



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Tomas Piščikas

**VALDOMŲ PARAMETRŲ ŠVIESOS DIODŲ APŠVIETIMO
SISTEMOS KŪRIMAS IR TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. dr. Alvydas Dosinas

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**VALDOMŲ PARAMETRŲ ŠVIESOS DIODŲ APŠVIETIMO
SISTEMOS KŪRIMAS IR TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos inžinerija (kodas 621H63003)

Vadovas

Prof. dr. Alvydas Dosinas
2017.06.01

Recenzentas

Doc. Dr. Robertas Lukočius

Projektą atliko

Tomas Piščikas
2017.06.01

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Tomas Piščikas

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija, 621H63003

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Valdomų parametrų šviesos diodų apšvietimo sistemos kūrimas ir tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. birželio 1 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Tomo Piščiko** baigiamasis projektas tema „Valdomų parametrų šviesos diodų apšvietimo sistemos kūrimas ir tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Piščikas, Tomas. Valdomų parametų šviesos diodų apšvietimo sistemos kūrimas ir tyrimas. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Alvydas Dosinas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: *šviesos diodas, maitinimo šaltinis, srovė, įtampa, šviesa.*

Kaunas, 2017. 63 p.

SANTRAUKA

Šio darbo tikslas yra naudojant skirtingų spalvinių temperatūrų baltos šviesos ir spalvinius šviesos diodus, sukurti ir ištirti apšvietimo sistemą, galinčią keisti šviesinius sistemos parametrus. Norint šį tikslą įgyvendinti, reikia išspręsti tokius uždavinius.

Pirmuose dviejuose darbo skyriuose atlikta literatūros apžvalga. Išsiaiškinti pagrindiniai šviesos diodų parametrai ir charakteristikos.

Trečiajame darbo skyriuje pateiktas šviesos diodų spalvų modeliavimas, projektuojamai sistemai parinkti šilti ir šalti baltos šviesos, raudonos ir gelsvai žalsvos šviesos diodai.

Sudarytos valdomų parametų apšvietimo sistemos struktūros sudedamosios dalys tiriamos ir modeliuojamos ketvirtame, penktame ir šeštame skyriuose. Sudarytas signalo valdymo ir apdorojimo algoritmas, sukurta valdiklio programa, skirta valdyti apšvietimo sistemą nuotoliniu būdu. Sukurtos valdymo išmaniuoju telefonu programos „Android“ ir „iOS“ operacinėms sistemoms. Sukurti skirtingų galingumų įtampą žeminantys maitinimo šaltiniai. Naudojant programinę įrangą „MicroCap 10“, buvo modeliuojamos ir tiriamos šviesos diodų maitinimo šaltinių srovės, tranzistoriaus valdymo ir kitos charakteristikos.

Septintasis skyrius pašvęstas šviesos diodų apšvietimo sistemos realizavimui ir eksperimentiniams tyrimams. Naudojantis programine įranga „CADSOFT Eagle 8.1.0“ sumodeliuotos ir sukurtos maitinimo šaltinių ir šviesos diodų spausdinto montažo plokštės. Atlikti eksperimentiniai apšvietimo sistemos tyrimai. Naudojantis fotometriniu integravimo sfera ir programine įranga „Everfine“ išmatuoti šviesiniai apšvietimo sistemos parametrai. Darbas apibendrintas išvadamis.

Piščikas, Tomas. Design And Investigation Of LED Lighting System With Controlled Lighting Parameters: *Master's thesis in title qualification degree / supervisor assoc. prof. Alvydas Dosinas. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electric Power System*

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: LED, power converter, current, voltage, light.

Kaunas, 2017. 63 p.

SUMMARY

The aim of this work is using different color temperatures white light and color LEDs, design and investigate LED lighting system, which can control lighting parameters. In order to implement this objective, it is necessary to solve such problems.

The first two chapters of the work carried out a literature review. There was found out the general LED parameters and characteristics.

In the third chapter there is LED color modeling, for designed system selected warm and cold white light, red, lime green LEDs.

There was made a structure of controlled lighting system components, which was investigated and modeled on the fourth, fifth and sixth sections. Also there was made control signals formation and processing algorithm, developed control program for managing the lighting system remotely. Also developed management smartphone application for Android and iOS operating systems. Developed different power Buck converters. Using software "MicroCap 10" was modeled and tested current control of converter, transistor's and other characteristics of Buck converter.

The seventh chapter consecrated in LED lighting system realization and experimental research. Using the software "CADSOFT Eagle 8.1.0" modeled and designed power supplies and LED printed circuit board. There was made the experimental researches of controlled parameters LED lighting system. Using photometric integrating sphere and software "Everfine" measured the lighting system parameters. Work generalized conclusions.

Turinys

ĮVADAS	7
1 ŽMOGAUS POJŪTIS Į ŠVIESĄ	8
1.1 Žmogaus akies šviesos receptoriai	8
1.2 Paros cirkadinis ritmas	9
2 ŠVIESOS DIODŲ CHARAKTERISTIKOS	11
2.1 Spalvinės temperatūros charakteristikos	11
2.2 Spalvų maišymas	12
2.3 Spalvų perteikimas	14
2.4 Baltos šviesos gavimo būdai	15
3 KOMPIUTERINIS SPALVŲ MAIŠYMO ŠVIESTUVE MODELIAVIMAS	18
4 ŠIUOLAIKINIŲ ŠVIESOS DIODŲ ŠVIESTUVAI	28
5 VALDOMŲ PARAMETRŲ APŠVIETIMO SISTEMA	30
5.1 Izoliuotas nuolatinės įtampos maitinimo šaltinis	31
5.2 Įtampą žeminančių maitinimo šaltinių sudarymas	33
5.3 Šviestuvo valdymas	37
5.4 Valdymo signalo formavimas ir apdorojimas	39
6 KOMPIUTERINIS MODELIAVIMAS	42
6.1 Įtampą žeminančio maitinimo šaltinio modeliavimas	42
6.2 Impulso pločio moduliacijos signalo keitiklio į nuolatinę įtampą modeliavimas	44
7 EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI	47
7.1 Įtampą žeminančių maitinimo šaltinių tyrimas	47
7.2 Impulso pločio signalo keitiklio į nuolatinės įtampos lygį eksperimentinis tyrimas	50
7.3 Spausdinto montažo plokščių projektavimas ir tyrimas	55
7.3.1 Įtampą žeminančių maitinimo šaltinių plokštė	55
7.3.2 Šviesos diodų plokštelės	56
7.4 Apšvietimo sistemos spalvų maišymo tyrimas	57
IŠVADOS	61
NAUDOTOS LITERATŪROS IR KITŲ INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS	62
PRIEDAS 1. SIGNALO FORMAVIMO IR APDOROJIMO PROGRAMOS KODAS, SKIRTAS IŠMANIESIEMS ĮRENGINIAMS, TURINTIEMS „ANDROID“ OPERACINĘ SISTEMĄ	64
PRIEDAS 2. SIGNALO FORMAVIMO IR APDOROJIMO PROGRAMOS KODAS SKIRTAS, IŠMANIESIEMS ĮRENGINIAMS, TURINTIEMS „IOS“ OPERACINĘ SISTEMĄ ..	65
.....	65
PRIEDAS 3. APŠVIETIMO SISTEMOS SPALVŲ MAIŠYMO TYRIMO REZULTATAI	66

ĮVADAS

Šviesos diodų (angl. *LED – Light Emitting Diode*) apšvietimas suteikia daug privalumų ir funkcijų, kurias buvo sunku ar net neįmanoma išgauti su kitomis apšvietimo technologijomis. Viena iš pagrindinių ypatybių tai, kad šviesos diodų suteikiamas spalvinių temperatūrų diapazonas bei spektras yra labai platus.

Mums yra įprasta, kad šviesos diodai šviečia vienos spalvos šviesa, tačiau yra būdų gauti aukštų spalvinių parametrų kokybišką dirbtiną šviesą. Paprasčiausiai tai pasiekama kombinuojant kelių spalvų diodus viename šviestuve, kurie pagerina šviesines savybes: keičia spalvinę temperatūrą, šviesos spektrą, spalvų perteikimą ir pan. Todėl tobulėjant elektronikai, nesunku suprojektuoti kompaktiškus maitinimo šaltinius, skirtus apšvietimo sistemai maitinti. Taip pat pritaikius nuotolinio valdymo principus, galima reguliuoti apšvietimo spalvinius parametrus ir taip apšvietimą pritaikyti pagal paros cirkadinį ritmą - dienos metu galima išgauti apšvietimą, turintį daugiau mėlynos šviesos, kuris yra artimas natūraliam dienos šviesos apšvietimui, o vakare - šiltesnį, turintį daugiau raudonos šviesos, apšvietimą. Daugelyje apšvietimo sistemų, kurias galima įsigyti, naudojama raudoni, žali ir mėlyni (angl. *RGB – Red Green Blue*) šviesos diodai, kurių apšvietimo spektras nėra tolygus ir netiesiogiai kenkia žmogaus savijautai ir paros cirkadiniam ritmui.

Tyrimo problemos aktualumas: darbe aktualu ištirti ir pagrįsti, kaip išgauti valdomų parametrų baltos šviesos apšvietimą, maišant baltos šviesos ir spalvinius šviesos diodus.

Tyrimo objektas – valdomų parametrų šviesos diodų apšvietimo sistema.

Darbo tikslas - naudojant skirtingų spalvinių temperatūrų baltos šviesos ir spalvinius šviesos diodus, sukurti ir ištirti apšvietimo sistemą, galinčią keisti šviesinius sistemos parametrus ir praplėsti apšvietimo sistemos galimybes.

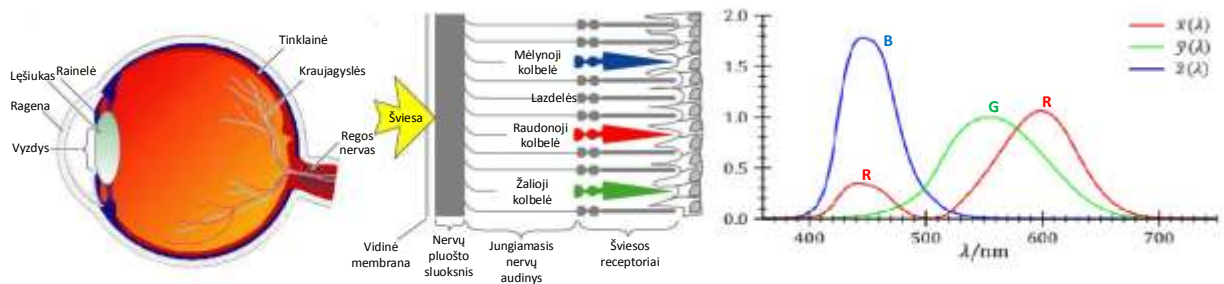
Pagrindiniai uždaviniai:

- atlikti literatūros apžvalgą;
- remiantis kompiuteriniu modeliavimu, išanalizuoti ir parinkti tyrimui šviesos diodus;
- sudaryti struktūrinę schemą, išanalizuoti jos sudedamąsias dalis, bei atlikti sistemos analitinius skaičiavimus;
- sudaryti signalo apdorojimo algoritmą ir sukurti sistemos nuotolinio valdymo principus;
- patikrinti sistemos veikimą atliekant modeliavimą;
- sukurti sistemą;
- atlikti eksperimentinius sistemos tyrimus.

1 ŽMOGAUS POJŪTIS Į ŠVIESĄ

1.1 Žmogaus akies šviesos receptoriai

Žmogaus akis yra vienas iš specializuotų jutimo organų, todėl akis yra pagrindinis šviesos diodų spinduliuojamo spektro matymo receptorių. Toliau aptariamos žmogaus matymo bei akies charakteristikos, kurios yra susijusios su žmogaus akių jautrumu. Akies pjūvis ir vaizdo formavimo mechanizmas parodytas 1.1.1 paveiksle [1].



1.1.1 pav. Žmogaus akies skerspjūvis, tinklainės scheminis vaizdas įskaitant strypinius ir kūginius šviesos receptorių, bei spalvų spektrai [2]

Akis yra dažniausiai sferinė, o jos diametras yra apie 2,5 cm. Ji yra įsukta į 3 sluoksnius: odeną, - išorinį, kurio svarbiausia dalis yra permatoma rageną, vidurinį sluoksnį – gyslainę ir vidinį sluoksnį – tinklainę.

Akies raumenys valdo ne tik lęšiuko formą, kuri nulemia jo židinio nuotolį, bet ir vyzdžio dydį, reguliuojant bendrą šviesos, patenkančios į akį, kiekį. Akies lęšiukas formuoja invertuotą objekto erdvės vaizdą ant tinklainės. Šis vaizdas yra priimamas tinklainėje esančių receptorių. Akies receptoriai yra dviejų rūšių – lazdelės ir kolbelės. Kiekvieni šių receptorių reaguoja į skirtingas funkcijas. Lazdelės yra labiau jautrios šviesai nei kolbelės, kurios yra trumpos ir storos. Esant mažam apšvietimui, matymo sistemos reakciją nulemia lazdelės. Taigi, jos sąlygoja naktinį matymą. Be to, lazdelių išsisklaidymas didesnėje tinklainės srityje lemia tai, kad jos sąlygoja bendrąjį vaizdą akies matymo lauke. Antrojo tipo receptoriai (kolbelės) funkcionuoja esant dideliame apšvietimui, jų reakcija į šviesą nulemia dienos matymą, kai yra išskiriamos ir spalvos.

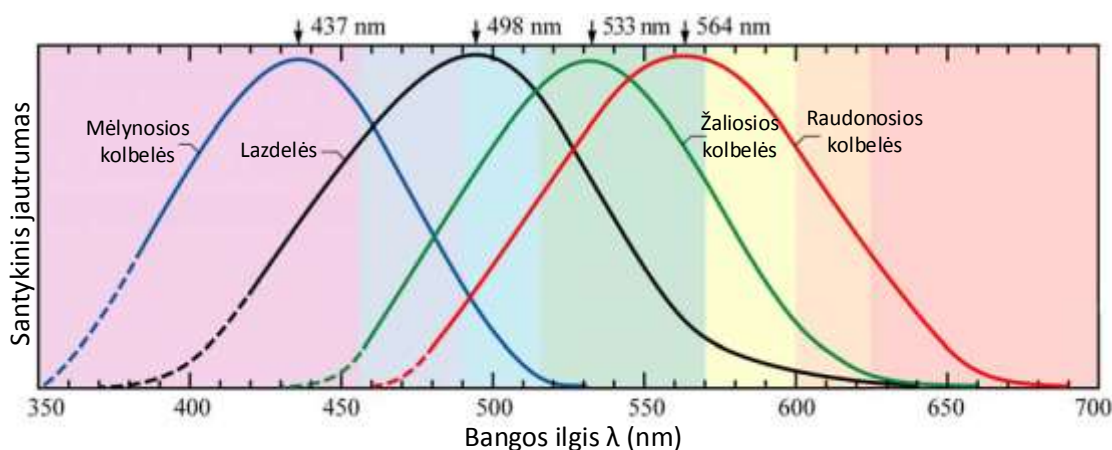
Lazdelių, pasiskirsčiusių tinklainėje skaičius yra nuo 75 iki 100 milijonų, bet kadangi jos nervo gale yra sujungtos į grupes, tai jų erdvinė skiriamoji geba yra žymiai mažesnė.

Kaip jau buvo minėta, su kolbelėm susijęs ir spalvų išskyrimas. Šių receptorių akyje yra apie 6-7 milijonus ir kiekvienas jų prijungtas prie atskiro nervo galo, todėl skiriamoji geba yra žymiai didesnė negu lazdelių.

Regimojo nervo išėjimo aplinkoje nėra nei lazdelių, nei kolbelių – tai akloji akies dėmė.

Kai šviesa sužadina lazdelę ar kolbelę, atsiranda fotocheminis pereinamasis procesas, kurio rezultate yra suformuojamas nervo impulsas. Tačiau šio mechanizmo pilnai dar nepavyko ištyrinėti ir išaiškinti.

Regimasis nervas turi apie 100 000 skaidulų, o pačioje tinklainėje, kaip jau buvo minėta yra virš 100 milijonų receptorių. 1.1.2 pav., a, parodyta akies receptorių struktūra ir skirtingų kolbelių jautrumas šviesos spalvoms (žr. 1.1.2 pav., b). Kaip matyti, „mėlynųjų“ (B) kolbelių jautrumas yra beveik du kartus didesnis, negu „žaliųjų“ (G) ir „raudonųjų“ (R). Be to, pastarosios pasižymi dar tuo, kad reaguoja ne tik į raudoną, bet šiek tiek ir į mėlyną šviesą [1].



2.1.2 pav. Žmogaus akies tinklainėje esančių strypinių ir kūginių ląstelių normalizuotas spektrinis jautrumas [1]

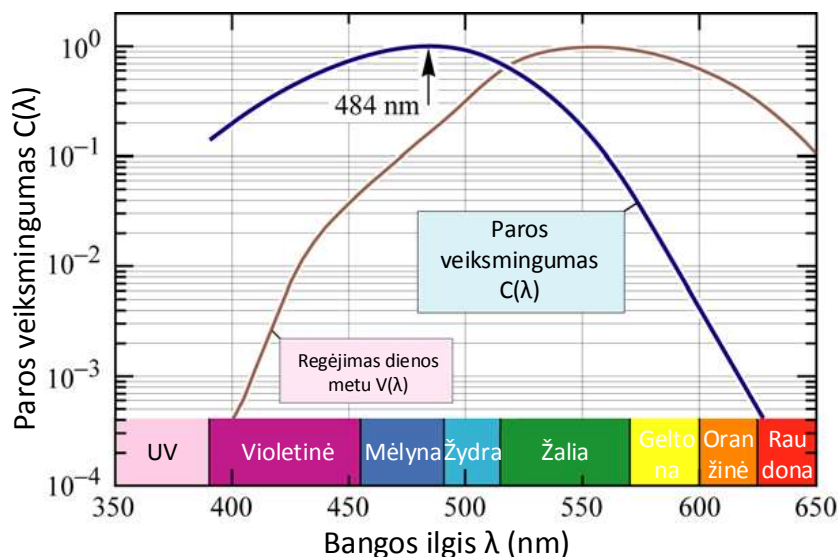
Apytikslės strypelių ir trijų tipų kūginių ląstelių spektrinio jautrio funkcijos yra parodytos 2.1.2 paveiksle. Matosi, kad regėjimas nakties metu (naktinis matymas) yra silpnesnis raudoname spektro diapazone, todėl mėlyno spektro diapazone yra stipresnis lyginant su dieniniu regėjimu (dieninis matymas). Dažniausiai teorijoje aptariamas dienos matymo regėjimas [1].

1.2 Paros cirkadinis ritmas

Žmogaus gyvavimo ritmas yra apibrėžiamas 24 valandų laikotarpyje ir šis ritmas yra vadinamas paros arba cirkadiniu ciklu.

Žmogaus pabudimo-miego ritmas turi būti suderintas su šviesos intensyvumo ir spektrine sudėtimi. Saulės šviesa yra natūrali. Dienos metu saulės spindulių intensyvumas yra aukštas, taip pat yra aukšta ir spalvinė temperatūra, šviesa turi didelį kiekį mėlynos spalvos. Vakaro metu, intensyvios spalvinės temperatūros ir saulės spindulių turinyje esanti mėlyna spalva smarkiai sumažėja. Žmonės yra prisitaikę prie šio pokyčio ir paros ritmas yra pritaikomas tokiems trims veiksniams kaip šviesos intensyvumas, spalvinė temperatūra ir mėlyna spalva.

Neproporcingai didelis šviesos intensyvumas vėlyvą popietę arba vakare gali sutrikdyti reguliarių cirkadinį ritmą ir sukelti nemigą ar net sunkių ligų, tokių kaip vėžys. Todėl labai patartina projektuojant pasirinktos aplinkos apšvietimą apriboti didelio intensyvumo šviesą vėlyvos popietės ir vakaro metu, nesutrikdyti paros ritmo. Cirkadinės charakteristikos pateiktos 1.2.1 paveiksle [1]. Nervinio mazgo ląstelės jautriausios yra 484 nm bangos ilgio šviesai, t.y. mėlynos šviesos spektro diapazonas.



