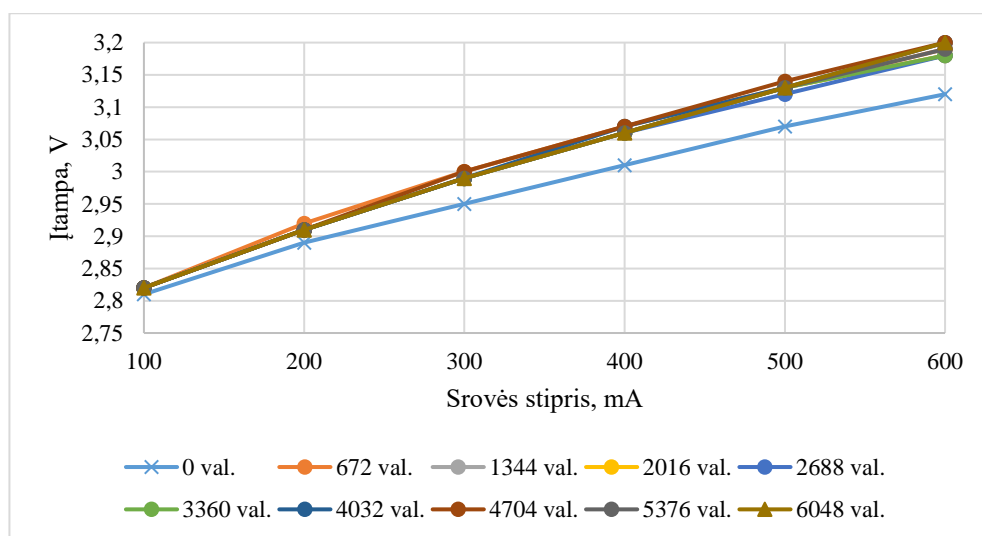
4.44 pav. Ciano spalvos šviestukų voltamperinės charakteristikos priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko



4.45 pav. Mėlynos spalvos šviestukų voltamperinės charakteristikos priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko



4.46 pav. Violetinės I spalvos šviestukų voltamperinės charakteristikos priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko



4.47 pav. Violetinės II spalvos šviestukų voltamperinės charakteristikos priklausomybė nuo šviestukų darbo laiko

Iš gautų šviestukų voltamperinių charakteristikų yra matoma, kad šviestukams senėjant jų voltamperinės charakteristikos kinta. Voltamperinių charakteristikų kitimo pobūdis atitinka teorines žinias ir atliktus voltamperinių charakteristikų modeliavimus, kuomet laikui bėgant puslaidininkinio diodo (šviesos diodo) idealumo rodiklis n didėja (žr. 2.2 pav.) ir gaunamas voltamperinės charakteristikos poslinkis į didesnę pusę pagal įtampos ašį. Ryškus voltamperinės charakteristikos poslinkis, esant visoms srovės stiprio vertėms, stebimas gintarinės, citrinų žalios, violetinės I ir violetinės II spalvų šviestukuose jau pirmomis jų darbo valandomis (0–672 val.). Nuo 672 val. iki 6048 val. diapazone, gintarinės, citrinų žalios, violetinės I ir violetinės II spalvų šviestukų charakteristikų išsidėstymas stabilizuojasi ir kinta nedaug. Išskirtinis atvejis matomas ciano ir mėlynos spalvų šviestukų charakteristikose, kuomet nuo 672 šviestukų darbo valandų, jų voltamperinė charakteristika pasislenka atgal į žemesnę pusę pagal įtampos ašį ir ciano spalvos šviestukuose stabilizuojasi pradiniuose 100–300 mA taškuose, o mėlynos spalvos šviestukuose – 300 mA taške.

Kiekybiniam šviestukų įtampos kryčio pokyčiui įvertinti pasirenkamas 500 mA srovės stiprio taškas; įtampos vertės sunormuojamos pagal šviestukų 0 darbo valandų reikšmes. Gauti rezultatai pateikiami 4.13 lentelėje.

4.13 lentelė. Normuotas šviestukų įtampos kryčio vertės, kai srovės stipris lygus 500 mA

Laikas, val.	0	672	1344	2016	2688	3360	4032	4704	5376	6048
Spalva										
Gintarinė	1	1,024	1,020	1,020	1,020	1,020	1,017	1,017	1,017	1,017
Citrinų žalia	1	1,034	1,031	1,031	1,031	1,031	1,031	1,031	1,031	1,031
Ciano	1	1,036	1,025	1,028	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025
Mėlyna	1	1,033	1,020	1,020	1,020	1,016	1,020	1,016	1,016	1,016
Violetinė I	1	1,020	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016
Violetinė II	1	1,020	1,020	1,020	1,016	1,020	1,020	1,023	1,020	1,020

Atlikus normuotų įtampos kryčio reikšmių, kai srovės stipris lygus 500 mA, vertinimą, galima teigti, kad gintarinės, mėlynos, violetinės II spalvų šviestukų įtampa vidutiniškai padidėjo apie 2 %, citrinų žalios spalvos šviestukų – apie 3 %, ciano spalvos šviestukų apie 2,5–3 %, o violetinės I spalvos šviestukų – apie 1,6 %.