1.2.1 pav. Paros veiksmingumo kreivės, gaunamos atliekant tinklainės nervinio mazgo foto reagavimo matavimus [1]

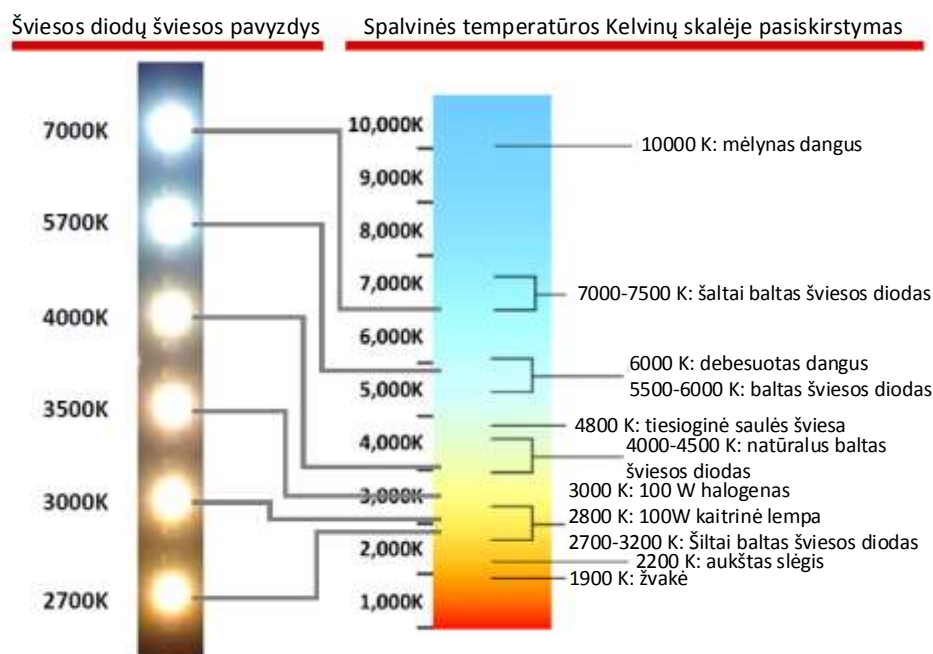
1.2.1 pav. atskleidžia veiksmingumo skirtumą tarp raudonos ir mėlynos šviesos visu paros metu: mėlynos šviesos efektyvumas paros ritmo metu gali būti trimis eilėmis didesnis, nei raudonos šviesos veiksmingumas. Dirbtinio apšvietimo naudojime turėtume atsižvelgti ypač į mėlynos šviesos apšvietimą [1].

2 ŠVIESOS DIODŲ CHARAKTERISTIKOS

2.1 Spalvinės temperatūros charakteristikos

Balta šviesa paprastai apibūdinama jos spalvine temperatūra. Baltos šviesos atspalvio matavimas prasidėjo dar 1800-aisiais, kai britų fizikas Viljamas Kelvinas (William Kelvin) kaitino anglies bloką. Anglies blokas kaitinamas keitė spalvą iš neryškios raudonos, į įvairių atspalvių geltoną spalvą, kol galiausiai prie aukščiausios temperatūros pasiekia ryškią mėlsvai baltą spalvą. Spalvinės temperatūros matavimo skalė, kuri atsižvelgiant į mokslininko darbo rezultatus, buvo pavadinta Kelvino vardu ir yra matuojama Kelvinais ($1 K$). Kelvinų skalė prasideda „absoliučiu nuli“, kuris yra $-273^{\circ}C$ temperatūra. Galima gauti lygiavertį skaičių Celsijaus temperatūroje, atimant 273 iš spalvinės temperatūros, kuri matuojama Kelvinais [3].

Bendrajame apšvietime naudojama sąvoka yra koreliuota spalvinė temperatūra – CCT (angl. *CCT – Correlated Color temperature*). Koreliuota spalvinė temperatūra siejasi su šviesos spalva, kurią sukuria šviesos šaltinis, ir naudoja Kelvinių temperatūros matavimo skalę (absoliučios temperatūros SI sistemos vienetas). Ji apibūdina baltos šviesos šaltinio santykinę spalvos toną, nurodant, ar ji yra labiau geltona/aukso (šilta) ar daugiau mėlyna (šalta), atsižvelgiant į galimą baltos šviesos atspalvių diapazoną [3].



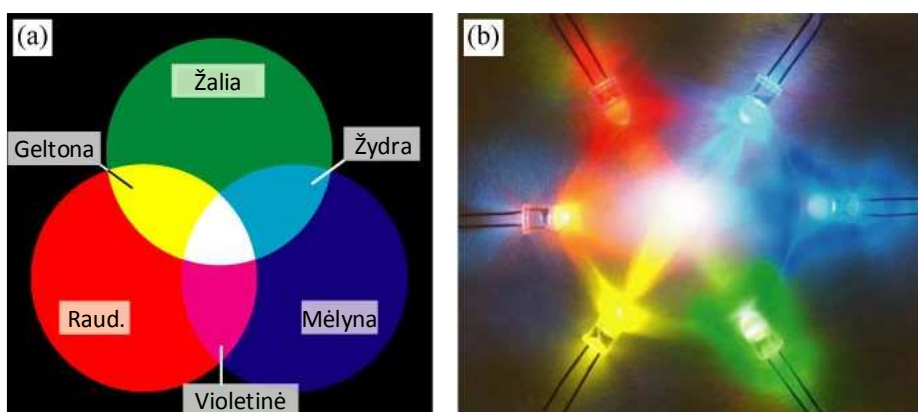
2.1.1 pav. Šviesos diodų spalvinės temperatūros pasiskirstymas Kelvinių skalėje [3]

Daugelis žmonių dabar jau yra susipažinę su šilta balta ir šalta balta spalvomis, kurias siūlo elektros lempučių gamintojai. Šios lempos turi labai skirtingą spalvinę temperatūrą. Šiltos šviesos tono lemputė dažnai turi $3000 K$ spalvinę temperatūrą ir suteikia labiau oranžinę raudoną šviesą. Paprastai šiluma asocijuojasi su raudonos arba oranžinės spalvos objektais, nors tai yra šaltesnė

(žemesnė) temperatūra Kelvino skalėje. Šaltos baltos spalvos lemputė paprastai turi 4100 K ir aukštesnę spalvinę temperatūrą Kelvino skalėje [3].

2.2 Spalvų maišymas

Derinys arba adityvus dviejų ar daugiau šviesos šaltinių maišymas yra naudojamas daugelyje pritaikymų. Šviesos diodų apšvietime įprastai yra naudojami trijų skirtingų tipų šviesos diodai: raudonos, žalios bei mėlynos spalvų. Trys spalvos yra sumaišomos taip, kad stebėtojas gali matyti platų spalvų spektrą. Dar vienas spalvų maišymo pritaikymas yra baltos šviesos gavimas, maišant kelių spalvų derinį [1]. Spalvų maišymo ir atitinkamo eksperimento schema yra parodyta 2.2.1 paveiksle.



2.2.1 pav. Trijų pagrindinių spalvų maišymo schema (a) ir spalvų maišymas panaudojant šviesos diodus (b) [1]

Toliau nustatomos trijų skirtingų spinduliavimo šaltinių spalvines koordinatės. Tarkime, kad trys spinduliavimo diapazonai turi galios spektrinį tankį $P_1(\lambda)$, $P_2(\lambda)$ ir $P_3(\lambda)$ su atitinkamai maksimaliais bangos ilgiais λ_1 , λ_2 , λ_3 . Matome, kad kiekviena spinduliavimo juosta yra daug siauresnė nei bet kuri iš trijų spalvų funkcijų. Kiekvienas iš trijų šviesos šaltinių turi spalvines koordinates (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , ir (x_3, y_3) [1]. Tada trispalvės vertės yra pateikiamos taip [1]:

$$X = \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda)P_1(\lambda)d\lambda + \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda)P_2(\lambda)d\lambda + \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda)P_3(\lambda)d\lambda \approx \bar{x}(\lambda_1)P_1 + \bar{x}(\lambda_2)P_2 + \bar{x}(\lambda_3)P_3; \quad (2.2.1)$$

$$Y = \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda)P_1(\lambda)d\lambda + \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda)P_2(\lambda)d\lambda + \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda)P_3(\lambda)d\lambda \approx \bar{y}(\lambda_1)P_1 + \bar{y}(\lambda_2)P_2 + \bar{y}(\lambda_3)P_3; \quad (2.2.2)$$

$$Z = \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda)P_1(\lambda)d\lambda + \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda)P_2(\lambda)d\lambda + \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda)P_3(\lambda)d\lambda \approx \bar{z}(\lambda_1)P_1 + \bar{z}(\lambda_2)P_2 + \bar{z}(\lambda_3)P_3. \quad (2.2.3)$$

Čia: P_1 , P_2 ir P_3 yra optinės galios, kurias spinduliuoja trys atskiri šaltiniai. Naudojant santrumpas, gauname [1]:

$$L_1 = \bar{x}(\lambda_1)P_1 + \bar{y}(\lambda_1)P_1 + \bar{z}(\lambda_1)P_1; \quad (2.2.4)$$

$$L_2 = \bar{x}(\lambda_2)P_2 + \bar{y}(\lambda_2)P_2 + \bar{z}(\lambda_2)P_2; \quad (2.2.5)$$

$$L_3 = \bar{x}(\lambda_3)P_3 + \bar{y}(\lambda_3)P_3 + \bar{z}(\lambda_3)P_3. \quad (2.2.6)$$

Sumaišytos šviesos spalvų koordinatės gali būti apskaičiuojamas pagal duotas trispalves vertes [1]:

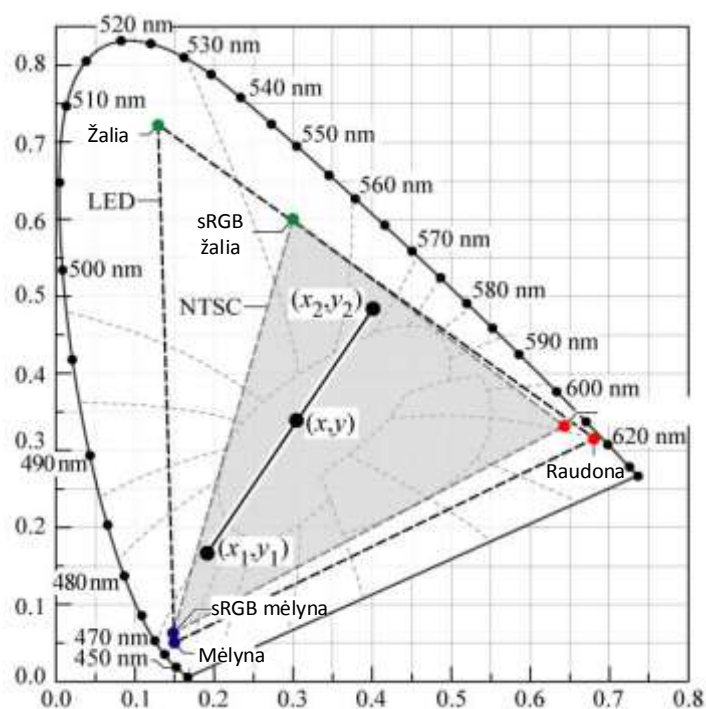
$$x = \frac{x_1L_1+x_2L_2+x_3L_3}{L_1+L_2+L_3}; \quad (2.2.7)$$

$$y = \frac{y_1L_1+y_2L_2+y_3L_3}{L_1+L_2+L_3}. \quad (2.2.8)$$

Tokiu būdu, daugiakomponentinės šviesos spalvinės koordinatės yra individualių koordinatinių linijinis derinys padaugintas iš koeficiento L_i .

Spalvų maišymo principas spalvų diagramoje yra parodytas 2.2.2 paveiksle. Paveiksle parodytas dviejų spalvų, kurių koordinatės yra (x_1, y_1) ir (x_2, y_2) , sumaišymas. Dviejų spalvų maišymo atveju, $L_3 = P_3 = 0$. Gauta spalva bus ant tiesios linijos (x, y koordinatės), jungiančios dviejų šviesos šaltinių koordinates. Tokiu būdu, bet kokia spalva (įskaitant ir baltą), esanti tarp dviejų pasirinktų spalvų taškų, gali būti gauta, sumaišius dvi spalvas.

2.2.2 pav. taip pat parodo trijų spalvų maišymą, esantį raudonos, žalios ir mėlynos spalvų regione. Punkturine linija apibrėžta sritis vadinama spalvų gama ir atstoja visas spalvas, kurios gali būti gautos maišant tris pagrindines spalvas - raudoną, žalią ir mėlyną. Gebėjimas sukurti daug įvairių spalvų yra labai svarbus kokybės parametras apšvietimo srityje [1].



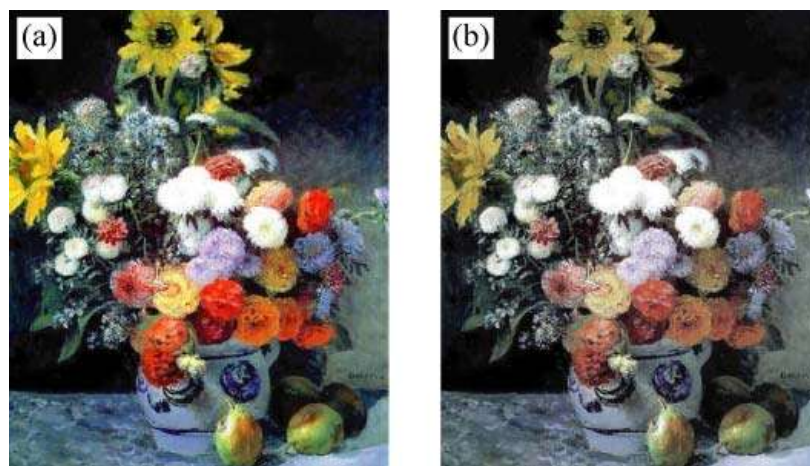
2.2.2 pav. Principinis dviejų ir trijų šviesos šaltinių spalvų maišymas [1]

Paveiksle taip pat parodyta *sRGB* standarto raudono, žalio ir mėlynos fosforų koordinatės ($x_r = 0,64$; $y_r = 0,33$; $x_g = 0,30$; $y_g = 0,60$; $x_b = 0,15$; $y_b = 0,06$). *sRGB* standartas yra identiškas *NTSC* standartui [1].

2.3 Spalvų perteikimas

Dar viena balto šviesos šaltinio charakteristika yra gebėjimas parodyti tikras fizinių objektų spalvas, pvz., vaisiai, augalai, žaislai ir kt., kurie yra apšviesti šviesos šaltinio. Gebėjimas perteikti spalvas yra apibrėžiamas spalvų perteikimo indekso CRI sąvoka (angl. *CRI – Color Rendering Index*). Tai yra dydis, kuris nusako gebėjimą tikroviškai perteikti apšviesto baltu šviesos šaltiniu objekto spalvas.

2.3.1 paveiksle pateiktas fizinio objekto atvaizdas (paveikslas yra impresionistų tapytojo Auguste Renoir), kuris apšviestas dviem skirtingais šaltiniais: kairėje nuotraukoje pateikta, kai objektas apšviestas šaltiniu su aukštu CRI indeksu, o dešinėje - su mažu CRI indeksu. Spalvos atrodo turtingesnės ir ryškesnės esant apšvietimui su aukštu CRI indeksu. Todėl aukštas spalvų perteikimas yra svarbus vietose, tokiose kaip muziejuose, namuose, ar biuruose, o mažesnis spalvų perteikimas yra tinkamas, pavyzdžiui, gatvėse ar automobilių stovėjimo aikštelėse. Mažiausiai svarbus baltos spalvos šviesos šaltinio spalvų perteikimo koeficientas yra ten, kur apšvietimas yra naudojamas kaip signalizavimas ar informavimas.



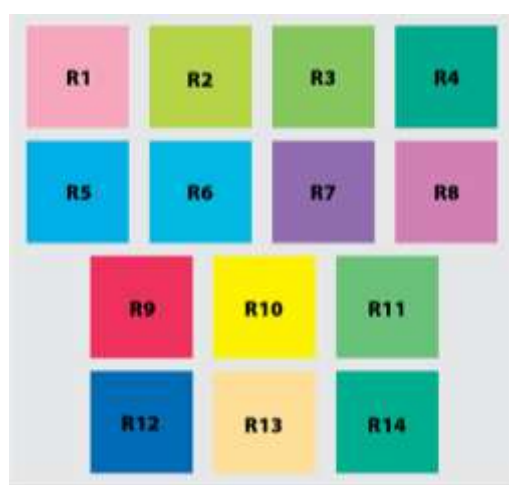
2.3.1 pav. Kūriny „Fleurs dans un vase“ apšviestas skirtingais šviesos šaltiniais: turinčiu aukštą CRI indeksą (a) ir turinčiu žemą CRI indeksą (b) [1]

Bandomo šviesos šaltinio spalvų perteikimo gebėjimas yra vertinamas palyginant jį su etaloninio šviesos šaltinio spalvų perteikimu. Pagal susitarimą juoda kūno etaloninis šaltinis yra tik prielaida tam, kad turėti tobulas spalvų perteikimo savybes ir taip gauti spalvų perteikimo CRI indeksą lygų 100. Šis susitarimas buvo priimtas, nes natūrali dienos šviesa yra labai panaši į juodo kūno šaltinį ir todėl turi būti nustatyta kaip standartinis atskaitos šaltinis. Apšvietimas, kuris nėra etaloninis, turi spalvų perteikimo koeficientą mažesnę nei 100. Kadangi CRI indeksas jautriai priklauso nuo etaloninio šaltinio pasirinkimo, todėl skaičiuojant pasirinkto šaltinio perteikimo koeficientą turime tinkamai parinkti etaloninį šaltinį.

CRI indekso skaičiavimas buvo išsamiai aptartas Wyszecki ir Stiles (1982; 2000) ir CIE (1995). Pagal CIE, bendras *CRI* indeksas apskaičiuojamas taip [1]:

$$CRI_{general} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 CRI_i ; \quad (2.3.1)$$

čia CRI_i specialus aštuonių spalvų indeksų rinkinio *CRI* koeficientas. *CRI* yra vidutinė vertė grindžiama spalvų indeksais nuo *R1* iki *R8*. *R9* yra vienas iš 6 sočiųjų spalvų indeksų, kurie nenaudojami skaičiuojant *CRI* [4]. Tačiau *R9* indeksas yra svarbus spalvų perteikime, ypač kai apšvietimas turi pabrėžti apšviečiamas detales. Pavyzdžiui, muziejuose apšviečiamų paveikslų spalvos turi būti tiksliai perteiktos ar parduotuvėje mėsos skyriuje mėsa turi būti raudonesnė. Toks apšvietimas gaunamas, kai yra aukštas *R9* koeficientas.



2.3.2 pav. Spalvų indeksai, naudojami skaičiuojant *CRI* indeksą [4]

Specialūs spalvų perteikimo koeficientai skaičiuojami taip [5]:

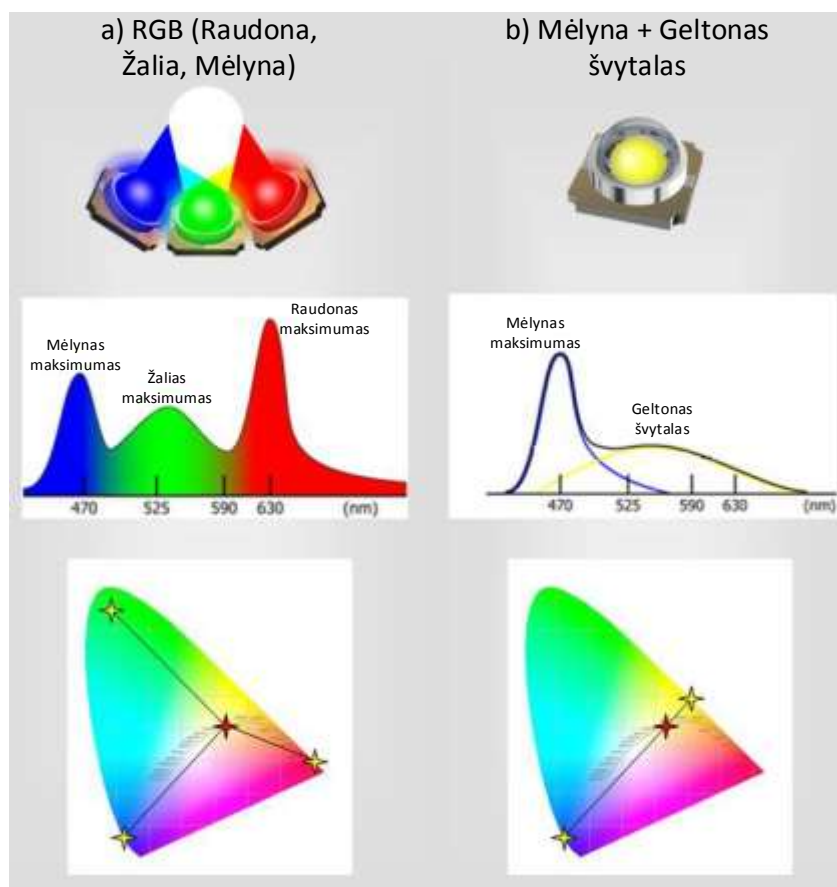
$$CRI_i = 100 - 4,6 \Delta E_i^* ; \quad (2.3.2)$$

kur ΔE_i^* reiškia kiekybinį spalvos pasikeitimą, kuris atsiranda, kai bandomos spalvos pavyzdys yra apšviečiamas pradžioje su etaloniniu apšvietimo šaltinio, o vėliau su bandomuoju apšvietimo šaltiniu.