Išvados

1. Nustatyta, kad esant 200 mA srovės stiprio darbo režimui, gintarinės ir citrinų žalios spalvų šviestukų intensyvumo sumažėjimas po 6048 darbo valandų atitinkamai sudaro apie 7 % ir 4 %. Labiausiai tikėtina gintarinės spalvos L_{70} parametro vertė 32256–36960 val., citrinų žalios spalvos šviestukų – daugiau nei 39648 val. Ciano ir mėlynos spalvų šviestukų intensyvumo sumažėjimas atitinkamai siekia apie 26 % ir 36 %. Labiausiai tikėtina L_{70} parametro vertė šių spalvų šviestukams atitinkamai lygi 5376–7392 val. ir 3360–5376 val.
2. Citrinų žalios, ciano ir mėlynos spalvų šviestukų, kai parinktas 500 mA srovės stiprio darbo režimas, intensyvumo sumažėjimas po 6048 darbo valandų atitinkamai sudaro apie 6 %, 7 % ir 15 %. Labiausiai tikėtina citrinų žalios spalvos šviestukų L_{70} parametro vertė yra didesnė nei 39648 val., ciano ir mėlynos spalvų šviestukų atitinkamai daugiau nei 37632 val. ir 14784–16128 val.
3. Nustatyta, kad gintarinės spalvos šviestukų ($I = 200$ mA), violetinės I ir violetinės II spalvų šviestukų ($I = 200$ mA ir $I = 500$ mA) šviesos srauto kitimas turi didėjančią pobūdį. Šviesos srauto pokytis violetinės I spalvos šviestukams atitinkamai siekia apie 15 % ir 19 %.
4. Gauta, kad tiksliausiai mažėjančio pobūdžio eksponentiniu regresiniu modeliu aproksimuojami gintarinės ($I = 200$ mA) ir citrinų žalios ($I = 200$ mA ir $I = 500$ mA) spalvų šviestukų šviesos srauto matavimų duomenys. Determinacijos koeficientas R^2 gintarinės spalvos šviestukų atveju ($I = 200$ mA) lygus 0,6915, o citrinų žalios – 0,5825 ir 0,7484 ($I = 200$ mA ir $I = 500$ mA). Žemiausias įvertis gautas aproksimuojant gintarinės, ciano ir mėlynos spalvų šviestukų šviesos srauto kitimą ($I = 500$ mA), kai R^2 atitinkamai lygus 0,1699, 0,182 ir 0,3763.
5. „T“ testo metodu nustatyta, kad citrinų žalios, ciano, mėlynos, violetinės I ir violetinės II spalvų šviestukų x ir y koordinacių ($I = 200$ mA) „t“ įverčiai yra didesni už kritinę vertę $t_{krit.} = 2,262$ ($\alpha = 0,95$), todėl egzistuoja reikšminis skirtumas tarp pradinių ir galutinių šių koordinacių verčių. Gintarinės spalvos šviestukų x ir y spalvinių koordinacių pokyčio įverčiai yra mažesni (atitinkamai 0,045 ir 0,785) nei nustatyta kritinė vertė, todėl šiuo atveju negalima teigti, kad tarp pradinių ir galutinių x ir y koordinacių verčių yra reikšminis skirtumas.
6. Esant 500 mA srovės stiprio darbo režimui, nustatyta, kad visais atvejais, išskyrus gintarinės spalvos šviestukų y spalvinių koordinacių pokytį ($t_{vert.} = 2,023 < t_{krit.} = 2,262$), egzistuoja reikšminis skirtumas tarp pradinių ir galutinių spalvinių koordinacių reikšmių.
7. Atlikus modeliavimą, nustatyta, kad didžiausias (reikšminis) spalvinės temperatūros pokytis (-264 K) ir poslinkis nuo Planko lanko D_{uv} (0,0018) yra 6500 K baltos spalvos šviesai. Gautas galutinių baltos spalvos šviesos spalvinių koordinacių poslinkis į 3 SCDM elipsę. 2700 K ir 1800 K spalvinės temperatūros baltos spalvos nuokrypis nuo Planko lanko atitinkamai sudaro 0,0005 ir 0,0003, o koreliuotos spalvinės temperatūros pokytis – -8 K ir -3 K. Visais atvejais gautas R_a ir R_9 koeficientų įvertis atitinkamai išliko didesnis nei 95 ir 90.
8. Nustatyta, kad gintarinės, mėlynos, violetinės II spalvų šviestukų įtampa po 6048 val. darbo laiko vidutiniškai padidėjo apie 2 %, citrinų žalios spalvos šviestukų – apie 3 %, ciano spalvos šviestukų apie 2,5–3 %, o violetinės I spalvos šviestukų – apie 1,6 %.

Literatūros sąrašas

1. The Nobel Prize in Physiology or Medicine 2017. Press release, 2017-10-02. [Žiūrėta 2019 m. gegužės 11 d.]. Prieiga per internetą: < <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2017/summary/> >
2. Lucas, et al. Measuring and using light in the melanopsin age. Trends in Neuroscience. Vol. 37(1), p. 1-9. 2014. [Žiūrėta 2019 m. gegužės 11 d.]. Prieiga per internetą: < https://www.researchgate.net/publication/259002854_Measuring_and_using_light_in_the_melanopsin_age >
3. Prayag, et al. Melatonin suppression is exquisitely sensitive to light and primarily driven by melanopsin in humans. Journal of Pineal Research, Vol. 66(4). January, 2019. [Žiūrėta 2019 m. gegužės 11 d.]. Prieiga per internetą: < https://www.researchgate.net/publication/330734849_Melatonin_suppression_is_exquisitely_sensitive_to_light_and_primarily_driven_by_melanopsin_in_humans >
4. CIE Position Statement on Non-Visual Effects of Light - 2nd Edition. LED Professional, Oct 10, 2019. [Žiūrėta 2019 m. gegužės 12 d.]. Prieiga per internetą: < <https://www.led-professional.com/resources-1/standardization/cie-position-statement-on-non-visual-effects-of-light-2nd-edition> >
5. CIE TN 003:2015 Standard. Report on the First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry. International Commission on Illumination, 2013. [Žiūrėta 2019 m. gegužės 12 d.]. Prieiga per internetą: < http://files.cie.co.at/785_CIE_TN_003-2015.pdf >
6. Danauskas, R. Biowlight – Brings Day-light to Life. 2nd International Trends in Lighting Conference & Expo. Sept 25-27, 2018, Bregenz.
7. Kar, Asim. Kar, Anuradha. New generation illumination engineering-an overview of recent trends in science & technology. 2014 First International Conference on Automation, Control, Energy and Systems (ACES). IEEE, 2014. [Žiūrėta 2019 m. gegužės 14 d.]. Prieiga per internetą: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/6807997> >
8. Gimenez, et al. D3.7 REPORT ON METRIC TO QUANTIFY BIOLOGICAL LIGHT EXPOSURE DOSES. SSL-erate Consortium, 2016 [Žiūrėta 2019 m. gegužės 14 d.]. Prieiga per internetą: < <http://lightingforpeople.eu/2016/wp-content/uploads/2016/10/SSL-erate-Report-on-metric-to-quantify-biological-light-exposure-doses.pdf> >
9. Littlefair, P. Ticleanu, C. Lighting for circadian rhythms. Fire and Building Technology Group, Building Research Establishment Ltd. Bretrust, 2019. [Žiūrėta 2020 m. gegužės 21 d.]. Prieiga per internetą: < <https://www.bretrust.org.uk/knowledgehub/wp-content/uploads/sites/20/2019/11/Circadian-Lighting-Trust-report.pdf> >
10. Yeutter, G. R9: More Important Than CRI? Medium, Mar 18, 2018. [Žiūrėta 2020 m. gegužės 21 d.]. Prieiga per internetą: < <https://medium.com/@yeutterg/r9-more-important-than-cri-468f0efc0d58> >
11. Ashdown, I. Thoughts on Color Rendering. ResearchGate, January, 2014. . [Žiūrėta 2020 m. gegužės 21 d.]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/273763307_Thoughts_on_Color_Rendering
12. What is the difference between CRI and Ra? Waveform Lighting. [Žiūrėta 2019 m. gegužės 14 d.]. Prieiga per internetą: < <https://www.waveformlighting.com/tech/what-is-the-difference-between-cri-and-ra> >
13. LED Color Mixing: Basics and Background. Cree, Inc., 2019. [Žiūrėta 2019 m. gegužės 16 d.]. Prieiga per internetą: < https://www.cree.com/led-components/media/documents/LED_color_mixing.pdf >