Galima daryti prielaidą, kad projektuojant apšvietimą, reikia įvertinti aplinką, kurią turėsime apšviesti, bei labai svarbu, ar pasirinkta aplinka bus skirta darbui ar tiesiog ramiam poilsiui, nuo ko priklausys ir apšvietimo spalvų perteikimo indeksas [4].

2.4 Baltos šviesos gavimo būdai

Šviesos dioduose naudojant mėlynos spalvos šviesos diodus, kurie dengti švytalu, galima gauti daugiau liumenų vienam vatui (Lm/W). švytalo pagalba galima išgauti norimą spalvinę temperatūrą. Mėlynos spalvos diodai yra labai stabilūs temperatūros svyravimams, todėl didėjant temperatūrai, neprarandame daug apšvietos (liumenų).

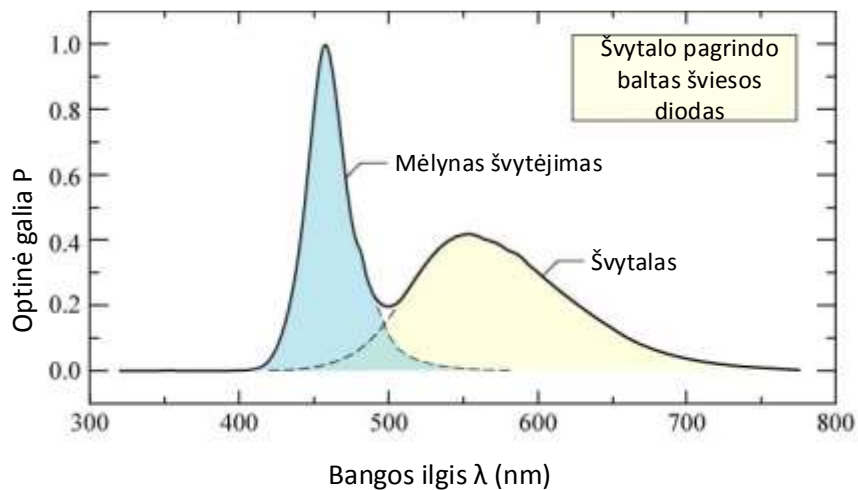


2.4.1 pav. Baltos šviesos formavimo diodai, jų spektrai ir spalvų diagramos: Raudoni, žali, mėlyni (RGB) diodai (a) ir mėlynos šviesos diodas su švytalu (b) [2]

Naudojant raudoną, žalią ir mėlyną diodus (RGB) išgaunant baltą šviesą prarandame aukštą efektyvumą (lm/W). Spalvos taškas yra nestabilus, nes raudonajame diode naudojamas lustas yra labai priklausomas nuo aplinkos temperatūros. Kai slenkstinė temperatūra pakyla, spalva gali pereiti prie žalsvai mėlynos ir bendras šviesos veiksmingumas stipriai nukrenta [1].

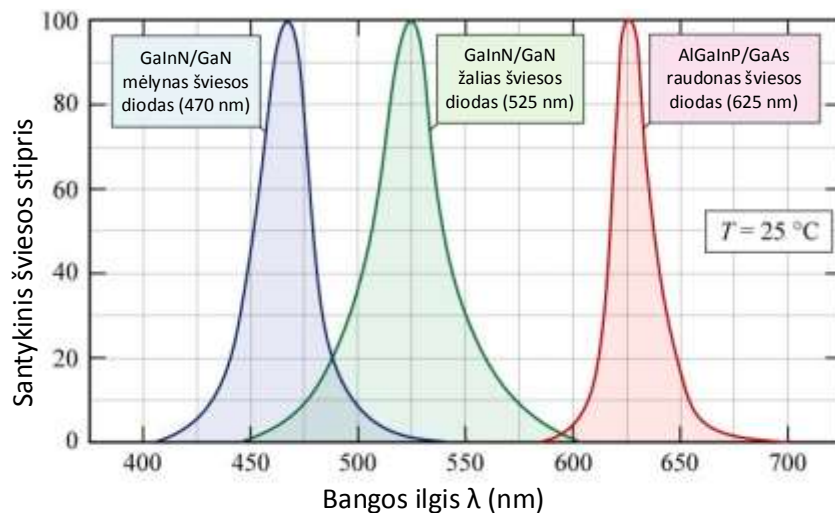
Prieš tai minėtos struktūros turi skirtingus spektrus, o tai yra priežastis skirtingam gaunamam efektyvumui. Akys jautriausios 555 nm spektrui, t.y. žaliai šviesai.

Švytalo pagrindu pagrįstų baltų lempų šviesos spektras priklauso nuo švytinčio puslaidininkio sandaros ir ilgesnį bangos ilgį atspindinčio švytalo (žr. 2.4.2 pav.). Maišant spektrus galima optimizuoti šviesos efektyvumą ir spalvų perteikimo savybes.



2.4.3 pav. Švytalo pagrindu gauto balto šviesos diodo šviesos spektras (pagamintas Nichia korporacijoje) [1]

2.4.4 pav. pateiktas (RGB) raudonų, žalių ir mėlynų šviesos diodų šviesos spektrų pasiskirstymas.



2.4.4 pav. GaInN/GaN mėlyno, GaInN/GaN žalio ir AlGaInP/GaAs raudono šviesos diodų šviesos spektrai [1]

Švytalu dengti šviesos diodai yra pranašesni už RGB diodus spalvų maišymo pritaikymuose. RGB šviesos diodai, dėl naudojamų trijų skirtingų spalvų diodų, kurie turi skirtingas spalvines temperatūras, yra sunkiau pritaikomi apšvietime, kadangi jų spektras nėra tolygus. Tai dar yra ir todėl, kad naudojami trys diodai iš esmės yra labai skirtingi ir apšvietimo spalva, sklindanti iš trijų vietų dėl netolygaus spektro gali sukelti tam tikrą apšvietimo šešėlių. Tai mūsų akims yra nepageidautina [2].

3 KOMPIUTERINIS SPALVŲ MAIŠYMO ŠVIESTUVE MODELIAVIMAS

Norint gauti aukštų parametų apšvietimą, reikia tinkamai parinkti šviesos diodus. Mokslininkų teigimu, atsižvelgiant į metų ar paros laiką, žmones skirtingai veikia dirbtino apšvietimo šviesos temperatūra, intensyvumas, spektras. Todėl svarbūs yra keli aspektai: švelnus intensyvumo reguliavimas bei nematomo šviesos mirksėjimo parametrai. Kadangi žmogaus organizme procesai vyksta paros ritmu, prieš tai minėti parametrai, gali paveikti žmogaus paros Cirkadinį ritmą (gr. *Circadiem*). Kalbant apie apšvietimą su RGB (raudonais, žaliais ir mėlynais) šviesos diodais, jo teikiamas šviesos spektras nėra tolygus – pagrindinės naudojamos spalvos sudaro spektro pikus, o tarp pikų lieka neužpildytas spektras. Tokio tipo apšvietimas kenkia žmonių akims ir savijautai – akys vargsta integruodamos apšvietimo spektro netolygumus.

Projektuojant šį šviestuvą, koncentruojamasi į apšvietimą, artimą natūraliam dienos šviesos apšvietimui, kuris išgaunamas naudojantis šiltais ir šaltais baltais šviesos bei spalviniais šviesos diodais. Dėl spalvų maišymo, tokio tipo apšvietimas turi daug pranašumų:

- Galimybė keisti šviesos spalvos šilumą;
- Gaunamas apšviečiamų objektų sodrumas;
- Apšvietimo spektras tolygus;
- Galimas optimalus apšvietimo lygio parinkimas;
- Gaunamas aukštas spalvų perteikimo indeksas.

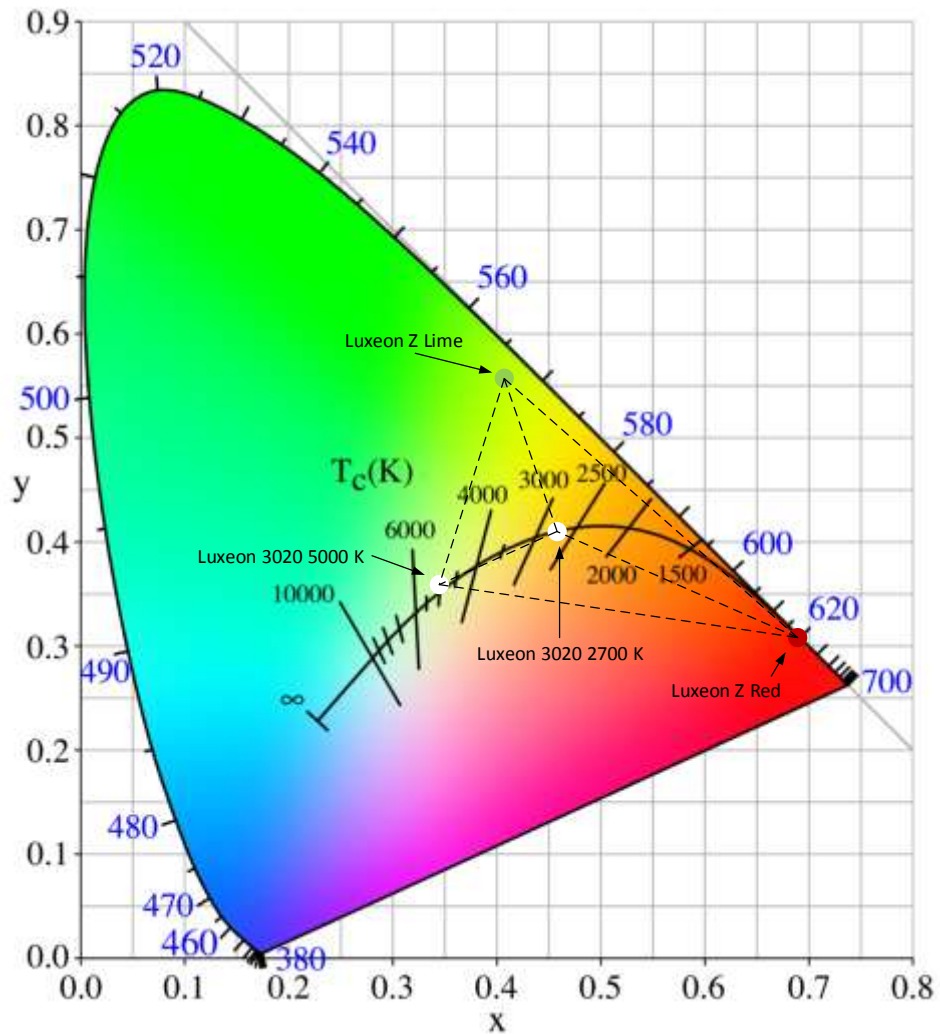
Naudojantis kompiuterinėmis modeliavimo programomis „OSRAM Sylvania“ [6] ir „Lumileds LED Spectrum Mixer“ [7] buvo atliktas kompiuterinis šviesos diodų parametų tyrimas. Antroji naudota programa yra pasiekiamą tiesiogiai per gamintojo „Lumileds“ tinklalapį. Būtent ši programa yra labai naudinga atliekant tyrimą, nes leidžia atlikti spalvinių parametų modeliavimą būtent su savo gaminamais visų modelių šviesos diodais, kurie taip pat yra pasirinkti atliekant šį tyrimą. 3.1 lentelėje pateikti tyrime naudojami šviesos diodai ir jų parametrai [8] [9].

3.1 lentelė. Projekte naudojamų šviesos diodų pagrindiniai parametrai [8] [9]

Spalva	Pavadinimas	Tiesioginė įtampa, V	Maksimali tiesioginė srovė, mA	Spalvinė temperatūra, K	Vyraujantis bangos ilgis, nm		Šviesos srautas, lm		Spalvų perteikimo indeksas (CRI)
					Minimalus	Maksimalus	Minimalus	Maksimalus	
Šilta balta	LUXEON 3020	3,05	240,00	2700	-	-	42,00	52,00	80,00
Šalta balta	LUXEON 3020	3,05	240,00	5000	-	-	46,00	58,00	80,00
Gelsvai žalsva	LUXEON Z Lime	2,85	700,00	-	566,00	569,00	144,00	199,00	-
Raudona	LUXEON Z Red	2,20	1000,00	-	620,00	645,00	40,00	60,00	-

Kiekvienai šviesos diodų spalvai yra projektuojami šviesos diodų maitinimo šaltiniai, kurių kiekvieno išėjimo galia yra iki 21 W (30 V ir 0,7 A išėjimas). Todėl preliminariai galima paskaičiuoti, kiek reikės kiekvienos markės šviesos diodų. Maitinant baltos spalvos diodus norint patenkinti maitinimo šaltinio apkrovą reikalinga bent 10 diodų jungiant nuosekliai ($30\text{ V} / 3\text{ V} = 10$) ir 3 diodų jungiant lygiagrečiai ($700\text{ mA} / 240\text{ mA} = 3$). Todėl maksimalus diodų skaičius gali siekti iki 30 vienetų ($10 \times 3 = 30$). Tuo tarpu kalbant apie spalvinius diodus, jų reikės mažiau – po 10-11 vienetų kiekvienos rūšies, kadangi jie palaiko aukštesnę srovę ir pakanka jungti tik nuosekliai.

Naudojantis minėtomis programomis, nagrinėjamų šviesos diodų vietos atvaizduotos spalvų diagramoje (žr. 3.1 pav.).



3.1 pav. Pasirinktų šviesos diodų išsidėstymas spalvų diagramoje [6]

Iš 3.1 paveikslo matyti, kad maišant spalvas galima reguliuoti turimo dienos apšvietimo spektrą, t.y. galima gauti skirtingų parametrų apšvietimą iš punktyrais apibrėžtų plotų. Figūros viršūnės yra pasirinkti šviesos diodai, t.y. gelsvai žalsvi, raudoni bei 2700 K ir 5000 K spalvinių temperatūrų balti šviesos diodai.

Parinkti gelsvai žalsvos šviesos diodai yra neseniai pasirodžiusi naujovė. Pavyzdžiui, į šaltą baltos šviesos apšvietimą įmaišant atitinkamą santykį raudonos ir gelsvai žalsvos šviesos, galima maišomą spalvą lengviau gauti ant baltos šviesos lanko (Planko lanko), t.y. gauti tiek šaltos, tiek šiltos šviesos apšvietimą su aukštais spalviniais parametrais.

Toliau, kai yra žinomi šviesos diodų reikiami kiekiai, paskaičiuojama, koks yra maksimalus baltų šviesos diodų šviesos srautas, kai maitinimo šaltinis veiks pilna galia:

$$30 \text{ vnt} \cdot 40 \text{ lm} = 1200 \text{ lm}. \quad (3.1)$$

Skaiciavimuose vieno diodo šviesos srautas naudojamas remiantis gamintojo duomenų pase esančiomis charakteristikomis [9]. Žinant maksimalų baltų šviesos diodų šviesos srautą, galima

atlikti modeliavimą. Pirmiausiai atliekamas tyrimas su baltais 2700 K bei raudonais ir gelsvai žalsvais šviesos diodais. Baltų diodų srautas nustatomas maksimalus – 1200 lm, o raudonų keičiamas nuo 0 iki 1200 lm. 3.2 lentelėje pateikti gauti rezultatai, kai įmaišoma raudona šviesa.

3.2 lentelė. Gauti modeliavimo rezultatai, kai maišomi 2700 K su raudonais šviesos diodais

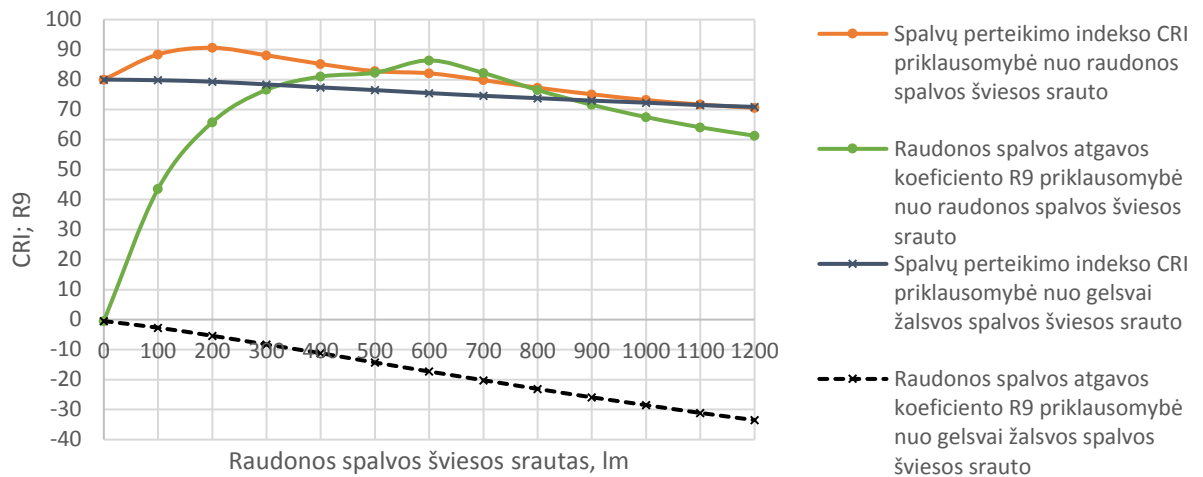
Baltų šviesos diodų šviesos srautas, lm	Raudonų šviesos diodų šviesos srautas, lm	Koreliuota spalvinė temperatūra, K	Spalvų perteikimo indeksas (CRI)	Raudonos spalvos atgavos koeficientas R9
1200	0	2705	80	-0,5
1200	100	2322	88,4	43,6
1200	200	2061	90,6	65,8
1200	300	1875	88,1	76,6
1200	400	1735	85,2	81
1200	500	1630	82,8	82,3
1200	600	1630	82,1	86,4
1200	700	1630	79,8	82,2
1200	800	1630	77,3	76,5
1200	900	1630	75,1	71,6
1200	1000	1630	73,2	67,5
1200	1100	1630	71,7	64,1
1200	1200	1630	70,6	61,3

Toliau atliktas toks pats modeliavimo tyrimas su baltais 2700 K ir gelsvai žalsvais šviesos diodais. Gauti rezultatai pateikti 3.3 lentelėje.

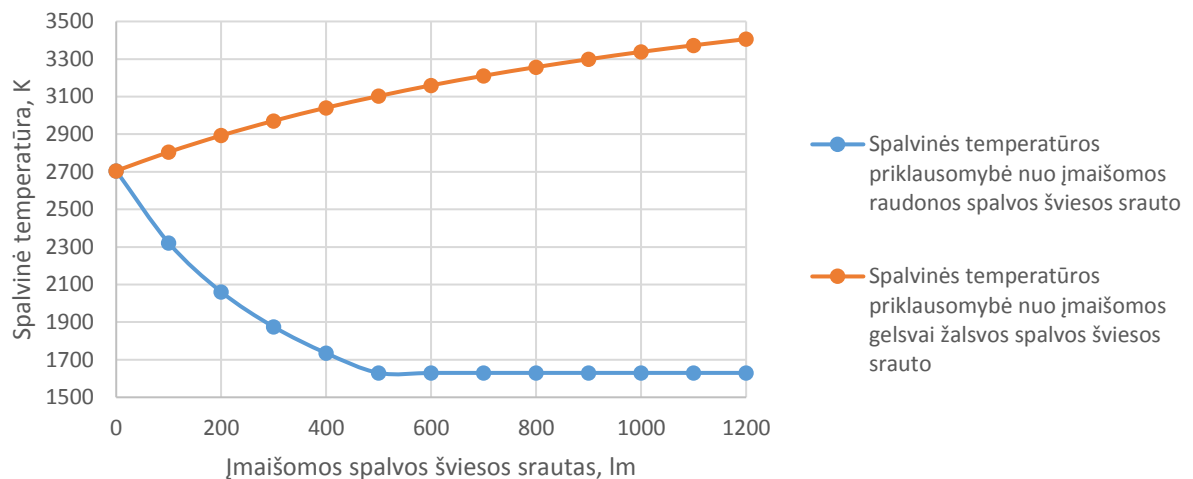
3.3 lentelė. Gauti modeliavimo rezultatai, kai maišomi 2700 K su gelsvai žalsvais šviesos diodais

Baltų šviesos diodų šviesos srautas, lm	Gelsvai žalsvos spalvos šviesos diodų šviesos srautas, lm	Koreliuota spalvinė temperatūra, K	Spalvų perteikimo indeksas (CRI)	Raudonos spalvos atgavos koeficientas R9
1200	0	2705	80	-0,5
1200	100	2805	79,8	-2,7
1200	200	2893	79,3	-5,4
1200	300	2971	78,4	-8,3
1200	400	3041	77,4	-11,2
1200	500	3103	76,5	-14,3
1200	600	3160	75,5	-17,3
1200	700	3211	74,6	-20,2
1200	800	3257	73,8	-23,1
1200	900	3299	73	-25,9
1200	1000	3338	72,3	-28,5
1200	1100	3373	71,5	-31,1
1200	1200	3406	70,9	-33,5

Gautiems rezultatams nubrėžtos pagrindinės charakteristikos: spalvų perteikimo indekso CRI, raudonos spalvos atgavos koeficiento R9 ir spalvinės temperatūros priklausomybės nuo įmaišomos spalvos šviesos srauto.