14. LED apšvietimas - norintiems žinoti daugiau. Ageta, 2019. [Žiūrėta 2019 m. gegužės 17 d.]. Prieiga per internetą: < <http://www.aget.lt/9/led-apsvietimas-norintiems-zinoti-daugiau> >
15. What is LED Binning? Any-Lamp, 2019. [Žiūrėta 2019 m. gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: < <https://www.any-lamp.com/blog/What-is-LED-binning/> >
16. LED Colour Difference Metrics: SDCM & MacAdam Ellipses. Photometric Testing, 2013 [Žiūrėta 2019 m. gegužės 24 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.usailighting.com/stuff/contentmgr/files/1/f386756b8bcf5da65a8d3c26a56b82e7/misc/talkingphotometry_colordifference.pdf>
17. Kumar RoyChoudhury, Asim. Principles of Colour and Appearance Measurement. 25 February, 2014. Prieiga per internetą: < <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/B9780857092298500012?via%3Dihub> >
18. LED and lifetime. Glamox. [Žiūrėta 2019 m. gegužės 25 d.]. Prieiga per internetą: < <https://glamox.com/gmo/led-and-lifetime> >
19. Fan, Jiajie. Mohamed, Moumouni Guero. Qian, Cheng, et al. Color Shift Failure Prediction for Phosphor-Converted White LEDs by Modeling Features of Spectral Power Distribution with a Nonlinear Filter Approach. Materials, 2017. [Žiūrėta 2019 m. rugpjūčio 2 d.]. Prieiga per internetą: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5551862/pdf/materials-10-00819.pdf>>
20. Hammond, Tomas J. LED PRINTBAR AGING COMPENSATION USING V-I SLOPE CHARACTERISTICS. United States Patent Application Publication. US005859658A. Patent Number 5,859,658. Jan. 12, 1999. [Žiūrėta 2019 m. rugsėjo 5 d.]. Prieiga per internetą: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/88/7e/43/a7c3e6734bb466/US5859658.pdf>>
21. Arnold et al. OLED DISPLAY WITH AGING COMPENSATION. United States Patent Application Publication. US 2005/0110420 A1. May 26, 2005. [Žiūrėta 2019 m. rugsėjo 23 d.]. Prieiga per internetą: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/87/78/e7/1f069048cefba0/US6995519.pdf>>
22. Cok, Ronal Steven et al. LED DEVICE COMPENSATION METHOD. European Patent Specification. International application number PCT/US2008/002929. November 09, 2011. [Žiūrėta 2019 m. spalio 1 d.]. Prieiga per internetą: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/1c/7b/f7/54a6f1937ff227/EP2123129B1.pdf>>
23. Tang et al. Real-Time Closed-Loop Color Control of a Multi-Channel Luminaire Using Sensors Onboard a Mobile Device. IEEE Access. September 27, 2018. [Žiūrėta 2019 m. spalio 15 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/327926180_Real-Time_Closed-Loop_Color_Control_of_A_Multi-Channel_Luminaire_Using_Sensors_Onboard_A_Mobile_Device>
24. New multi-channel spectral sensor from ams set to transform the market for mobile color and light measurement. AMS, 2019/01/19. [Žiūrėta 2020 m. vasario 3 d.]. Prieiga per internetą: <<https://ams.com/-/new-multi-channel-spectral-sensor-from-ams-set-to-transform-the-market-for-mobile-color-and-light-measurement>>
25. TCS3400 Color Light-to-Digital Converter. AMS Datasheet, 2017-Oct-10. [Žiūrėta 2020 m. vasario 3 d.]. Prieiga per internetą: <https://ams.com/documents/20143/36005/TCS3400_DS000411_5-00.pdf/5e66e18f-b76c-3245-47a7-1813b423c846>
26. AS7341 11-Channel Spectral Sensor Frontend. AMS Datasheet, 2018-Oct-17. [Žiūrėta 2020 m. vasario 3 d.]. Prieiga per internetą:<https://www.mouser.com/catalog/specsheets/AMS_03152019_AS7341_DS000504_1-00.pdf>