3.2 pav. Gautas spalvų perteikimo indekso ir raudonos spalvos atgavos koeficiento priklausomybių nuo įmaišomos spalvos šviesos srauto charakteristikos



3.3 pav. Spalvinės temperatūros priklausomybės nuo įmaišomos spalvos šviesos srauto grafikas

Iš gautų charakteristikų pastebime, kad įmaišant į šiltą apšvietimą raudonus šviesos diodus pakeliame spalvų perteikimo bei raudonos spalvos atgavos koeficientus, tačiau mažiname spalvinę temperatūrą. Optimaliausias apšvietimas gaunamas, kai į šiltą apšvietimą įmaišome tik apie 10-20 % raudonos šviesos lyginant su balta spalva. Tuo tarpu įmaišant gelsvai žalsvą spalvą, spalvų perteikimas tampa prastesnis. Šiuos diodus tikslinga naudoti, norint pakelti spalvinę temperatūrą, t.y. gauti šaltesnį apšvietimą.

Ištyrus spalvinius parametrus su 2700 K šviesos diodais, atliktas identiškas tyrimas su 5000 K spalvinės temperatūros baltais ir spalviniais šviesos diodais. Tyrimo rezultatai maišant 5000 K baltus su raudonais šviesos diodais pateikti 3.4 lentelėje.

3.4 lentelė. Gauti modeliavimo rezultatai, kai maišomi 5000 K su raudonais šviesos diodais

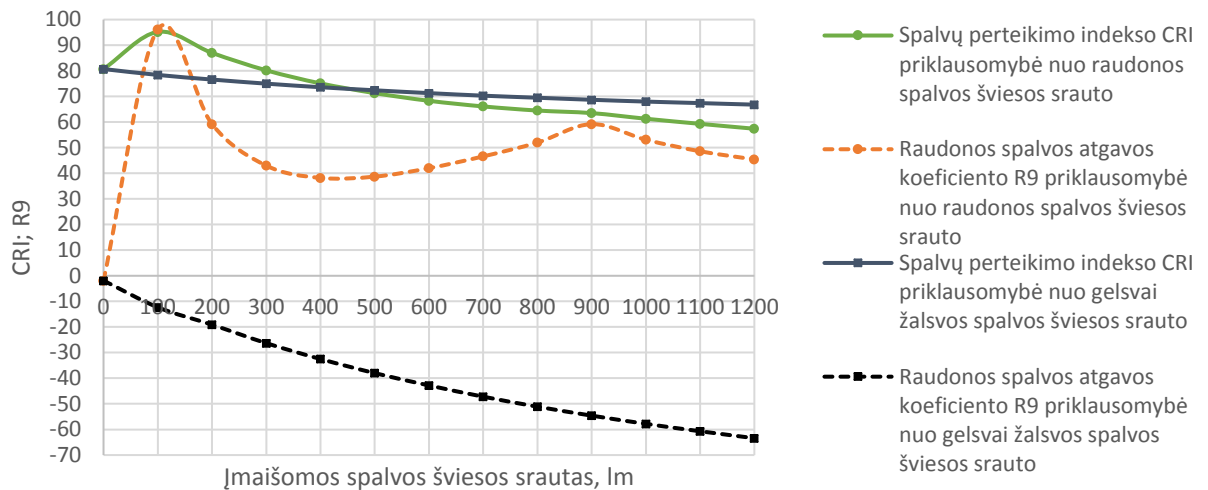
Baltų šviesos diodų šviesos srautas, lm	Raudonų šviesos diodų šviesos srautas, lm	Koreliuota spalvinė temperatūra, K	Spalvų perteikimo indeksas (CRI)	Raudonos spalvos atgavos koeficientas R9
1200	0	5122	80,7	-1,9
1200	100	4004	95,2	96,2
1200	200	3229	87	59,2
1200	300	2717	80,2	43
1200	400	2377	75,1	38,2
1200	500	2140	71,3	38,7
1200	600	1965	68,3	42
1200	700	1832	66,1	46,6
1200	800	1726	64,5	52
1200	900	1630	63,5	59,2
1200	1000	1630	61,3	53,1
1200	1100	1630	59,3	48,6
1200	1200	1630	57,4	45,4

Toks pats modeliavimo tyrimas atliktas su 5000 K ir gelsvai žalsvos šviesos diodais. Gauti rezultatai pateikti 3.5 lentelėje.

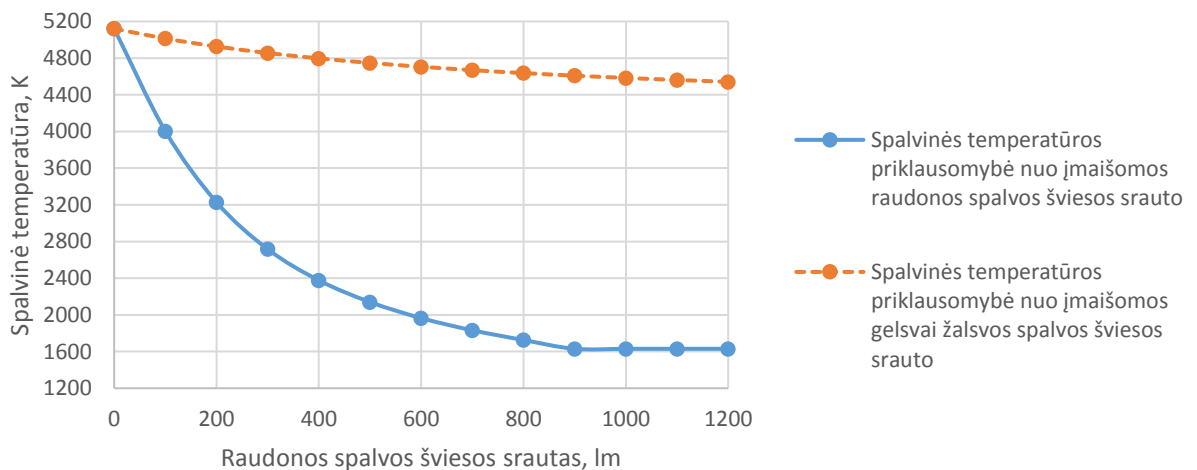
3.5 lentelė. Gauti modeliavimo rezultatai, kai maišomi 2700 K su gelsvai žalsvais šviesos diodais

Baltų šviesos diodų šviesos srautas, lm	Gelsvai žalsvos spalvos šviesos diodų šviesos srautas, lm	Koreliuota spalvinė temperatūra, K	Spalvų perteikimo indeksas (CRI)	Raudonos spalvos atgavos koeficientas R9
1200	0	5122	80,7	-1,9
1200	100	5014	78,4	-12,3
1200	200	4927	76,6	-19,1
1200	300	4856	75	-26,3
1200	400	4797	73,6	-32,5
1200	500	4748	72,4	-38
1200	600	4706	71,3	-42,8
1200	700	4669	70,3	-47,2
1200	800	4637	69,5	-51,1
1200	900	4609	68,7	-54,6
1200	1000	4584	68	-57,8
1200	1100	4562	67,4	-60,7
1200	1200	4542	66,8	-63,4

Gautos charakteristikos taip pat pavaizduotos grafiškai (žr. 3.4 ir 3.5 pav.).



3.4 pav. Gautas spalvų perteikimo indekso ir raudonos spalvos atgavos koeficiento priklausomybių nuo įmaišomos spalvos šviesos srauto charakteristikos



3.5 pav. Spalvinės temperatūros priklausomybės nuo įmaišomos spalvos šviesos srauto grafikas

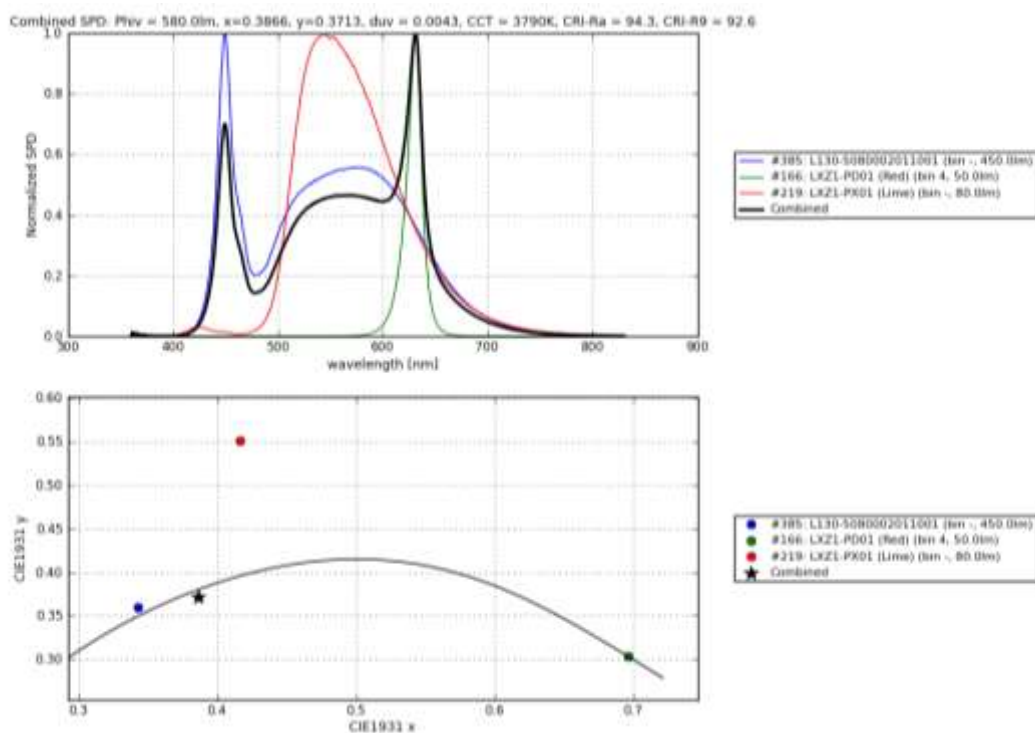
Remiantis gautais rezultatais, kai maišome šaltus šviesos diodus su spalviniais šviesos diodais, galima daryti prielaidą, kad raudonų šviesos diodų šviesos srautas turi būti 10-20 % lyginant su baltų šviesos diodų srautu. Tokiu atveju gausime spalvų perteikimo bei atgavos koeficientus artimus 100. Gelsvai žalsvą apšvietimą naudoti netikslinga - be raudonos spalvos ji nėra naudinga. Tuo tarpu pamažinti spalvinę temperatūrą galima su abejomis spalvomis.

Taip pat atliktas modeliavimas įmaišant į šaltą baltą apšvietimą dvi spalvas. Gauti rezultatai pateikti 3.6 lentelėje. Šiltus baltos spalvos diodus naudoti yra netikslinga, kadangi šalto šviesos diodo spalvinę temperatūrą galima keisti su raudonais bei gelsvai žalsvais šviesos diodais.

3.6 lentelė. Kelių spalvų maišymo modeliavimo rezultatai

Parametras	Luxeon 3020 5000 K	Luzeon Z Lime	Luxeon Z Red	Kombinuotas
Šviesos srautas, lm	450	50	80	580
x koordinatė	0,3425	0,6961	0,4163	0,3866
y koordinatė	0,3594	0,3034	0,5517	0,3713
Spalvinė temperatūra, K	5122	1630	4164	3790
Spalvų perteikimo indeksas CRI	80,70	-18,10	41,30	94,30
Indeksas R1	78,2	-53	38,9	99
Indeksas R2	85,3	45,3	50,9	95,1
Indeksas R3	90,5	18,9	53,1	87,6
Indeksas R4	80,8	-76,5	21,9	93,1
Indeksas R5	79,1	-45,2	39,2	96,7
Indeksas R6	79,8	24,2	43,9	91,8
Indeksas R7	86,4	17,4	57,9	94,3
Indeksas R8	65	-76,3	24,2	96,6
Indeksas R9	-1,9	-326,3	-123,3	92,6
Spinduliavimo galia, W	1,374	0,254	0,171	1,799

Modeliavimo metu gauta spektrinė charakteristika bei sumaišytų spalvų apšvietimo koordinatės spalvų diagramoje pateiktos 3.6 pav.

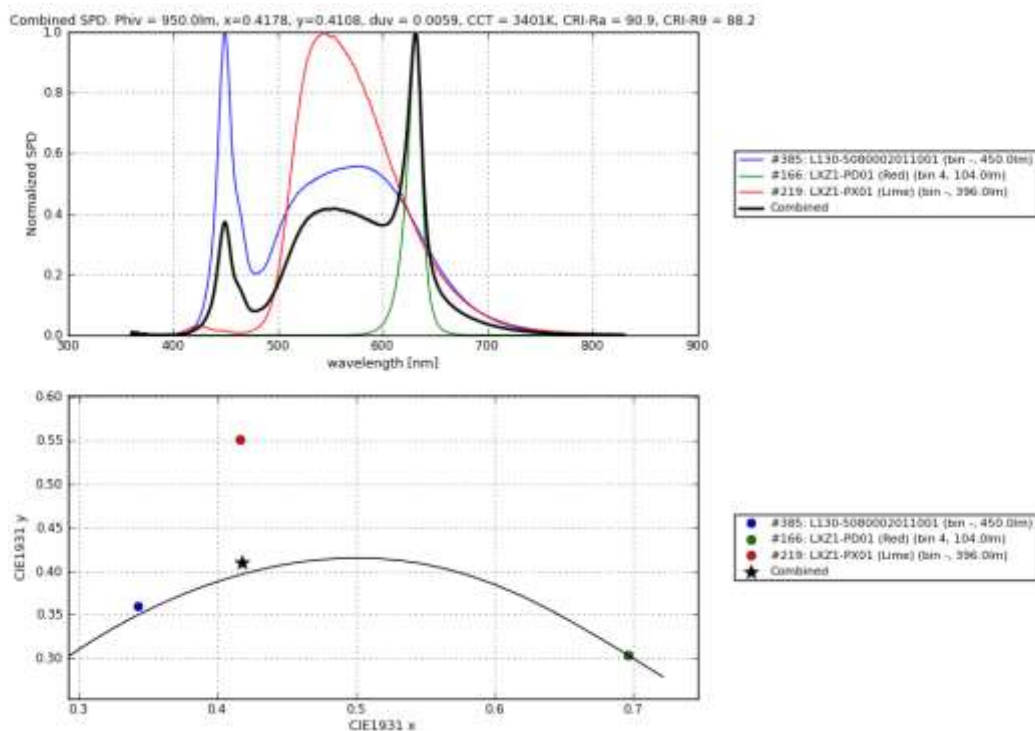


3.6 pav. Spektrinės charakteristikos bei sumaišytų spalvų apšvietimo koordinatės spalvų diagramoje grafikai [7]

Atliktas dar vienas panašus spalvų maišymas, tik pakeistas spalvinių šviesos diodų šviesos spektras. Gauti rezultatai pateikti 3.7 lentelėje bei atvaizduoti grafiškai.

3.7 lentelė. Kelių spalvų maišymo modeliavimo rezultatai

Parametras	Luxeon 3020 5000 K	Luzeon Z Lime	Luxeon Z Red	Kombinuotas
Šviesos srautas, lm	450,00	104,00	396,00	950,00
x koordinatė	0,3425	0,6961	0,4163	0,4178
y koordinatė	0,3594	0,3034	0,5517	0,4108
Spalvinė temperatūra, K	5122,00	1630,00	4164,00	3401,00
Spalvų perteikimo indeksas CRI	80,70	-18,10	41,30	90,90
Indeksas R1	78,20	-53,00	38,90	95,40
Indeksas R2	85,30	45,30	50,90	90,10
Indeksas R3	90,50	18,90	53,10	81,40
Indeksas R4	80,80	-76,50	21,90	93,20
Indeksas R5	79,10	-45,20	39,20	91,80
Indeksas R6	79,80	24,20	43,90	86,10
Indeksas R7	86,40	17,40	57,90	92,70
Indeksas R8	65,00	-76,30	24,20	96,20
Indeksas R9	-1,90	-326,30	-123,30	88,20
Spinduliavimo galia, W	1,374	0,53	0,85	2,747



3.7 pav. Spektrinės charakteristikos bei sumaišytų spalvų apšvietimo koordinatės spalvų diagramoje grafikai [7]

Galima padaryti išvadą, kad naudojant apšvietimą su keturiais skirtingais šviesos diodais, galima išgauti aukštų parametų šviesą ir netrikdyti paros cirkadinio ciklo – dienos metu galima išgauti apšvietimą artimą natūraliam dienos šviesos apšvietimui, o vakare galima išgauti šiltesnį apšvietimą, turintį daugiau raudonos spalvos.

Remiantis komisijos reglamentu (ES) Nr. 1194/2012 [10], kuriuo įgyvendinant Europos Parlamento ir Tarybos direktyvą 2009/125/EB nustatomi kryptinių lempų, šviesos diodų lempų ir susijusių įrenginių ekologinio projektavimo reikalavimai, spalvos perteikimo indeksas CRI turi būti daugiau arba lygus už 80 arba 65, jei lempa skirta naudoti lauke arba yra pramoninės paskirties. Skaičiuojant parametrus, gaunamas koeficientas didesnis negu 80, todėl projektuojamas apšvietimas yra tikslingas.

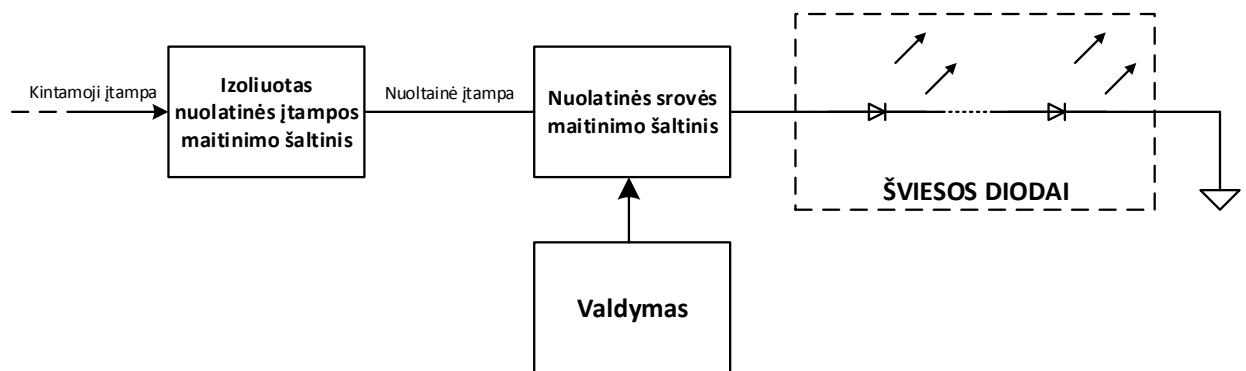
4 ŠIUOLAIKINIŲ ŠVIESOS DIODŲ ŠVIESTUVAI

Šiomis dienomis apšvietimas panaudojant šviesos diodus yra naujausias ir novatoriškiausias energiją taupantis ir aplinkai nekenkiantis apšvietimo būdas, kuris tampa vis labiau naudojamas namų bei kitose aplinkose. Laikoma, kad šviesos diodų lempučių naudojimas ir naujovė – tai vienas didžiausių pasiekimų žmonijos istorijoje. Tai yra dėl daugelio šviesos diodų privalumų lyginant su kitais, daugelį metų vyravusiais, apšvietimo būdais. Visų pirma, šviesos diodų lemputės visada gali suteikti švelnų apšvietimą, o tai sukuria komfortišką aplinką. Taip pat tokios pačios galios šviesos diodų lemputė suteikia daugiau šviesos (liumenu) nei įprastos lemputės. Pagrindinė įprastų lempučių problema yra tai, kad jos sunaudoja daug energijos, kuri yra netinkamai panaudojama. Šviesos diodų lemputės šių problemų neturi. Jos naudinga šviesa paverčia apie 90 % ir daugiau sunaudojamos energijos. Be paminėtų savybių, labai svarbu apšvietimo ilgaamžiškumas. Šviesos diodų lempos tarnauja gerokai ilgiau lyginant su liuminescencinėmis, halogeninėmis ir kaitinamosiomis. Paprasta kaitinamoji lemputė tarnauja vidutiniškai 1000 valandų, liuminescencinė (su E27 cokoliu) – 10 000 valandų, diodas gali šviesti iki 50 000-70 000 valandų.

Šviesos diodų technologijų plėtrą taip pat teigiamai veikia įvairūs apribojimai, susiję su mažai efektyviais šviesos šaltiniais ir skatinimui efektyviau vartoti elektros energiją. Pavyzdžiui, Europos Parlamento priimta direktyva (ES) 2015/1428 [10], kurios tikslas – palaipsniui pašalinti iš Europos Sąjungos rinkos kaitinamąsias ir mažai efektyvias halogenines lempas.

Žmonėms yra priimtina, kad šviesos diodai šviečia tik vienos spalvos šviesa, tačiau yra būdų gauti aukštų spalvinių parametrų kokybišką dirbtiną šviesą. Paprasčiausiai tai pasiekama kombinuojant kelių spalvų diodus viename šviestuve, pavyzdžiui, kartu su baltos šviesos diodais šviestuve gali būti naudojami ir spalviniai šviesos diodai, kurie pagerina šviesines savybes: keičia spalvinę temperatūrą, šviesos spektrą, spalvų perteikimą ir pan.

Pasirinkus tinkamus šviesos diodus ir suprojektavus atitinkamus valdymo principus, galima sukurti aukštų parametrų apšvietimo sistemą. Tokio šviestuvo struktūra ir pagrindinės sudedamosios dalys pavaizduotos 4.1 paveiksle.



4.1 pav. Šviesos diodų šviestuvo blokinė schema

Blokinėje schemoje matosi šviestuvo sudedamosios dalys. Pradžioje reikalingas izoliuotas nuolatinės įtampos maitinimo šaltinis. Jo pagrindinės funkcijos - izoliuoti schemas apkrovą nuo kintamosios srovės ir kintamąją įtampą keisti į nuolatinę. Toliau seka įtampą žeminantis maitinimo šaltinis, kurio jėgimo įtampa paprastai yra nestabilizuota nuolatinės srovės įtampa, kuri gaunama išlyginus kintamą tinklo įtampą diodų tilteliu – jos vertė svyruoja dėl tinklo įtampos amplitudės svyravimų. Todėl impulsiniai nuolatinės srovės maitinimo šaltiniai skirti keisti nestabilizuotą nuolatinės srovės energijos įtampą į stabilizuotą nuolatinės srovės energijos įtampą.

Pagrindinės nuolatinės srovės maitinimo šaltinių rūšys [11]:

- 1) Įtampą aukštinantieji (angl. *Boost*) maitinimo šaltiniai;
- 2) Įtampą žeminantieji aukštinantieji (angl. *Buck-Boost*) maitinimo šaltiniai;
- 3) Įtampą žeminantieji (angl. *Buck*) maitinimo šaltiniai;
- 4) Izoliuoti (angl. *Fly-Back*) maitinimo šaltiniai.

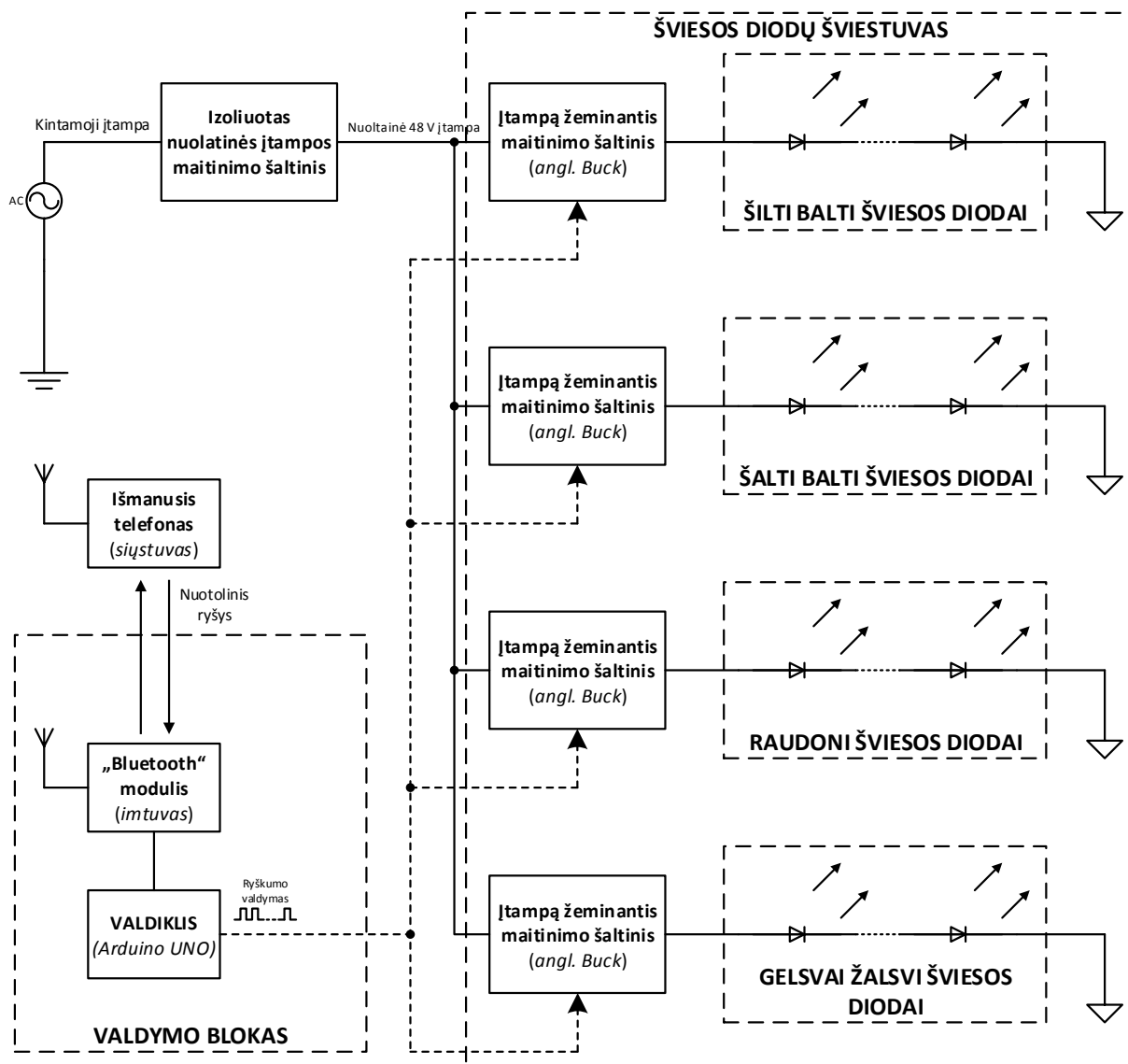
Šviesos diodai įprastai parenkami kelių rūšių, kad gautume aukštų parametrų ir plataus apšvietimo spektro apšvietimą, kurį, panaudojant visus žinomus valdymo principus, galėtume keisti visame diapazone: vakare galėtume išgauti ramaus tono apšvietimą, o dirbant - akių nevarginantį dienos šviesos apšvietimą, turintį daugiau mėlynos spalvos spektro, ko reikalauja mūsų organizmas dienos metu. Todėl toks šviestuvus gali atstoti didelės galios paprastas kaitrines lemputes ir suteikti aukštų spalvinių parametrų apšvietimą bei pagerinti žmogaus biologinį ciklą ir savijautą.

5 VALDOMŲ PARAMETRŲ APŠVIETIMO SISTEMA

Kuriamą valdomą šviesos diodų apšvietimo sistemą sudaro vienas pagrindinis valdiklis, kuris valdo keturi šviesos diodų maitinimo šaltinius. Du nuolatinės srovės maitinimo šaltiniai turi būti didesnės galios ir skirti maitinti šiltiems ir šaltiems baltiems šviesos diodams. Kiti du silpnesni ir turi maitinti spalvinius gelsvai žalsvus ir raudonus šviesos diodus, kurių dėka galėtume keisti apšvietimo spalvinius šviesos parametrus. Valdiklis turi sąsają, per kurią jungiantis prie kompiuterio galima pakeisti valdymo principus.

Šviesos diodams buityje maitinti tinkamiausias yra įtampą žeminantis maitinimo šaltinis. Išanalizavus galimus elementų variantus ir jų charakteristikas, buvo pasirinktas gamintojo „Supertex Inc“ įtampą žeminančio maitinimo šaltinio valdiklis HV9861A ir tyrimui suprojektuotas keturių kanalų šviesos diodų maitinimo šaltinis. Du kanalai projektuojami maitinti šviesos diodus 700 mA srovė, kiti du silpnesni skirti spalviniams šviesos diodams maitinti – 250 mA . Šaltiniams parinkti reikiami parametrai ir schemos valdymo principai. Visa sistema maitinama iš vieno izoliuoto nuolatinės įtampos maitinimo šaltinio.

Kad lengviau būtų suprasti visų atitinkamų blokų funkcijas šviestuve, žemiau, 5.1 paveiksle, pateikta sudaryta bendra šviestuvo struktūrinė schema. Visos struktūrinės dalys smulkiau aptariamos tolimesniuose šio skyriaus poskyriuose.



5.1 pav. Valdomų parametų apšvietimo sistemos struktūrinė schema

5.1 Izoliuotas nuolatinės įtampos maitinimo šaltinis

Projektuojant sistemą buvo parinktas izoliuotas nuolatinės įtampos maitinimo šaltinis (žr. 5.1.1 pav.), skirtas visų sistemos sudedamųjų dalių maitinimui. Jis skirtas keisti kintamąją įtampą į nuolatinę 48 V įtampą. Šio šaltinio pagrindinė savybė yra izoliuoti išėjimo grandinę nuo įėjimo grandinės.



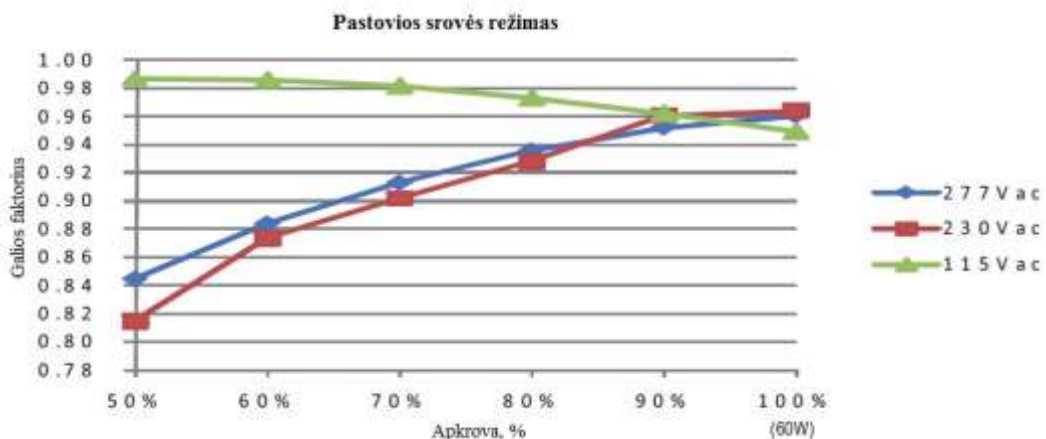
5.1.1 pav. Izoliuotas nuolatinės įtampos maitinimo šaltinis [12]

Maitinimo šaltinio įėjime jungiama 230 V kintamosios srovės (tinklo) įtampa. Šaltinis generuoja 48 V nuolatinę įtampą, kurios maksimali srovė gali siekti 1.3 A. Jo pagrindiniai parametrai yra tokie [12]:

- integruotas galios faktoriaus korektorius;
- aukštas naudingumo koeficientas – apie 89 %;
- turi trumpojo jungimo, per aukštos srovės, perkaitimo apsaugas;
- skirtas šviesos diodams maitinti;
- tinkamas lauko ir vidaus sąlygomis.

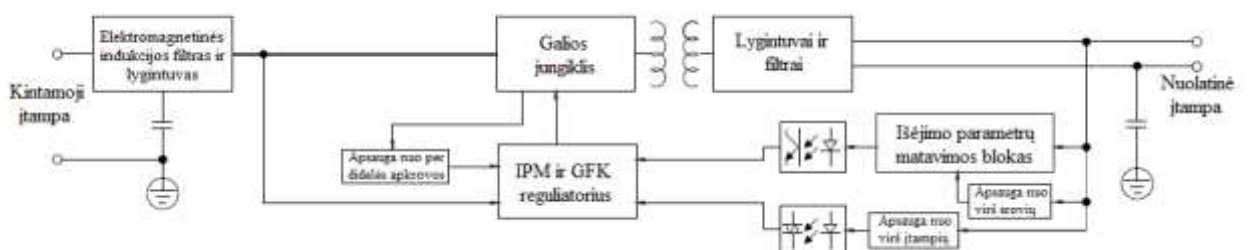
Gamintojas teigia, jog kylant aplinkos temperatūrai, negalima maksimaliai apkrauti maitinimo šaltinio, o temperatūrai pakilus iki 70°C – šaltinio apsaugos nuo per aukštos temperatūros grandinės jį išjungia [12].

5.1.2 paveiksle pateikta šaltinio duomenų pase duota galios faktoriaus charakteristika, kuri parodo galios faktoriaus priklausomybę nuo apkrovos kitimo. Iš charakteristikos matyti, kad apkrovai artėjant iki 100 %, didėja ir galios faktorius, kuris pasiekia 0,96 vertę [12].



5.1.2 pav. Izoliuoto nuolatinės srovės maitinimo šaltinio galios faktoriaus charakteristika prie įvairių maitinimo įtampų [12]

Trumpai aptarsime izoliuoto maitinimo šaltinio struktūrą, kuri pateikta 5.1.3 paveiksle. Tai pats pirmasis šviestuvo blokas, kuris yra jungiamas prie kintamosios srovės įtampas.



5.1.3 pav. Izoliuoto nuolatinės įtampos maitinimo šaltinio blokinė schema [12]

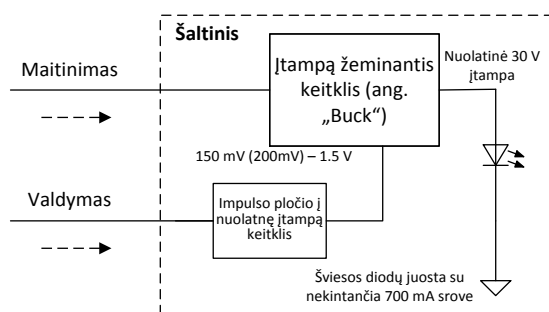
Kaip matyti iš struktūros, izoliuotą šaltinį sudaro įvairios dalys. Galios grandinėje yra filtrai ir lygintuvai, galios jungiklis, transformatorius. Taip pat yra reguliavimo ir išėjimo parametrų matavimo grandinės, apsaugos nuo virš įtampių blokai. Šios grandinės nuo galios grandinės yra atskirtos optronais. Taip pat šaltinyje yra filtruojantys kondensatoriai.

Pulsacijoms mažinti naudojami filtrai, kurie mažina aukštesnias harmonikas. Paprasčiausias filtras yra didelės talpos ($100 - 300000 \mu F$) filtruojantys kondensatoriai.

Toks maitinimo šaltinis turi integruotą galios faktoriaus korekciją bei papildomas apsaugos bei atskyrimo grandines, todėl yra tinkamas naudoti projektuojamam ir tiriamam šviestuvui.

5.2 Įtampą žeminančių maitinimo šaltinių sudarymas

Kuriamą sistemą sudaro keturi įtampą žeminantys šviesos diodų maitinimo šaltiniai. Kaip minėta prieš tai, kiekviename jų naudojamas gamintojo „Supertex Inc“ įtampą žeminančio maitinimo šaltinio valdiklis HV9861A. 5.2.1 paveiksle pavaizduotas vieno iš keturių tyrime projektuojamo įtampą žeminančio maitinimo šaltinio blokinė schema. Kitų kanalų schemas identiškos.

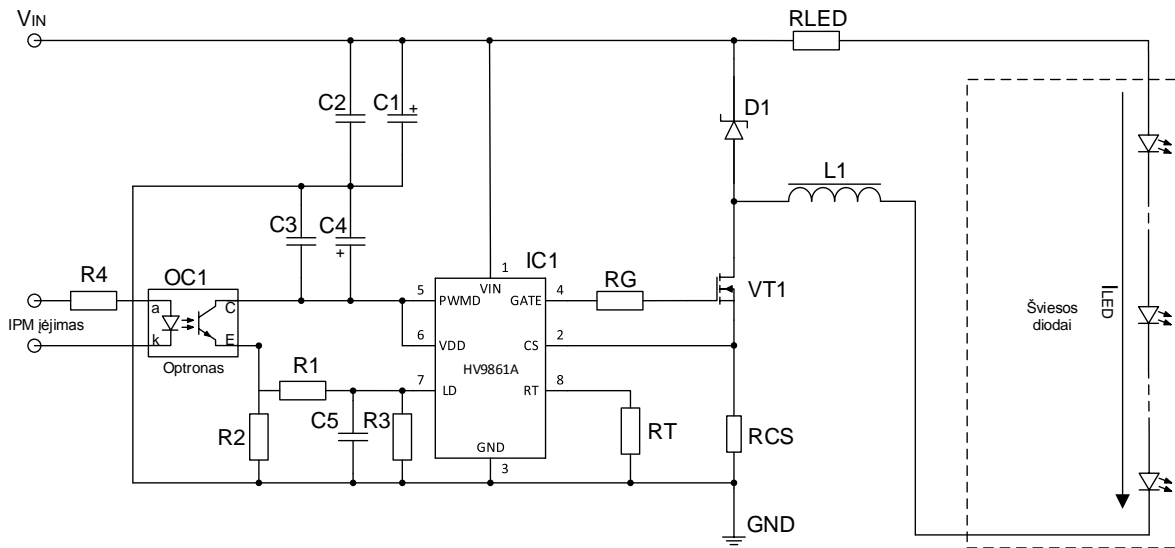


5.2.1 pav. Įtampą žeminančio maitinimo šaltinio blokas

Parinktas šaltinių išėjimo srovės valdymas. Populiariausias šviesos diodų schemų valdymo būdas yra naudojant impulso pločio moduliaciją. Tačiau naudojamas valdiklis HV9861A turi tiesinio valdymo galimybę, kuri naudojant gaunamas tolygesnis valdymas [13]. Todėl nuspręsta valdyti schemą tiesiniu valdymo būdu panaudojant impulso pločio moduliaciją. Tam reikalingas impulso pločio į nuolatinę įtampą keitiklis, kuris taip pat bus suprojektuotas ir iširtas.

Kadangi maitinimo šaltiniai veikia aukštu dažniu, pageidautina atskirti valdymo signalo šaltinį nuo įtampą žeminančio maitinimo šaltinio, todėl schemoje bus naudojamas tranzistorinis optronas *OCl*.

Tiriamiesiems maitinimo šaltiniams parinkus valdymo būdą, nubraižyta schema tolimesniems skaičiavimams atlikti, kuri patiekta 5.2.2 paveiksle.



5.2.2 pav. Šviesos diodų maitinimo šaltinio schema

Atliekami pagrindiniai analitiniai skaičiavimai vienam iš keturių šaltinių. Pradiniai skaičiavimų duomenys:

- įtampą žeminančio šaltinio maitinimo įtampa $V_{IN} = 48 \text{ V}$;
- įtampą žeminančio maitinimo šaltinio išėjimo įtampa $V_{LED} = 30 \text{ V}$;
- baltų šviesos diodų išėjimo srovė $I_{LED} = 0,7 \text{ A}$;
- spalvinių šviesos diodų išėjimo srovė $I_{LED} = 0,25 \text{ A}$;

Valdiklio HV9861A duomenų pase [13] pateikiamos formulės kai kuriems schemos ir elementų parametrams surasti. Tačiau šiame apraše nėra kelių formulių, kurias galima rasti analogiško valdiklio LM3444 (gamintojas „Texas Instruments“) duomenų pase [14].