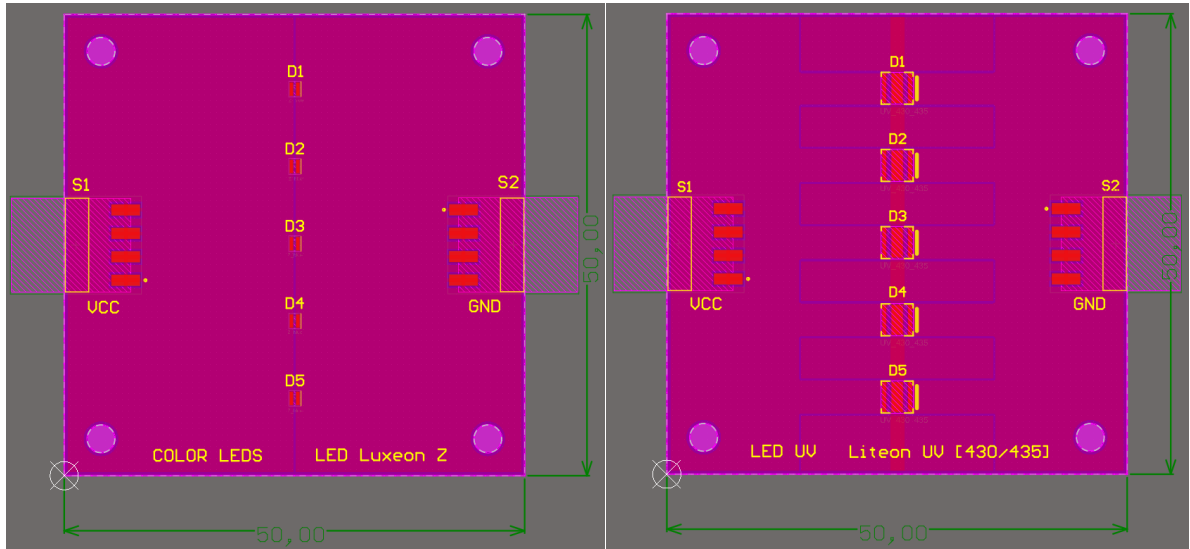
27. Mini-spectrometer C12880MA. Hamamatsu datasheet. [Žiūrėta 2020 m. vasario 6 d.]. Prieiga per internetą: < https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/c12880ma_kacc1226e.pdf >
28. 114991292 - Hamamatsu C12880MA u-Spectrometer, Seed Studio. Distrelec, 2020. [Žiūrėta 2020 m. vasario 15 d.]. Prieiga per internetą: < <https://www.distrelec.lt/lt/hamamatsu-c12880ma-spectrometer-seeed-studio-114991292/p/30118361> >
29. LUXEON Z Color Line Datasheet. Lumileds, 2017. [Žiūrėta 2019 m. rugsėjo 10 d.]. Prieiga per internetą: < <https://www.lumileds.com/uploads/415/DS105-pdf> >
30. Specific Lighting Product Data Sheet LTPL-C034UVH430. Lite-On, August 29, 2017. [Žiūrėta 2019 m. rugsėjo 11 d.]. Prieiga per internetą: < <https://optoelectronics.liteon.com/upload/download/DS23-2016-0024/LTPL-C034UVH430%20DataSheet.PDF> >
31. LUXEON UV U Line Datasheet. Lumileds, 2018. [Žiūrėta 2019 m. rugsėjo 11 d.]. Prieiga per internetą: < <https://www.lumileds.com/uploads/648/DS178-pdf> >
32. Dumbrava, V. Pagodinas, D., Kupčiūnas, I. Initial Investigation into the Energy and Operational Parameters of LED Modules. ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA, ISSN 1392-1215, Vol. 22, No. 3, 2016. [Žiūrėta 2019 m. lapkričio 3 d.]. Prieiga per internetą: < <http://eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/view/13944> >
33. Driel, W.D. Schuld, M et al. Lumen maintenance predictions for LED packages. Microelectronics Reliability, Vol. 62, Pages 39-44. July 2016. [Žiūrėta 2019 m. lapkričio 5 d.]. Prieiga per internetą: < <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S002627141630052X?via%3Dihub> >
34. J. Vigrass, William. Calculation of Semiconductor Failure Rates. Renesas. [Žiūrėta 2019 m. lapkričio 14 d.]. Prieiga per internetą: < <https://www.renesas.com/eu/en/www/doc/support/quality-reliability/reliability/calculation-of-semiconductor-failure-rates.pdf> >
35. Wilcoxon, Ross. Does a 10°C Increase in Temperature Really Reduce the Life of Electronics by Half? Electronics-Cooling, August 18, 2017. [Žiūrėta 2019 m. lapkričio 29 d.]. Prieiga per internetą: < <https://www.electronics-cooling.com/2017/08/10c-increase-temperature-really-reduce-life-electronics-half/> >
36. Solder-Point Temperature Measurement of Cree XLamp LEDs. Application Note. Cree, 2016. [Žiūrėta 2019 m. lapkričio 30 d.]. Prieiga per internetą: < https://www.cree.com/led-components/media/documents/Solder_Point_Temp.pdf >
37. Weber, Rolf. Calculating an LED's Junction Temperature. OSRAM Opto Semiconductors Inc. July 01, 2015. [Žiūrėta 2019 m. gruodžio 2 d.]. Prieiga per internetą: < <http://www.mouser.com/pdfdocs/Calculation%20of%20junction%20temperature.pdf> >
38. Create a forecast in Excel for Windows. Microsoft. [Žiūrėta 2020 m. gegužės 12 d.]. Prieiga per internetą: < https://support.office.com/en-us/article/create-a-forecast-in-excel-for-windows-22c500da-6da7-45e5-bfdc-60a7062329fd#bkmk_calculation >
39. Daitan. Exponential Smoothing Methods for Time Series Forecasting. Medium, Aug 28, 2019. [Žiūrėta 2020 m. gegužės 12 d.]. Prieiga per internetą: < <https://medium.com/better-programming/exponential-smoothing-methods-for-time-series-forecasting-d571005cdf80> >
40. Yang, Yu-Hsiang. Su, Yen-Fu. Chiang, K.-N. Acceleration factor analysis of aging test on gallium nitride (GaN)-based high power light-emitting diode (LED). Conference: 2014 IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). Researchgate, May 2014. [Žiūrėta 2020 m. gegužės 3 d.]. Prieiga per internetą: < https://www.researchgate.net/publication/286421158_Acceleration_factor_analysis_of_aging_test_on_gallium_nitride_GaN-based_high_power_light-emitting_diode_LED >