Pirmiausiai, atsižvelgiant į maitinimo šaltinių sroves, parinktos ritės: baltų šviesos diodų maitinimo šaltiniuose naudojamų ričių induktyvumai $L = 470 \mu\text{H}$, spalvinių šviesos diodų maitinimo šaltiniuose - $L = 1,5 \text{ mH}$ [15].

Parinkta įtampą žeminančio maitinimo šaltinio įtampa $V_{IN} = 48 \text{ V}$, kadangi naudojamo izoliuoto nuolatinės įtampos maitinimo šaltinio išėjimo įtampa yra 48 V . Toliau apskaičiuojami pagrindiniai šviesos diodų maitinimo šaltinių schemos parametrai bei naudojamų elementų nominalai:

- skverbti D [14]:

$$D = \frac{V_{LED}}{V_{IN}} = \frac{30 \text{ V}}{48 \text{ V}} = 0,625; \quad (5.2.1)$$

- schemos veikimo dažnis f išreikštas ir apskaičiuotas iš ritės induktyvumo apskaičiavimo formulės [14]:

$$L = \frac{(V_{IN} - V_{LED}) \cdot D}{(0,3 \cdot I_{LED}) \cdot f}; \quad (5.2.2)$$

$$f = \frac{(V_{IN} - V_{LED}) \cdot D}{(0,3 \cdot I_{LED}) \cdot L} = \frac{(48 V - 30 V) \cdot 0,625}{(0,3 \cdot 0,7 A) \cdot 470 \mu H} = 113,98 \text{ kHz} \approx 114 \text{ kHz}; \quad (5.2.3)$$

- tranzistoriaus išjungimo laikas T_{off} [13]:

$$T_{off} = \left(1 - \frac{V_{LED}}{V_{IN}}\right) \cdot \frac{1}{f} = \left(1 - \frac{30 V}{48 V}\right) \cdot \frac{1}{114 \text{ kHz}} = 3,29 \mu s; \quad (5.2.4)$$

- rezistoriaus R_T nominalas, kuris nusako tranzistoriaus išjungimo laiką [13]:

$$T_{off}(\mu s) = \frac{R_T(k\Omega)}{25} + 0,3; \quad (5.2.5)$$

$$R_T(k\Omega) = (T_{off}(\mu s) - 0,3) \cdot 25 = (3,29 \mu s - 0,3) \cdot 25 = 74,75 \text{ k}\Omega; \quad (5.2.6)$$

- tranzistoriaus įjungimo laikas T_{on} [14]:

$$T_{on} = \frac{D}{f} = \frac{0,625}{114 \text{ kHz}} = 5,48 \mu s; \quad (5.2.7)$$

- išėjimo srovės pulsacijos Δi [14]:

$$\Delta i = T_{off} \cdot \frac{V_{LED}}{L} = 3,29 \mu s \cdot \frac{30 V}{470 \mu H} = 0,2099 A \approx 0,21 A; \quad (5.2.8)$$

- maksimali išėjimo srovė $I_{LED,p}$ [14]:

$$I_{LED,p} = I_{LED} + \frac{\Delta i}{2} = 0,7 A + \frac{0,21 A}{2} = 0,805 A; \quad (5.2.9)$$

- rezistoriaus R_{CS} nominalas, kuris nustato šviesos diodais tekančią srovę [13]:

$$I_{LED} = \frac{0,27}{R_{CS}}; \quad (5.2.10)$$

$$R_{CS} = \frac{0,27}{I_{LED}} = \frac{0,27}{0,7} = 0,386 \Omega; \quad (5.2.11)$$

Taip pat apskaičiuoti ir parinkti impulso pločio signalo į nuolatinę įtampą keitiklio pagrindiniai elementai:

- tranzistorinis optronas OCl , kurio maksimali pramušimo įtampa 5 kV , maksimali darbinė įtampa 80 V ir maksimali įėjimo srovė 50 mA ;
- parenkamas keramikinio kondensatoriaus $C5$ nominalas [16], kuris gali veikti esant maksimaliai 25 V :

$$C5 = 2,2 \mu F;$$

- apskaičiuojamas ir parenkamas rezistoriaus $R1$ nominalas [16]:

$$R1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C5 \cdot F_{3db}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,2 \mu F \cdot 5 \text{ Hz}} = 14,476 \text{ k}\Omega \approx 15 \text{ k}\Omega; \quad (5.2.12)$$

šiuo atveju nominalas suapvalinamas, kad būtų lengviau parinkti rezistorių; čia: $C5$ – prieš tai parinktas kondensatorius, o $F3db$ apskaičiuota pagal formulę [16]:

$$F3db = Fimp * 10^{\frac{-60 dB}{20}} = 5 kHz * 10^{\frac{-60 dB}{20}} = 5 Hz. \quad (5.2.13)$$

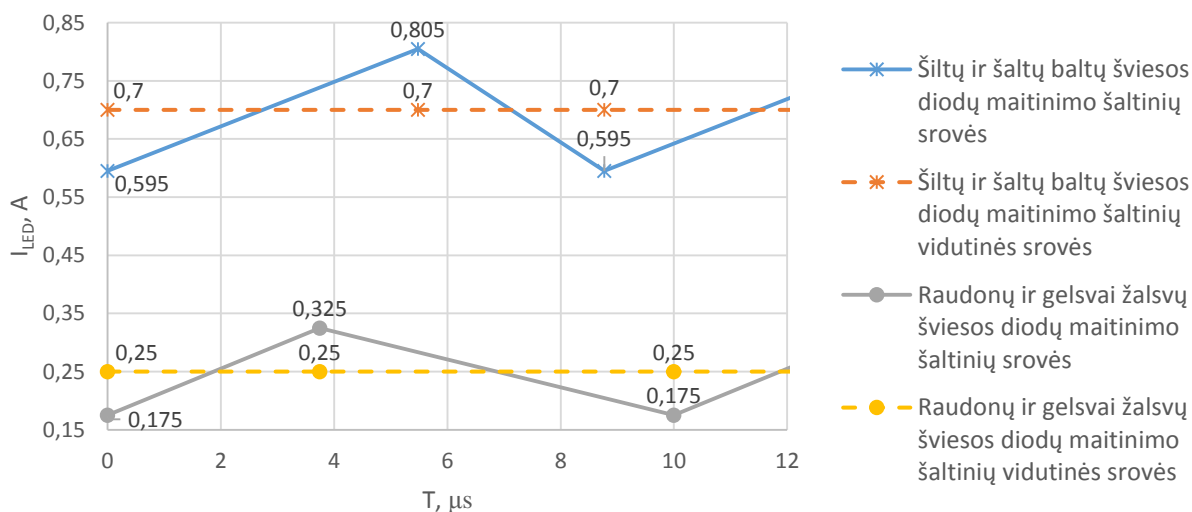
Čia: $Fimp = 5 kHz$, kadangi tokio dažnio impulsais bus valdomas maitinimo šaltinis.

Atlikus pagrindinius skaičiavimus vienam šaltiniu, analogiškai apskaičiuojami ir parenkami likusių maitinimo šaltinio elementų nominalai. Visų maitinimo šaltinių parametrai pateikti 5.2.1 lentelėje.

5.2.1 lentelė. Keturių maitinimo šaltinių pagrindinių apskaičiuotų elementų ir parametų vertės

Parametras	Pirmas mait. šaltinis	Antras mait. šaltinis	Trečias mait. šaltinis	Ketvirtas mait. šaltinis
V_{LED}, V	30,00	30,00	30,00	30,00
I_{LED}, A	0,70	0,70	0,70	0,70
f, kHz	114,00	114,00	100,00	100,00
$T_{ON}, \mu s$	5,45	5,45	6,25	6,25
$T_{OFF}, \mu s$	3,29	3,29	3,75	3,75
$RT, k\Omega$	74,75	74,75	86,25	86,25
$\Delta i, A$	0,21	0,21	0,075	0,075
$I_{LED,p}$	0,805	0,805	0,2875	0,2875
RCS, Ω	0,386	0,386	1,08	1,08

Turint visas srovės vertes (I_{LED} , Δi , $I_{LED,p}$), nubrėžiamos maitinimo šaltinių išėjimo srovių grafikai.

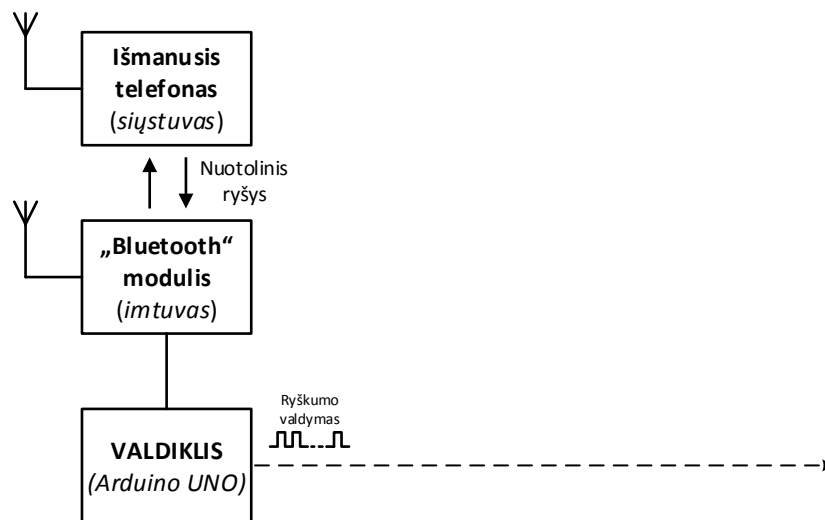


5.2.3 pav. Maitinimo šaltinių išėjimo srovių priklausomybių nuo laiko grafikai

5.2.3 paveiksle punktyrine linija pažymėta vidutinė srovė, ištisine – srovės kitimas, vykstant jungiklio (lauko tranzistoriaus) įjungimams ir išjungimams.

5.3 Šviestuvo valdymas

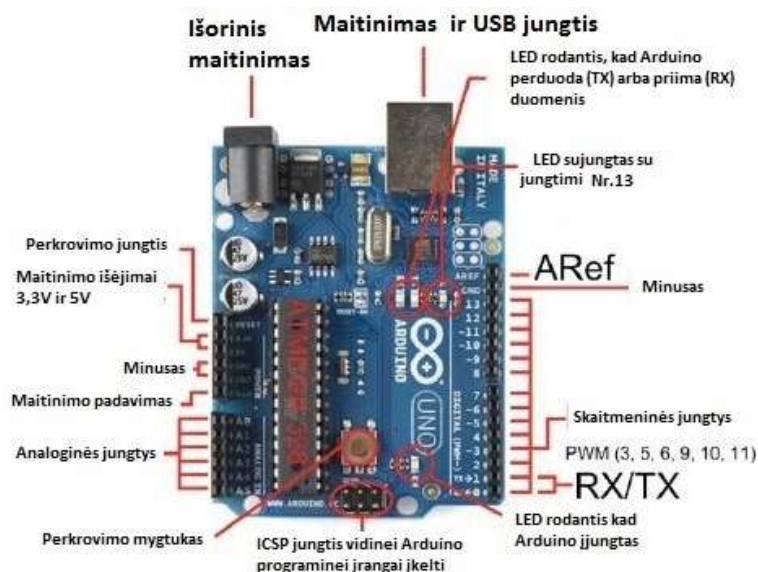
Šiomis dienomis vis dažniau naudojami valdomi šviestuvai, kuriais galima turėti optimalų apšvietimą. Tokio šviestuvo valdymo dalies blokinė schema pateikta 5.3.1 paveiksle.



5.3.1 pav. Šviesos diodų maitinimo šaltinių valdymo blokinė schema

Dažniausiai projektuojant šviestuvo valdymą yra naudojamas valdiklis. Šiam projektui pasirinktas italų gamybos „Arduino UNO“, kurį galima suprogramuoti pagal įvairius kriterijus.

„Arduino UNO“ – tai programuojamas elektroninis prietaisas, naudojantis „Atmel“ firmos mikrovaldiklį, kuris pasižymi didelėmis galimybėmis. Tai atviro kodo platforma, todėl ji yra labai populiari. Šis instrumentas kuriamam projektui suteikia didesnes galimybes kontroliuoti sistemą. „Arduino“ valdikliai naudoja C ir C++ programavimo kalbų mišinį [17].

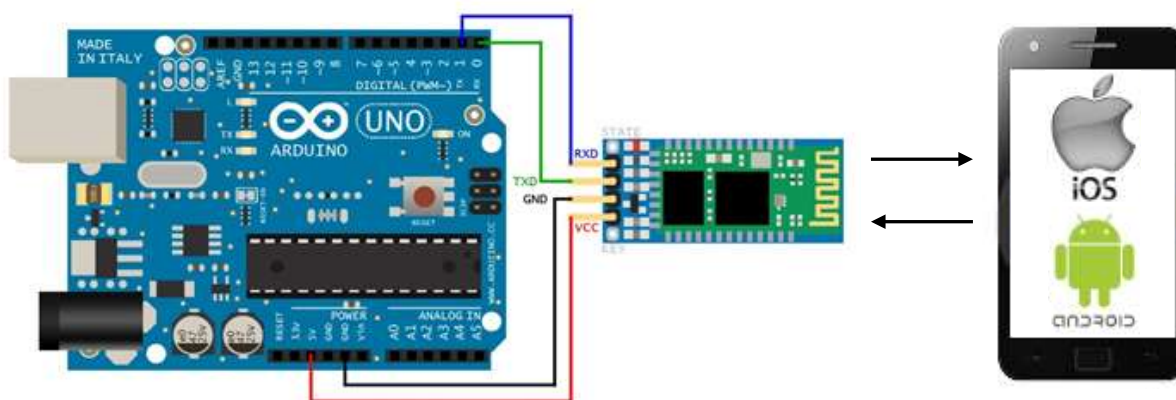


5.3.2 pav. Arduino UNO valdiklis su aprašytais išvadais [17]

Prie valdiklio yra galimybių prijungti papildomų elementų, kuriais įvertinami ir valdomi šviesos parametrai. Kiekvienas įtampą žeminančio maitinimo šaltinio išėjimas turi skirtingų

spalvų, t.y. baltos šviesos bei spalvinius šviesos diodus, todėl valdant šiuos šaltinius galima panaudoti spalvų maišymą ir išgauti įvairių spalvinių temperatūrų baltą šviesą: pavargus vakare norisi neintensyvios šviesos, o dirbant būtinas dienos šviesos apšvietimas, ku artimesnis natūraliam.

Šiame darbe kuriamas sistemos nuotolinis valdymas. Tam tikslui yra naudojami dviejų tipų „Bluetooth“ moduliai. Pirmasis modelis HC-06 yra senesnės „Bluetooth 2.0“ versijos ir skirtas naudoti su įrenginiais, naudojančiais „Android“ operacinę sistemą. Antrasis modulis HM-10 yra naujesnis, naudoja „Bluetooth 4.0“ versiją, kurią palaiko įrenginiai su „iOS“ operacine sistema. Bet kurio tipo modulis priima visus valdymo signalus, kuriuos formuoja ir nuotoliniu būdu perduoda išmanusis telefonas. Abu moduliai jungiami prie valdiklio „Arduino UNO“ vienodu principu, kaip parodyta paveiksle. Šiuo atveju valdiklis su moduliu dirba kaip imtuvas, o išmanusis telefonas – siųstuvas.



5.3.3 pav. „Bluetooth“ modulio prijungimas prie valdiklio plokštės „Arduino UNO“ [18]

„Bluetooth“ modulis turi keturis kontaktus: *GND* – žemė (angl. *Ground*), *VCC* – 5 V maitinimo kontaktas, *RX* – duomenų priėmimo kontaktas (angl. *RX* – *Receiver*), *TX* – duomenų siuntimo kontaktas (angl. *TX* – *Tranceiver*). Modulis prie valdiklio jungiamas taip, kaip parodyta paveiksle: *GND* kontaktas sujungiamas su valdiklio *GND* kontaktu, *VCC* su valdiklio 5V kontaktu, *RX* su valdiklio *TX* kontaktu, *TX* su *RX* kontaktu [19]. Viską teisingai sujungus, „Bluetooth“ modulyje esantis indikacinis šviesos diodas pradeda mirksėti. Kai prie modulio prisijungiama su išmaniuoju aparatu, diodas pradeda degti nepertraukiamai.

Tokią sistemą galima užprogramuoti pagal norimus kriterijus, todėl tai yra puiki perspektyva ateities technologijoms ir išmaniųjų namų integracijoje.

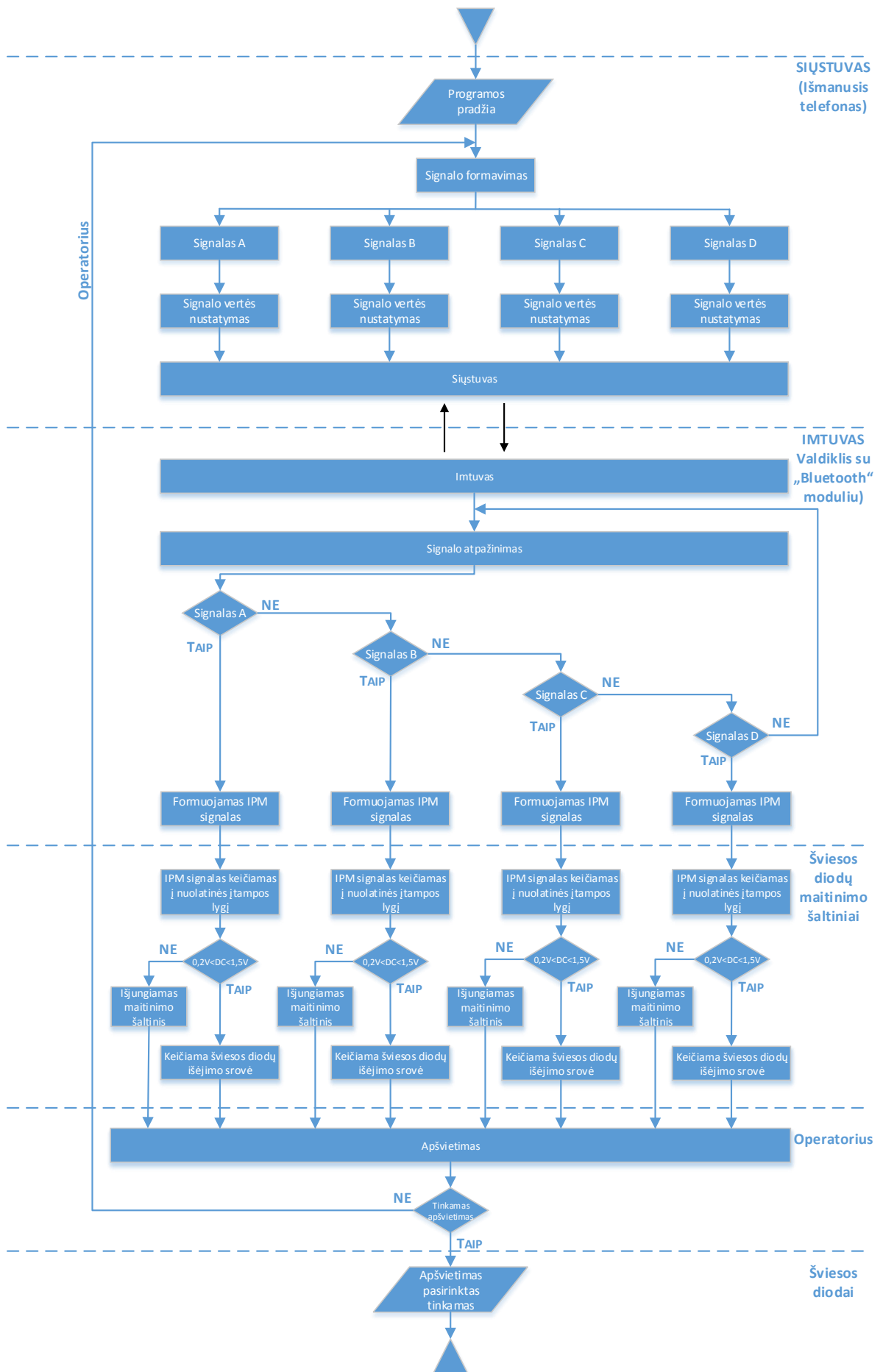
5.4 Valdymo signalo formavimas ir apdorojimas

Kuriamas šviesos diodų šviestuvo valdymas turi užtikrinti bendravimo tarp valdiklio ir šviesos diodų greitaveiką, kad ciklas tarp siunčiamo valdymo signalo ir šviesos pasikeitimo trukmė ne ilgiau kaip $0,1$ s. Kitaip tariant, valdymas turi būti ne lėtesnis už žmogaus reakciją.

Išanalizavus ir suprojektavus šviesos diodų maitinimo šaltinius bei jų veikimo principus, atliekamas valdiklio programavimas. Naudojamas valdiklis „Arduino UNO“ buvo programuojamas panaudojant originalią šio gamintojo programą „Arduino Genuino 1.6.13“ [20], veikiančią Microsoft Windows operacinės sistemos aplinkoje. Prieš užprogramuojant valdiklį, sudarysime valdymo signalo formavimo ir apdorojimo algoritmą, kuris turi tenkinti šiuos reikalavimus:

- Kiekvienos spalvos šviesos diodų nepriklausomas šviesos intensyvumo keitimas;
- Galimybė švelniai įjungti – išjungti šviesą, nesukeliant staigaus apšvietimo pasikeitimo akims;
- Galimybė keisti apšvietimo spalvinę temperatūrą bei kitus parametrus.

Sudarytas valdymo signalo formavimo ir apdorojimo algoritmas pateiktas 5.4.1 paveiksle.



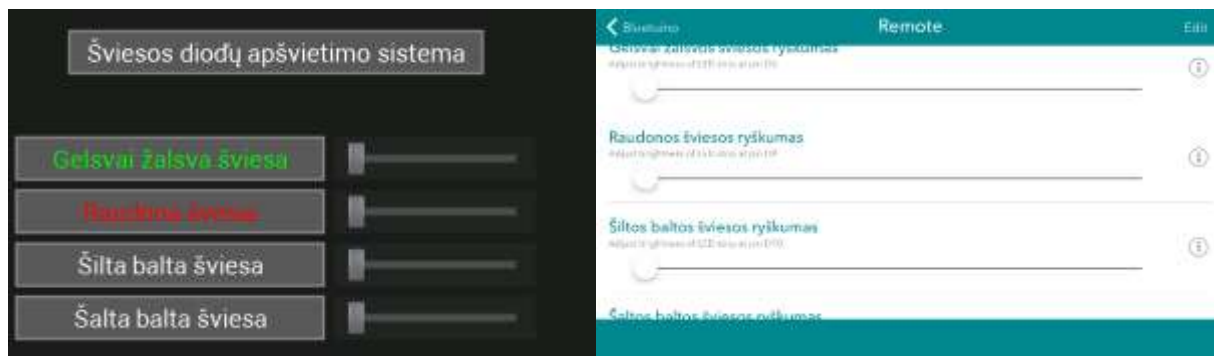
5.4.1 pav. Valdymo signalo formavimo ir apdorojimo algoritmas

Atskiras algoritmo dalis vykdo didelė dalis projektuojamos sistemos bloką. Pradžioje siųstuve formuojama valdymo signalo vertė. Šiuo atveju siųstuvas yra išmanusis telefonas. „Bluetooth“ modulis yra imtuvas, kuris nuotoliniu būdu atpažįsta ir priima signalą iš siųstuvo ir perduoda jį valdikliui. Priklausomai nuo signalo vertės, valdiklyje formuojami atskiri impulso pločio moduliacijos signalai (IPM), skirti valdyti atskirus šviesos diodų maitinimo šaltinius. IPM signalas, kaip jau buvo minėta, keičiamas į nuolatinės įtampos lygį. Tokiu būdu išvengiamas šviesos diodų mirgėjimas, kuris gali atsirasti, kai impulsų pločio santykis su periodu yra mažesnis nei 50 %.

Toliau kiekviename maitinimo šaltinyje tikrinamas signalo nuolatinės įtampos lygis. Jeigu signalo vertė yra $< 0,2 V$, tai šaltinis išjungiamas. Jeigu vertė nuo $0,2 V$ keičiasi iki $1,5 V$, tai tolygiai keičiamas ir šviesos diodų maitinimo šaltinio išėjimo srovės dydis, t.y. šviesos diodų ryškumas.

Jeigu parinktas apšvietimas netenkinamas, jis toliau keičiamas ir kartojamas visas algoritmas. Remiantis sudarytu algoritmu, buvo parašytos šviesos diodų nuotolinio valdymo programos, kurios pateiktos [priede 1](#) ir [priede 2](#).

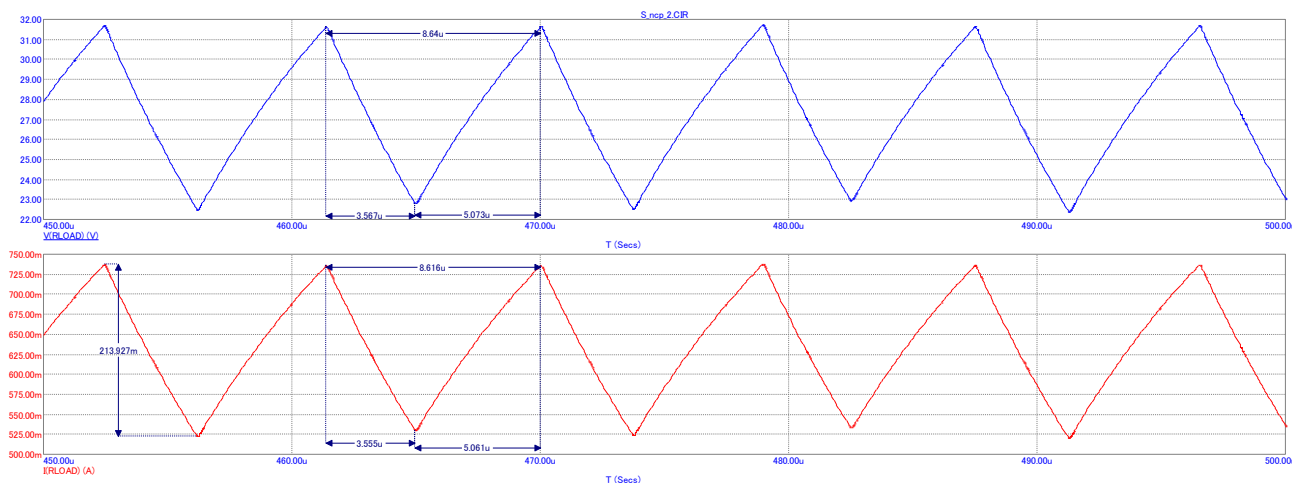
Tiriamajame darbe buvo naudojami išmanieji telefonai su „Android“ ir „iOS“ operacinėmis sistemomis. Šių operacinių sistemų aplinkose buvo sukurtos programos, kurios tenkina minėtus algoritmo reikalavimus. Sukurtos aplikacijos pateiktos 5.4.2 paveiksle.



5.4.2 pav. Sukurtos valdymo programos: kairėje „Android“ aplinkoje, dešinėje – „iOS“ aplinkoje

Atlikus daugiau spalvų maišymo tyrimų, būtų tikslinga sudaryti supaprastintą valdymo programos aplinką, skirtą paprastam vartotojui. Programoje turėtų būti tik keli mygtukai. Kiekvieno mygtuko programos aprašyme turėtų būti įprogramuotas tam tikras, jau iširtas, aukštų parametų apšvietimas. Tokiu būdu vartotojas galėtų įsijungti aukštų parametų apšvietimą be didelio vargo ir nereiktų gilintis, ar apšvietimas yra tinkamas, ar geri jo parametrai ir pan.

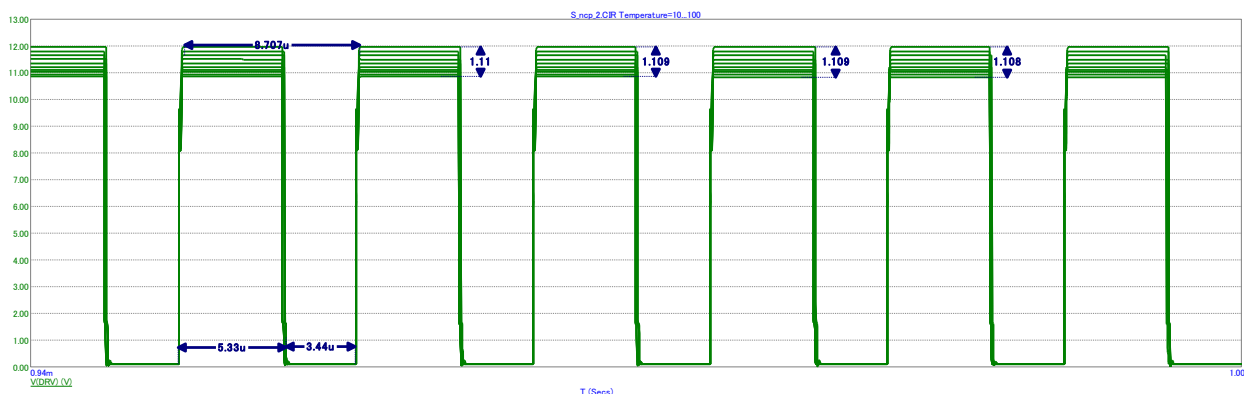
priklausomybė nuo aplinkos temperatūros kitimo. Žemiau pateiktos visos išmatuotos charakteristikos.



6.1.2 pav. Sumodeliuotos išėjimo įtampos V_{LED} (viršuje) ir srovės I_{LED} (apačioje) oscilogramos

Kadangi schemos veikimo dažnis yra parinktas toks, kaip ir apskaičiuotas teoriškai ($F = 114 \text{ kHz}$), tai matuojamų charakteristikų oscilogramose (žr. 6.1.2 pav.) pastebima pagal periodą ($F = 1/T = 1/8.64 \mu\text{s} \approx 115.74 \text{ kHz}$), kad veikimo dažnis identiškas. Išmatuota ir vidutinė srovė I_{LED} , kuri lygi $0.669 \text{ A} \approx 0.67 \text{ A}$, kuri artima apskaičiuotai vertei.

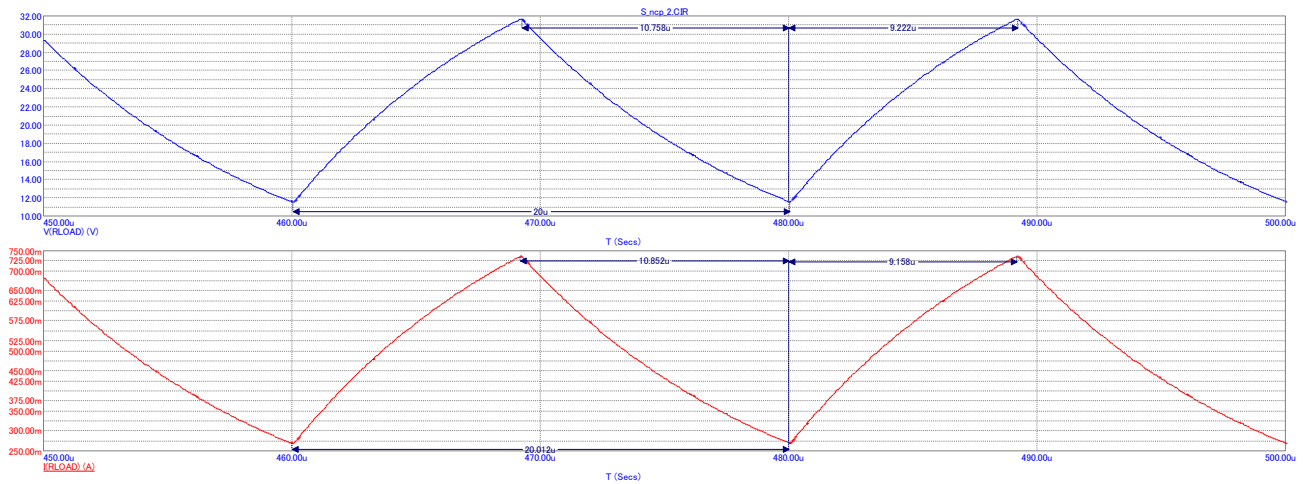
Sumodeliuota ir išmatuota tranzistoriaus užtūros ($Gate$) įtampa V_{gate} bei jos vertės kitimas, kintant temperatūrai nuo 10 iki 110°C . Gauta charakteristika pateikta 6.1.3 paveiksle.



6.1.3 pav. Sumodeliuota tranzistoriaus užtūros įtampa V_{gate} , kai temperatūra kinta nuo 10 iki 110°C

Iš charakteristikos matosi, kad įtampos vertė kylant temperatūrai mažėja apie $1,1 \text{ V}$. Taip pat buvo atliktas apkrovos tyrimas, keičiantis temperatūrai. Apkrovos įtampos pokytis gaunamas apie 10 mV , o srovės apie $300 \mu\text{A}$.

Buvo atliktas bandymas keičiant šaltinio veikimo dažnį iš 114 kHz į 50 kHz . Pakeitus buvo išmatuota išėjimo įtampa V_{LED} ir išėjimo srovė I_{LED} . Matavimai pateikti 6.1.4 paveiksle.



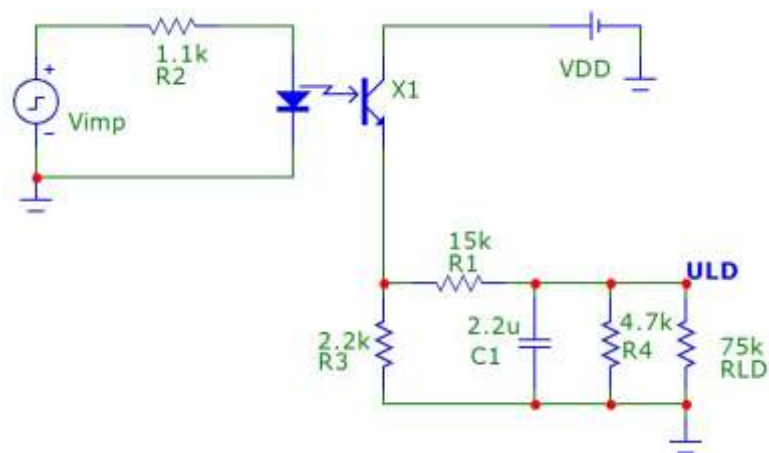
6.1.4 pav. Sumodeliuotos išėjimo įtamos V_{LED} (viršuje) ir srovės I_{LED} (apačioje) oscilogramos, kai schemos veikimo dažnis pakeistas į 50 kHz

Matosi, kad pakeitus schemos dažnį iš 114 kHz į 50 kHz pasikeičia periodas T , kadangi $T = 1 / F = 1 / 20.012 \mu s = 49.97 \text{ kHz} \approx 50 \text{ kHz}$. Pakeitus dažnį, pasikeičia periodas.

Iš gautų rezultatų matosi, kad maitinimo šaltinio parametrai modeliuojant yra identiški apskaičiuotiems parametrams, todėl galima atlikti šaltinio eksperimentinį tyrimą.

6.2 Impulso pločio moduliacijos signalo keitiklio į nuolatinę įtampą modeliavimas

Šis keitiklis buvo modeliuojamas programa „MicroCap 10“. Modeliuoto ir tirta keitiklio schema parodyta 6.2.1 pav. Schemą sudaro: impulsų generatorius V_{imp} ; tranzistorinis optronas $X1$, kuris atskiria valdymo signalo grandinę nuo maitinimo šaltinio; nuolatinės įtamos šaltinis VDD ; rezistorius $R1$ ir kondensatorius $C1$, kurie keičia impulsus į nuolatinės įtamos lygį, rezistoriai $R3$ ir $R4$ naudojami kaip įtamos dalikliai.



6.2.1 pav. Sumodeliuota keitiklio grandinė

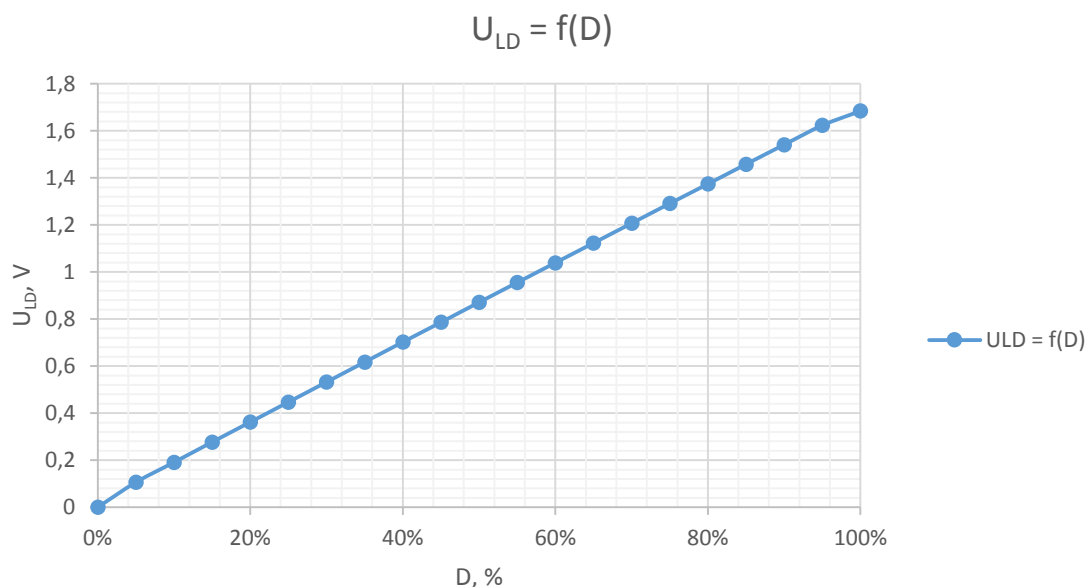
Optrono įėjime esantis impulsų šaltinis *Vimp* generuoja 5 kHz dažnio 5 V amplitudės impulsus. Optrono tranzistoriaus maitinimo įtampa turi būti tokia pati (7,5 V), kokia maitins šį keitiklį šviesos diodų maitinimo šaltinis. Valdiklio valdymo įėjimo *LD* vidinė varža yra ganėtinai didelė, todėl schemos apkrovoje prijungtas didelio nominalo 75 kΩ rezistorius *RLD*.

Toliau yra keičiamas impulsų generatoriaus impulsų *Vimp* pločio santykis su periodu *D* ir matuojama įtampa U_{LD} apkrovoje. Gauti rezultatai pateikti 5.3.1 lentelėje.

6.2.1 lentelė. Įtampos U_{LD} priklausomybė nuo impulsų pločio santykio su periodu *D*

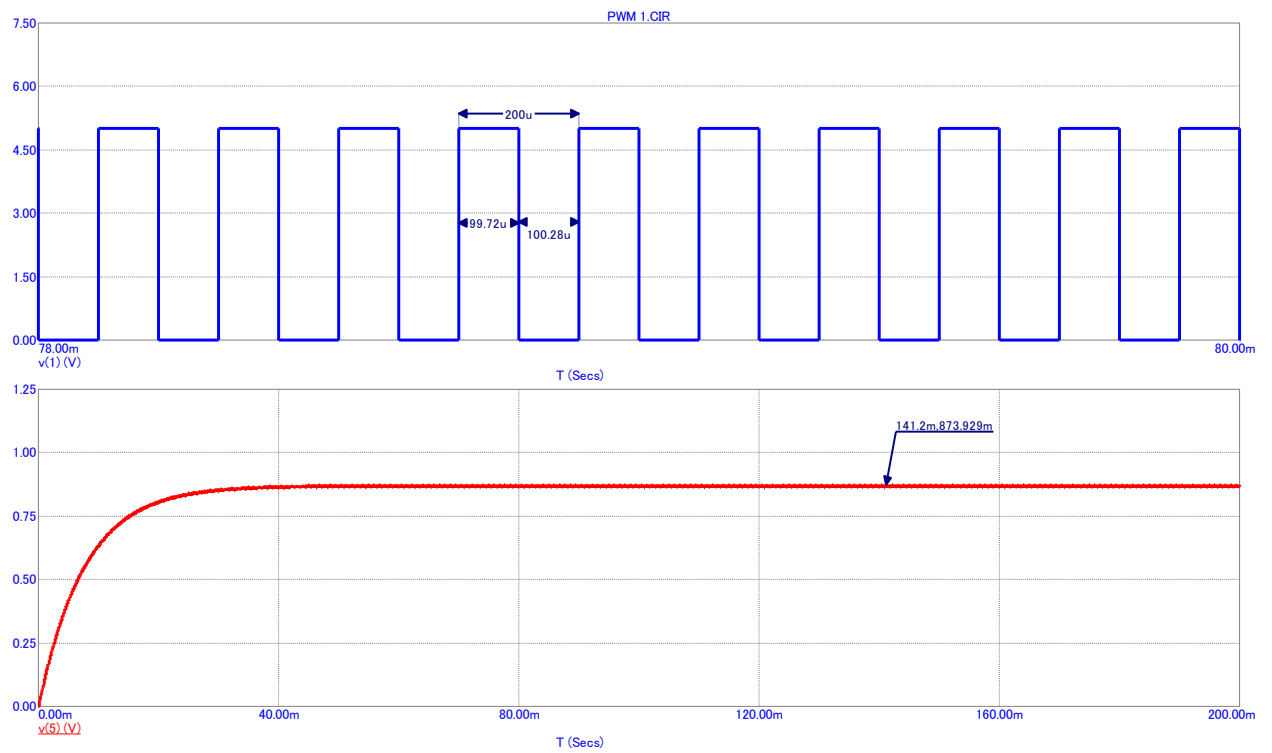
D, %	U_{LD} , V	D, %	U_{LD} , V	D, %	U_{LD} , V
0%	0	35%	0.617	70%	1.207
5%	0.106	40%	0.702	75%	1.291
10%	0.191	45%	0.786	80%	1.374
15%	0.277	50%	0.871	85%	1.458
20%	0.362	55%	0.955	90%	1.541
25%	0.447	60%	1.039	95%	1.623
30%	0.532	65%	1.123	100%	1.684

Turint visus matavimų duomenis, nubrėžta įtampos U_{LD} priklausomybė nuo impulsų pločio santykio su periodu *D*, kuri pateikta 6.2.2 paveiksle.