41. Fralick, D. Zheng, J., et al. The Differences and Similarities Between Two-Sample T-Test and Paired T-Test. Article in Shanghai Archives of Psychiatry *Vol. 29(3)*: p.184-188. Researchgate, June 2017. [Žiūrėta 2020 m. gegužės 6 d.]. Prieiga per internetą: <<https://www.researchgate.net/publication/319728447> The Differences and Similarities Between Two-Sample T-Test and Paired T-Test>
42. Understanding t-Tests: 1-sample, 2-sample, and Paired t-Tests. Minitab Blog, 04 May, 2016. [Žiūrėta 2020 m. gegužės 6 d.]. Prieiga per internetą: <<https://blog.minitab.com/blog/adventures-in-statistics-2/understanding-t-tests-1-sample-2-sample-and-paired-t-tests>>
43. Dougherty, C. STATISTICAL TABLES. Introduction to Econometrics. Oxford University Press, Oxford, 2002. [Žiūrėta 2020 m. gegužės 15 d.]. Prieiga per internetą: <<https://home.ubalt.edu/ntsbarsh/Business-stat/StatisticalTables.pdf>>
44. SPSS TUTORIALS: PAIRED SAMPLES T TEST. Kent State University, Mar 24, 2020. [Žiūrėta 2020 m. gegužės 15 d.]. Prieiga per internetą: <<https://libguides.library.kent.edu/SPSS/PairedSamplestTest>>
45. Ohno, Y. Practical Use and Calculation of CCT and Duv. Leukos, The Journal of the Illuminating Engineering Society, *Volume 10*, 2014, Issue 1. [Žiūrėta 2020 m. gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: <<https://www-tandfonline-com.ezproxy.ktu.edu/doi/full/10.1080/15502724.2014.839020>>
46. Spectis Touch Specifications. GL Optics. [Žiūrėta 2019 m. spalio 19 d.]. Prieiga per internetą: <<https://gloptic.com/products/gl-spectis-1-0-touch/> >
47. RND 320-KA3000 Series User Manual. Reichelt Elektronik. [Žiūrėta 2020 m. gegužės 10 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.reichelt.com/index.html?ACTION=7&LA=3&OPEN=0&INDEX=0&FILENAME=D400%2FRND_320-KA3000.pdf>
48. Temperature & Humidity Test Chamber. MHK Line Specifications. Techry. [Žiūrėta 2019 m. lapkričio 6 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.techry.com.tw/en/product-228455/Temperature-Humidity-Test-Chamber-MHK.html>>

Priedai

1 priedas. Šviestukų moduliai

Šviestukų modulių spausdintinio montažo plokštės brėžiniai „Altium Designer“ projektavimo aplinkoje pateikiami 1 pav.



1 pav. Šviestukų spausdintinio montažo plokščių brėžiniai „Altium Designer“ projektavimo aplinkoje (visų spalvų, išskyrus violetinės II, – kairėje, violetinės II - dešinėje)

2 priedas. Spektrografas „GL Spectis 1.0 Touch“

Šviestukų optinių parametų (spekto) tyrimui naudojamo spektrografo vaizdas pateikiamas 1 pav., o įrenginio parametų specifikacija – 1 lentelėje.



1 pav. Šviestukų spektro tyrimui naudojamas spektrografas „GL Spectis 1.0 Touch“

1 lentelė. Spektrografo „GL Spectis 1.0 Touch“ parametų specifikacija [46]

Spekto diapazonas, nm	Jutiklio tipas	Skyra, nm	Integravimo laikas, s	KAK skyra, bitais	Santykis signalas-triukšmas	x, y koordinatų matavimo neapibrėžtis (reikšmingumo lygmeniui esant 0,95)	Apšvita, W/m ²
340–780	KMOP	~1,7	0,005–100	16	1000:1	0,0015	0,03–600

3 priedas. Laboratorinis maitinimo šaltinis „RND 320-KA3005P“

Laboratorinio maitinimo šaltinio „RND 320-KA3005P“ vaizdas pateikiamas 1 pav., o techninės specifikacijos – 1 lentelėje.



1 pav. Laboratorinis maitinimo šaltinis „RND 320-KA3005P“ (vaizdas iš priekio)

1 lentelė. Laboratorinio maitinimo šaltinio „RND 320-KA3005P“ specifikacija [47]

Įtampos diapazonas, V	Srovės stiprio diapazonas, A	Parinktos vertės tikslumas (25 °C)	Matavimo (atvaizdavimo) skyra
0–30	0–5	Įtampai: $\leq 0,5\% + 20 \text{ mV}$ Srovės stipriui: $\leq 0,5\% + 10 \text{ mA}$	Įtampai: 10 mV Srovės stipriui: 1 mA

4 priedas. Temperatūrinio poveikio kamera „Terchy MHK-225AK“

Temperatūrinio poveikio ir šviestukų senėjimo tyrimui naudojamos temperatūrinės kameros vaizdas pateikiamas 1 pav., o įrenginio parametrų specifikacija – 1 lentelėje.



1 pav. Senėjimo eksperimentui naudojama temperatūrinio poveikio kamera „Terchy MHK-225AK“

1 lentelė. Temperatūrinės kameros „Terchy MHK-225AK“ specifikacija [48]

Temperatūros diapazonas, °C	Santykinės drėgmės diapazonas, %	Temperatūros pastovumas, °C	Temperatūros tolygumas, °C	Šildytuvo galia, kW
-40–150	10–98	± 0,2	± 0,5 (80 °C–100 °C)	2x1,3 kW (oro) 2 kW (drėgmės)

5 priedas. Matavimo duomenų lentelės

Visos tyrimo metu gautos įtampos kryčio, srovės stiprio, x ir y koordinatčių bei šviesos srauto matavimų rezultatų vidutinės reikšmės atitinkamai diskrečiais matavimų atlikimo laiko intervalais. pateikiamos 5 priedo 1–9 lentelėse (įvertinant paspartinimo faktorių, lygų 2).

1 lentelė. Matavimų duomenys po 672 šviestukų darbo valandų

Šviestuko spalva	Vidutinė įtampa, V	Vidutinis srovės stipris, mA	Vidutinė x koordinatė	Vidutinė y koordinatė	Vidutinis šviesos srautas, lm
Gintarinė	2,84	100	0,57947	0,41717	28,703
	2,9	200	0,57851	0,41771	53,924
	2,96	300	0,57771	0,41831	76,376
	3	400	0,57689	0,41893	96,978
	3,04	500	0,57607	0,4194	114,972
	3,07	600	0,57473	0,42027	130,49
Citrinų žalia	2,78	100	0,4085	0,5585	43,551
	2,86	200	0,4081	0,55766	80,499
	2,92	300	0,40799	0,55684	114,959
	2,97	400	0,40824	0,55639	145,208
	3,02	500	0,4086	0,55586	174,871
	3,07	600	0,40905	0,55547	201,135
Ciano	2,51	100	0,09361	0,68733	17,25
	2,65	200	0,08617	0,65005	34,481
	2,75	300	0,08358	0,62621	48,478
	2,84	400	0,08303	0,6091	58,844
	2,91	500	0,08317	0,59576	67,825
	2,98	600	0,0838	0,58508	75,055
Mėlyna	2,82	100	0,09095	0,19422	9,965
	2,94	200	0,10073	0,15632	19,54
	3,03	300	0,10572	0,14073	27,157
	3,1	400	0,10861	0,13251	33,959
	3,16	500	0,1107	0,12756	40,721
	3,22	600	0,11189	0,12429	46,75
Violetinė I	2,89	100	0,16814	0,00636	0,501
	2,96	200	0,16821	0,00633	0,96
	3,01	300	0,1682	0,00653	1,434
	3,06	400	0,16821	0,00662	1,911
	3,11	500	0,16836	0,00684	2,408
	3,15	600	0,16837	0,00701	2,877
Violetinė II	2,82	100	0,16427	0,01099	2,11
	2,92	200	0,16427	0,01116	4,058
	3	300	0,16456	0,01091	5,665
	3,07	400	0,16462	0,01095	7,276
	3,13	500	0,1645	0,01108	8,516
	3,19	600	0,16441	0,01136	9,695

2 lentelė. Matavimų duomenys po 1344 šviestukų darbo valandų

Šviestuko spalva	Vidutinė įtampa, V	Vidutinis srovės stipris, mA	Vidutinė x koordinatė	Vidutinė y koordinatė	Vidutinis šviesos srautas, lm
Gintarinė	2,83	100	0,57864	0,41645	27,892
	2,89	200	0,57783	0,41709	53,526
	2,95	300	0,57694	0,41766	75,719
	2,99	400	0,57613	0,4183	97,509
	3,03	500	0,57523	0,4189	114,408
	3,06	600	0,57416	0,41956	132,314
Citrinų žalia	2,77	100	0,4084	0,55744	43,627
	2,85	200	0,40803	0,55671	80,979
	2,91	300	0,40804	0,5562	114,389
	2,96	400	0,40831	0,55575	145,307
	3,01	500	0,40863	0,55529	172,755
	3,06	600	0,40918	0,55474	201,799
Ciano	2,44	100	0,10294	0,70114	9,899
	2,61	200	0,09084	0,65743	29,534
	2,72	300	0,0874	0,63098	43,968
	2,8	400	0,08616	0,61315	55,451
	2,88	500	0,08567	0,59907	63,054
	2,96	600	0,0858	0,58788	71,899
Mėlyna	2,68	100	0,08498	0,23	5,247
	2,87	200	0,09781	0,17156	15,411
	2,96	300	0,10416	0,15003	23,644
	3,05	400	0,10727	0,13911	30,277
	3,12	500	0,10972	0,13249	36,922
	3,18	600	0,11112	0,12858	43,548
Violetinė I	2,88	100	0,16841	0,00686	0,577
	2,95	200	0,16834	0,00669	1,069
	3,01	300	0,16836	0,00681	1,596
	3,05	400	0,16844	0,00702	2,107
	3,1	500	0,16845	0,00709	2,611
	3,14	600	0,16838	0,00714	3,008
Violetinė II	2,82	100	0,16427	0,01075	1,982
	2,91	200	0,16435	0,01071	3,757
	2,99	300	0,16444	0,01069	5,398
	3,06	400	0,16455	0,01084	7,106
	3,13	500	0,16442	0,01091	8,322
	3,18	600	0,16425	0,01113	9,405

3 lentelė. Matavimų duomenys po 2016 šviestukų darbo valandų

Šviestuko spalva	Vidutinė įtampa, V	Vidutinis srovės stipris, mA	Vidutinė x koordinatė	Vidutinė y koordinatė	Vidutinis šviesos srautas, lm
Gintarinė	2,84	100	0,5798	0,41694	27,906
	2,9	200	0,57882	0,41748	54,095
	2,95	300	0,57809	0,41811	76,646
	3	400	0,57714	0,41868	97,694
	3,03	500	0,57607	0,41939	113,568
	3,07	600	0,5749	0,42006	131,378
Citrinų žalia	2,78	100	0,40853	0,55805	42,981
	2,85	200	0,40813	0,55727	79,263
	2,91	300	0,40819	0,55679	114,079
	2,97	400	0,40839	0,55631	144,528
	3,01	500	0,40875	0,55581	173,397
	3,06	600	0,40926	0,55533	202,09
Ciano	2,45	100	0,10017	0,70738	9,818
	2,61	200	0,08797	0,66126	29,098
	2,72	300	0,08434	0,63438	43,225
	2,81	400	0,08321	0,61575	55,666
	2,89	500	0,0832	0,60106	66,033
	2,96	600	0,0835	0,58969	74,521
Mėlyna	2,62	100	0,07944	0,2479	3,357
	2,85	200	0,0948	0,17605	13,406
	2,97	300	0,1016	0,15148	21,764
	3,05	400	0,10542	0,13953	29,05
	3,12	500	0,10811	0,13254	35,747
	3,18	600	0,10991	0,12824	42,26
Violetinė I	2,88	100	0,16741	0,00496	0,43
	2,96	200	0,16744	0,00513	0,848
	3,01	300	0,16735	0,00499	1,198
	3,06	400	0,16764	0,00548	1,733
	3,1	500	0,16785	0,00593	2,252
	3,15	600	0,16791	0,00627	2,738
Violetinė II	2,82	100	0,16399	0,01028	2,006
	2,91	200	0,16412	0,01023	3,735
	2,99	300	0,16426	0,01029	5,37
	3,06	400	0,16433	0,01048	6,917
	3,13	500	0,16431	0,01072	8,294
	3,18	600	0,16413	0,01096	9,377

4 lentelė. Matavimų duomenys po 2688 šviestukų darbo valandų

Šviestuko spalva	Vidutinė įtampa, V	Vidutinis srovės stipris, mA	Vidutinė x koordinatė	Vidutinė y koordinatė	Vidutinis šviesos srautas, lm
Gintarinė	2,83	100	0,57902	0,41737	28,599
	2,89	200	0,57812	0,41784	53,576
	2,95	300	0,57729	0,41843	77,166
	2,99	400	0,57639	0,41906	97,066
	3,03	500	0,57548	0,41963	116,022
	3,06	600	0,57449	0,4202	132,268
Citrinų žalia	2,77	100	0,40864	0,55776	42,951
	2,84	200	0,40831	0,55696	80,716
	2,9	300	0,4084	0,55644	115,213
	2,96	400	0,40863	0,55591	145,885
	3,01	500	0,40897	0,55542	174,735
	3,06	600	0,40946	0,55488	202,975
Čiano	2,47	100	0,09757	0,69384	14,451
	2,63	200	0,08833	0,65483	32,606
	2,73	300	0,08563	0,62999	47,05
	2,81	400	0,08467	0,61283	57,75
	2,88	500	0,08487	0,59902	68,588
	2,96	600	0,08523	0,58806	76,671
Mėlyna	2,65	100	0,08326	0,23811	4,163
	2,86	200	0,09698	0,1747	14,211
	2,97	300	0,10314	0,15191	22,434
	3,05	400	0,10681	0,14068	28,907
	3,12	500	0,10914	0,13396	36,145
	3,18	600	0,11085	0,12976	43,042
Violetinė I	2,88	100	0,16885	0,00746	0,578
	2,95	200	0,1689	0,00768	1,152
	3,01	300	0,16904	0,008	1,73
	3,05	400	0,16901	0,00796	2,22
	3,1	500	0,16883	0,00775	2,683
	3,14	600	0,16884	0,00791	3,188
Violetinė II	2,82	100	0,16466	0,01156	2,262
	2,91	200	0,16488	0,01178	4,351
	2,99	300	0,16478	0,01141	6,005
	3,06	400	0,1648	0,01142	7,706
	3,12	500	0,16465	0,01155	9,019
	3,18	600	0,16451	0,01178	10,117

5 lentelė. Matavimų duomenys po 3360 šviestukų darbo valandų

Šviestuko spalva	Vidutinė įtampa, V	Vidutinis srovės stipris, mA	Vidutinė x koordinatė	Vidutinė y koordinatė	Vidutinis šviesos srautas, lm
Gintarinė	2,83	100	0,57797	0,41718	28,386
	2,89	200	0,5771	0,41773	53,899
	2,95	300	0,57637	0,41834	76,512
	2,99	400	0,57541	0,41887	95,324
	3,03	500	0,57455	0,41951	115,186
	3,06	600	0,57341	0,42003	131,770
Citrinų žalia	2,77	100	0,40841	0,55706	42,616
	2,84	200	0,40808	0,55637	79,883
	2,9	300	0,40815	0,55587	111,852
	2,96	400	0,40837	0,55535	144,687
	3,01	500	0,40872	0,55483	171,286
	3,06	600	0,40917	0,55442	198,596
Ciano	2,46	100	0,10263	0,69637	11,692
	2,61	200	0,09154	0,65395	30,726
	2,72	300	0,08853	0,62797	45,6
	2,81	400	0,08753	0,61017	56,938
	2,88	500	0,08745	0,59662	66,514
	2,96	600	0,08742	0,58594	75,1
Mėlyna	2,63	100	0,08216	0,25327	2,817
	2,85	200	0,09761	0,17855	13,391
	2,96	300	0,10393	0,15402	21,652
	3,05	400	0,10743	0,14218	28,925
	3,11	500	0,10979	0,13529	36,186
	3,18	600	0,11162	0,13098	42,802
Violetinė I	2,88	100	0,16946	0,00859	0,68
	2,95	200	0,16945	0,00869	1,292
	3,01	300	0,16957	0,00898	1,917
	3,05	400	0,16952	0,00886	2,457
	3,1	500	0,16935	0,00866	2,969
	3,14	600	0,16932	0,0087	3,365
Violetinė II	2,82	100	0,16502	0,01221	2,361
	2,91	200	0,1652	0,01218	4,44
	2,99	300	0,16507	0,01182	6,153
	3,06	400	0,16495	0,01168	7,749
	3,13	500	0,16486	0,01182	9,173
	3,18	600	0,16461	0,01194	10,176

6 lentelė. Matavimų duomenys po 4032 šviestukų darbo valandų

Šviestuko spalva	Vidutinė įtampa, V	Vidutinis srovės stipris, mA	Vidutinė x koordinatė	Vidutinė y koordinatė	Vidutinis šviesos srautas, lm
Gintarinė	2,83	100	0,57897	0,41752	27,738
	2,89	200	0,578	0,41798	52,556
	2,94	300	0,57719	0,41853	73,465
	2,98	400	0,57628	0,41906	95,316
	3,02	500	0,57528	0,41963	113,476
	3,06	600	0,57429	0,42024	128,296
Citrinų žalia	2,77	100	0,40897	0,55762	42,374
	2,84	200	0,40855	0,5568	79,796
	2,9	300	0,40859	0,55622	113,851
	2,96	400	0,40883	0,55576	140,846
	3,01	500	0,40918	0,55527	170,144
	3,05	600	0,40959	0,55474	199,372
Ciano	2,43	100	0,10476	0,70492	9,117
	2,6	200	0,09201	0,65973	28,441
	2,71	300	0,08821	0,6329	42,923
	2,8	400	0,08716	0,61462	54,227
	2,88	500	0,08665	0,60061	64,913
	2,95	600	0,08686	0,5891	73,812
Mėlyna	2,67	100	0,08556	0,23036	5,089
	2,87	200	0,09821	0,17263	15,363
	2,97	300	0,10409	0,151	23,526
	3,05	400	0,10733	0,13991	30,569
	3,12	500	0,10992	0,13386	37,694
	3,18	600	0,1116	0,13	44,14
Violetinė I	2,88	100	0,16927	0,00831	0,658
	2,95	200	0,16927	0,00821	1,239
	3,01	300	0,16933	0,00849	1,84
	3,05	400	0,16944	0,00868	2,349
	3,1	500	0,16947	0,00875	2,907
	3,14	600	0,16913	0,0084	3,473
Violetinė II	2,82	100	0,165	0,01207	2,354
	2,91	200	0,16506	0,01201	4,438
	2,99	300	0,16499	0,01173	6,233
	3,07	400	0,16496	0,01169	7,9
	3,13	500	0,16473	0,0116	9,236
	3,2	600	0,16465	0,01193	10,21

7 lentelė. Matavimų duomenys po 4704 šviestukų darbo valandų

Šviestuko spalva	Vidutinė įtampa, V	Vidutinis srovės stipris, mA	Vidutinė x koordinatė	Vidutinė y koordinatė	Vidutinis šviesos srautas, lm
Gintarinė	2,82	100	0,57851	0,4172	27,919
	2,89	200	0,57763	0,4177	52,626
	2,94	300	0,57682	0,4183	75,026
	2,98	400	0,57598	0,41883	95,269
	3,02	500	0,57505	0,41946	113,418
	3,06	600	0,57404	0,42004	129,960
Citrinų žalia	2,77	100	0,40911	0,55744	42,596
	2,84	200	0,40877	0,55669	79,389
	2,9	300	0,40886	0,55617	111,28
	2,95	400	0,40908	0,5557	142,412
	3,01	500	0,40946	0,55518	170,033
	3,05	600	0,40996	0,55463	194,748
Ciano	2,45	100	0,10163	0,69951	10,902
	2,61	200	0,09115	0,65825	27,879
	2,71	300	0,08794	0,63295	43,651
	2,8	400	0,08672	0,6152	54,677
	2,88	500	0,08663	0,60108	64,09
	2,94	600	0,0868	0,58985	70,317
Mėlyna	2,63	100	0,08259	0,24411	3,562
	2,84	200	0,0968	0,17747	13,93
	2,96	300	0,10346	0,15456	19,652
	3,04	400	0,1071	0,14253	29,535
	3,11	500	0,10949	0,13572	35,686
	3,18	600	0,11121	0,13151	42,228
Violetinė I	2,88	100	0,16955	0,00884	0,657
	2,95	200	0,17002	0,00963	1,482
	3,01	300	0,17007	0,00976	2,113
	3,05	400	0,16991	0,00959	2,675
	3,1	500	0,16961	0,00922	3,166
	3,14	600	0,16955	0,00909	3,738
Violetinė II	2,82	100	0,16535	0,01282	2,468
	2,91	200	0,16551	0,0128	4,62
	3	300	0,16554	0,01268	6,499
	3,07	400	0,16539	0,01254	8,179
	3,14	500	0,16518	0,01243	9,519
	3,2	600	0,16492	0,01249	10,577

8 lentelė. Matavimų duomenys po 5376 šviestukų darbo valandų

Šviestuko spalva	Vidutinė įtampa, V	Vidutinis srovės stipris, mA	Vidutinė x koordinatė	Vidutinė y koordinatė	Vidutinis šviesos srautas, lm
Gintarinė	2,82	100	0,57878	0,41719	28,143
	2,89	200	0,5779	0,41771	52,565
	2,94	300	0,5772	0,41828	74,768
	2,98	400	0,57633	0,41886	95,738
	3,02	500	0,57533	0,41949	114,930
	3,06	600	0,57433	0,4201	131,238
Citrinų žalia	2,77	100	0,40902	0,55757	42,488
	2,84	200	0,40865	0,55688	78,56
	2,9	300	0,40875	0,55629	112,472
	2,96	400	0,40901	0,55579	142,54
	3,01	500	0,40934	0,55525	171,741
	3,05	600	0,40985	0,55478	199,362
Ciano	2,46	100	0,10145	0,69646	12,508
	2,61	200	0,09096	0,65669	30,802
	2,71	300	0,08804	0,63146	44,878
	2,8	400	0,08696	0,61368	56,834
	2,88	500	0,08687	0,59957	66,319
	2,95	600	0,08695	0,58869	75,491
Mėlyna	2,65	100	0,0842	0,23741	4,408
	2,85	200	0,09744	0,17554	14,52
	2,97	300	0,10363	0,15298	23,125
	3,05	400	0,10727	0,14178	30,498
	3,11	500	0,10966	0,13509	37,617
	3,18	600	0,11131	0,13108	43,697
Violetinė I	2,88	100	0,16944	0,00863	0,728
	2,95	200	0,16958	0,00905	1,451
	3,01	300	0,16947	0,00887	1,948
	3,05	400	0,1694	0,00874	2,584
	3,1	500	0,16929	0,00865	3,076
	3,14	600	0,16914	0,00846	3,467
Violetinė II	2,82	100	0,16497	0,01219	2,298
	2,91	200	0,16513	0,01222	4,317
	2,99	300	0,16509	0,01207	6,056
	3,06	400	0,16501	0,01196	7,66
	3,13	500	0,16496	0,01207	9,077
	3,19	600	0,16486	0,01233	10,276

9 lentelė. Matavimų duomenys po 6048 šviestukų darbo valandų

Šviestuko spalva	Vidutinė įtampa, V	Vidutinis srovės stipris, mA	Vidutinė x koordinatė	Vidutinė y koordinatė	Vidutinis šviesos srautas, lm
Gintarinė	2,82	100	0,57879	0,41727	28,303
	2,88	200	0,57794	0,41778	52,508
	2,94	300	0,57708	0,41827	76,084
	2,98	400	0,57624	0,41884	94,681
	3,02	500	0,57536	0,41939	114,185
	3,06	600	0,57440	0,42000	129,036
Citrinų žalia	2,77	100	0,40918	0,55756	41,861
	2,84	200	0,40876	0,55675	77,7
	2,9	300	0,40886	0,55618	108,439
	2,95	400	0,40901	0,55559	138,42
	3,01	500	0,40942	0,55509	165,419
	3,05	600	0,40989	0,55458	192,593
Ciano	2,45	100	0,10165	0,69888	11,582
	2,61	200	0,09101	0,65757	29,92
	2,71	300	0,08768	0,63187	44,339
	2,8	400	0,08663	0,61398	55,126
	2,88	500	0,08672	0,59994	66,319
	2,95	600	0,08665	0,58909	74,129
Mėlyna	2,63	100	0,08234	0,24655	3,39
	2,84	200	0,09701	0,17841	13,653
	2,96	300	0,10332	0,15447	22,43
	3,04	400	0,10669	0,14269	29,661
	3,11	500	0,10922	0,13576	36,418
	3,18	600	0,11083	0,13151	43,856
Violetinė I	2,88	100	0,16892	0,00789	0,628
	2,95	200	0,16899	0,00794	1,209
	3	300	0,16908	0,00804	1,792
	3,05	400	0,16893	0,00798	2,294
	3,1	500	0,16912	0,00836	2,92
	3,14	600	0,16907	0,00836	3,406
Violetinė II	2,82	100	0,16482	0,01206	2,257
	2,91	200	0,16495	0,01204	4,212
	2,99	300	0,16505	0,01206	5,98
	3,06	400	0,16498	0,01192	7,848
	3,13	500	0,16492	0,01209	9,018
	3,2	600	0,16474	0,01217	10,113