6.2.2 pav. Keitiklio išėjimo įtampos U_{LD} priklausomybė nuo keičiamų impulsų pločio santykio su periodu *D*

6.2.3 paveiksle, pateiktas matuojamos įtampos U_{LD} iš šaltinio *Vimp* generuojamo impulso pavyzdys: viršutiniame grafike pavaizduotas impulsų plotis, o apačioje – įtampos grafikas. Grafikai pamatuoti, kai impulsų pločio santykis su periodu yra 50 %.



6.2.3 pav. Viršuje generuojamų impulsų grafikas, apačioje matuojamos keitiklio išėjime įtampos U_{LD} grafikas, kai impulsų santykis su periodu 50 %

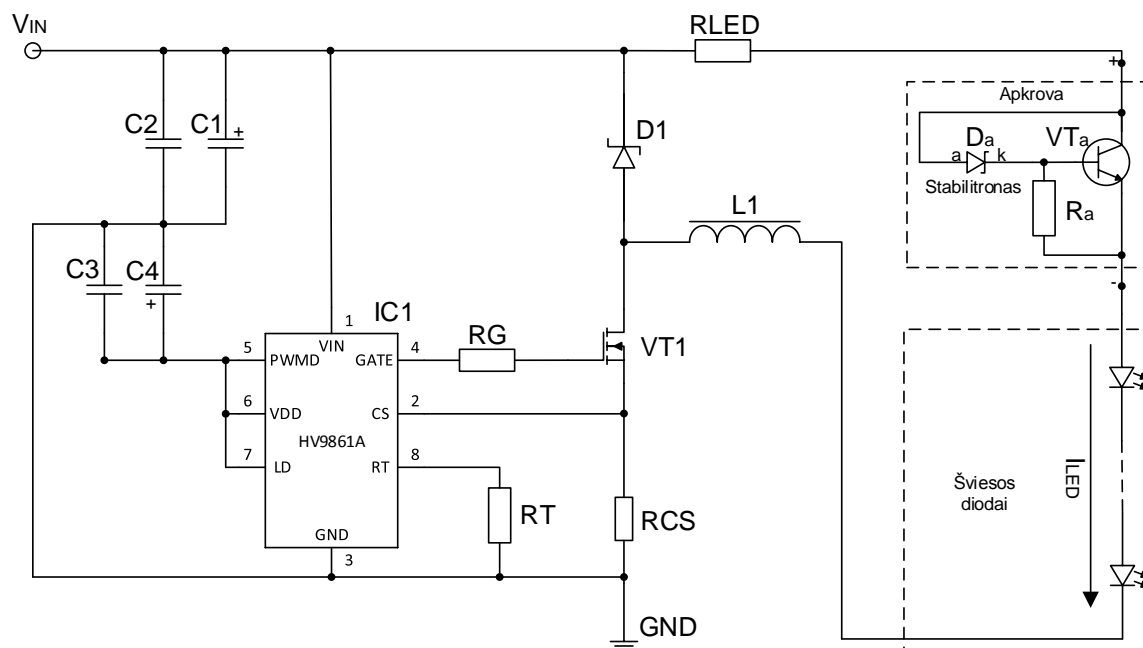
7 EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

7.1 Įtampą žeminančių maitinimo šaltinių tyrimas

Parinkus visus tyrimui projektuojamo įtampą žeminančio maitinimo šaltinio elementų parametrus, buvo atlikta schemas, kuri pateikta 7.1.1 paveiksle, eksperimentinė analizė. Eksperimentinė analizė atliekama dviem maitinimo šaltiniam, nes likusieji du yra identiški. Tam tikslui sulituojiama bandoma maitinimo šaltinio schema [13][14][15][21][22][23]. Eksperimento metu naudojama tokia įranga:

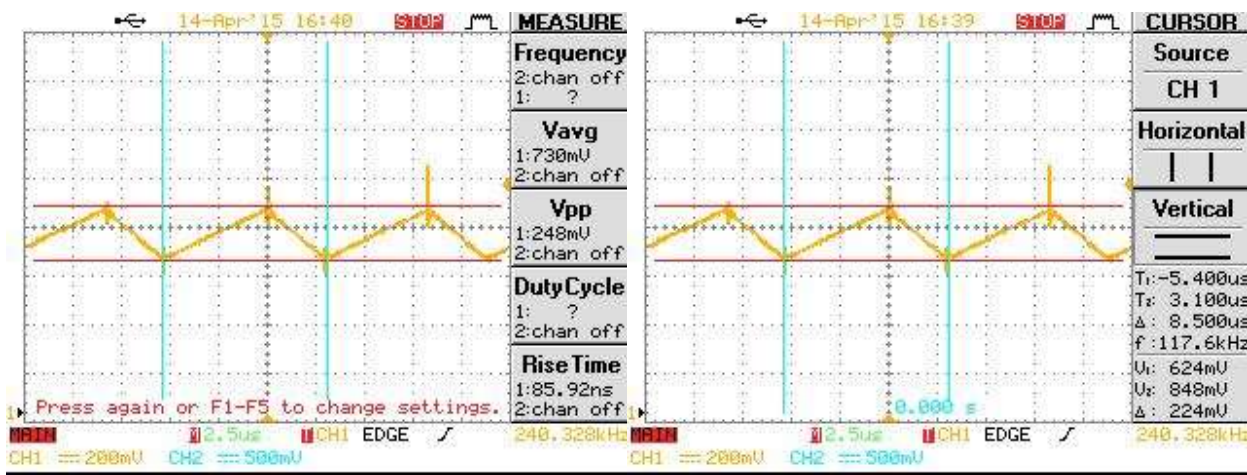
- litavimo stotelė;
- skaitmeninis oscilografas;
- nuolatinės įtampos maitinimo šaltinis;
- impulsų generatorius;
- apkrovos, kurias sudaro papildomos apkrovos, šviesos diodai ir $1\ \Omega$ rezistoriai, skirti matuoti išėjimo charakteristikoms. Parinkta tokia apkrova, nes apkrovos įtampa turi būti $30\ V$.

Norint eksperimentiškai ištirti šviesos diodų maitinimo šaltinius bei jų apkrovas, reikia turėti atitinkamus kiekius šviesos diodų. Tyrime buvo naudojami tik 6 vienetai kiekvienos rūšies šviesos diodų, todėl buvo reikalingos papildomos apkrovos, kurias sudarė NPN poliarumo bipoliarūs tranzistorius, stabilitronas bei rezistorius. Stabilitronas, prijungtas tarp kolektoriaus ir bazės, parinktas pagal tai, kokios įtampos vertės trūksta apkrovoje, kad neperdegtų šviesos diodai. Pavyzdžiui, jei vieno šviesos diodo maitinimo įtampa yra $2,85\ V$, o tyrime naudojami 6 diodai, tai bendra visų diodų įtampa yra $17,1\ V$. Tada stabilitrono įtampa yra $13\ V$ ($30\ V - 17,1\ V = 12,9\ V$). Bazėje pradeda tekėti srovė ir tranzistorius atsidaro tik tada, jei kolektoriaus įtampa yra tokia kaip stabilitrono. Jungimo schema pateikta bendroje maitinimo šaltinio schemoje (7.1.1 pav.). Kiekvienos apkrovos tranzistoriaus aušinimui yra naudojamas radiatorius.



7.1.1 pav. Eksperimentinė maitinimo šaltinio schema be valdymo grandies

Pradžioje schema prijungiama maksimalios srovės režimu, kad būtų galima ištirti maksimalius šaltinių parametrus. Išmatuojami įvairūs parametrai, gautos charakteristikos pateiktos oscilogramose.

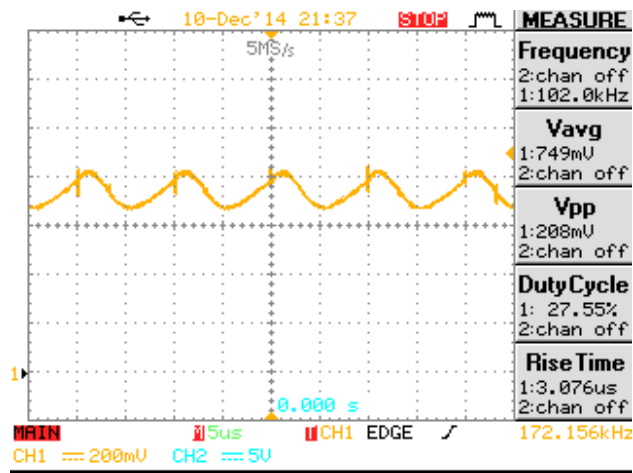


7.1.2 pav. Išėjimo srovės I_{LED} grafikai: kairėje parodytas srovės dydis, dešinėje – periodas

Oscilografu išmatuojama išėjimo srovės I_{LED} išjungimo laikas T_{off} (7.1.2 pav.) lygus $3,1 \mu s$, kas yra artima teoriškai apskaičiuotajam ($3,29 \mu s$).

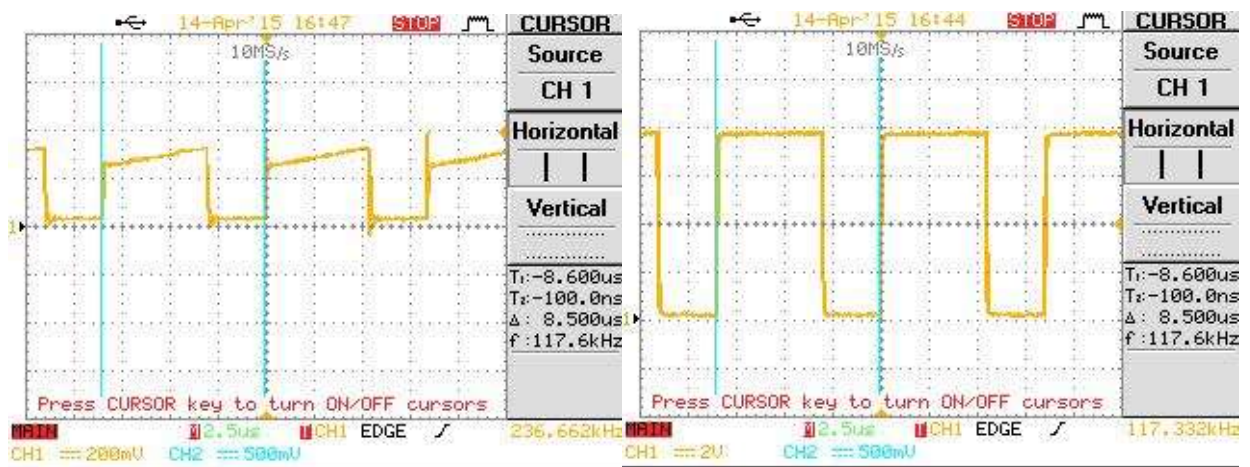
Išmatuotos schemos veikimo periodas yra lygus $8,50 \mu s$. Jis šiek tiek skiriasi nuo teoriškai apskaičiuotojo, tačiau yra artimas (apskaičiuotas $8,74 \mu s$). Kadangi skiriasi periodai, tai šiek tiek skiriasi ir dažniai. Teoriškai apskaičiuotas apie $114 kHz$, o eksperimento metu buvo gauta apie $117 kHz$.

Norint sumažinti triukšmus, atsirandančius dėl aukšto dažnio, lygiagrečiai šviesos diodų apkrovai prijungiamas plėvelinis kondensatorius. 7.1.3 paveiksle pateiktoje oscilogramoje matosi, kaip pasikeičia išėjimo srovės grafikas.



7.1.3 pav. Išėjimo srovės I_{LED} grafikas, ant apkrovos prijungus plėvelinį kondensatorių

Išmatuotos tranzistoriaus ištakos (angl. *Source*) ir užtūros (angl. *Gate*) įtampos vertės ir pateiktos oscilogramos (žr. 7.1.4 pav.).



7.1.4 pav. Tranzistoriaus ištakos V_{source} (kairėje) ir užtūros V_{gate} (dešinėje) įtampos oscilogramos

Išmatavus visas charakteristikas apskaičiuojamas įtampą žeminančio maitinimo šaltinio naudingumo koeficientas η . Pirminio nuolatinės įtampos maitinimo šaltinio duomenys eksperimento metu buvo: įtampa $V_{IN} = 48,6 \text{ V}$, srovė $I_{IN} = 0,505 \text{ A}$. Tiriamojo šaltinio apkrovos duomenys: įtampa $V_{LED} = 32,4 \text{ V}$, srovė $I_{LED} = 0,730 \text{ A}$. Turint šiuos duomenis, atliekami naudingumo koeficiento skaičiavimai:

- įėjimo grandinės galia P_{IN} :

$$P_{IN} = V_{IN} \cdot I_{IN} = 48,6 \text{ V} \cdot 0,505 \text{ A} = 24,543 \text{ W}; \quad (6.1.1)$$

- išėjimo grandinės galia P_{OUT} :

$$P_{OUT} = V_{LED} \cdot I_{LED} = 32,4 V \cdot 0,730 A = 23,652 W; \quad (6.1.2)$$

➤ naudingumo koeficientas η :

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{23,652 W}{24,543 W} = 0,96. \quad (6.1.3)$$

Naudingumo koeficientas gaunamas ganėtinai aukštas. Šaltinio elementai parinkti tinkamai. Tranzistorius, Šotkio diodas, ritė ir kiti svarbūs elementai nekaista, elementai nereikalauja papildomo aušinimo. Tačiau šis naudingumo koeficientas tik pačio įtampą žeminančio šviesos diodų maitinimo šaltinio. Jis bus kiek mažesnis įvertinus ir pirminį izoliuotą nuolatinės srovės maitinimo šaltinį.

Išmatavus visas reikiamas charakteristikas, palyginami svarbiausi išmatuoti parametrai su apskaičiuotais rezultatais ir pateikti 7.1.3 lentelėje.

7.1.3 lentelė. Gautų rezultatų palyginimas

	Teoriniai rezultatai	Eksperimentiniai rezultatai	Santykinė paklaida, %
V_{LED}, V	30,00	31,50	4,76
I_{LED}, A	0,70	0,73	4,11
f, kHz	114,00	117,65	3,10
$T_{ON}, \mu s$	5,45	5,40	0,93
$T_{OFF}, \mu s$	3,29	3,10	6,13

Skaičiuojant santykinę paklaidą naudojama formulė:

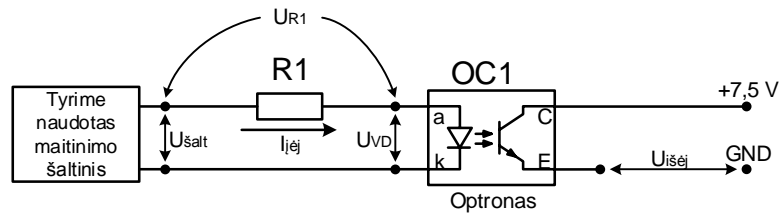
$$\Delta\% = \frac{|Eksperimento rezultatai - Teoriniai rezultatai|}{Eksperimentiniai rezultatai} \cdot 100\%. \quad (6.1.4)$$

Remiantis gautais rezultatais, teoriškai apskaičiuoti rezultatai nedaug skiriasi realiai gautų rezultatų. Didžiausia paklaida siekia tik 6 %.

7.2 Impulso pločio signalo keitiklio į nuolatinės įtampos lygį eksperimentinis tyrimas

Šis keitiklis yra skirtas impulso pločio signalą keisti į nuolatinės įtampos lygį. Jis yra izoliuotas nuo impulsų generatoriaus tranzistoriniu optronu.

Norint maksimaliai išnaudoti keitiklio ir tranzistorinio optrono parametrus, reikia išmatuoti optrono išėjimo įtampos priklausomybę nuo įėjimo srovės. Tuo tikslu optrono įėjime nuosekliai prijungiamas rezistorius RI , prie kolektoriaus išvado prijungiama maitinimo įtampa, kuri atstoja realią maitinimo šaltinyje suformuotą 7,5 V įtampą. Įėjime prijungiama nuolatinė įtampa, ji keičiama, o išėjime (emiterio išvadas) matuojama gaunama įtampos vertė. 7.2.1 paveiksle pateikta eksperimento schema [24].



7.2.1 pav. Optrono charakteristikų matavimo tyrimo schema

7.2.1 lentelėje pateikti gauti rezultatai.

7.2.1 lentelė. Išmatuotos optrono charakteristikos

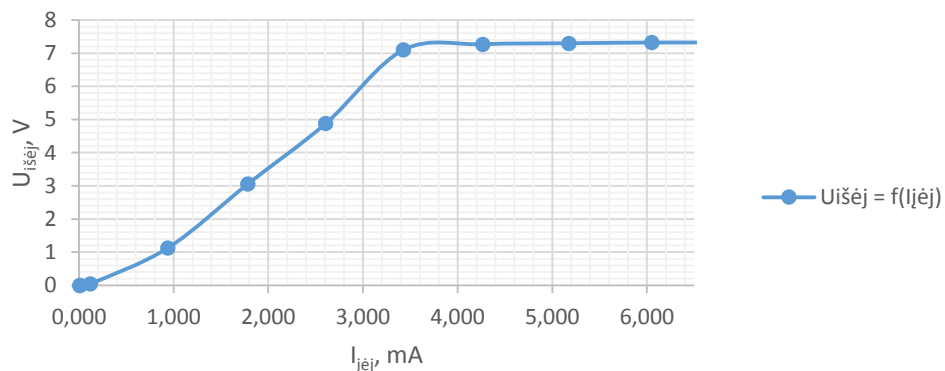
$U_{\text{šalt}}, \text{V}$	U_{R1}, V	U_{VD}, V	$I_{\text{įėj}}, \text{mA}$	$U_{\text{išėj}}, \text{V}$
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,500	0,007	0,493	0,013	0,000
1,000	0,068	0,932	0,121	0,047
1,500	0,527	0,973	0,941	1,130
2,000	1,000	1,000	1,786	3,060
2,500	1,460	1,040	2,607	4,880
3,000	1,920	1,080	3,429	7,100
3,500	2,390	1,110	4,268	7,270
4,000	2,900	1,100	5,179	7,300
4,500	3,390	1,110	6,054	7,320
5,000	3,880	1,120	6,929	7,320

Iš 7.2.1 lentelės matosi, kad vidutinė optrone esančio diodo pn sandūros įtampa U_{VD} yra apytiksliai $1,1 \text{ V}$. Šio optrono duomenų pase pateikta, kad įėjime tekant 20 mA srovei, vidutinė pn sandūros įtampa yra $1,2 \text{ V}$. Skaičiuojamu atveju srovė nesiekia 20 mA vertės, todėl pn sandūros įtampa truputi žemesnė.

Įėjimo grandinėje tekanti srovė:

$$I_{\text{įėj}} = \frac{U_{\text{šalt}} - U_{VD}}{R1} = \frac{U_{R1}}{R1} = \frac{U_{\text{įėj}}}{560 \Omega}. \quad (7.2.1)$$

7.2.2 paveiksle pateikiama išėjimo įtampos priklausomybės nuo įėjimo srovės charakteristika, kai $R1 = 560 \Omega$.

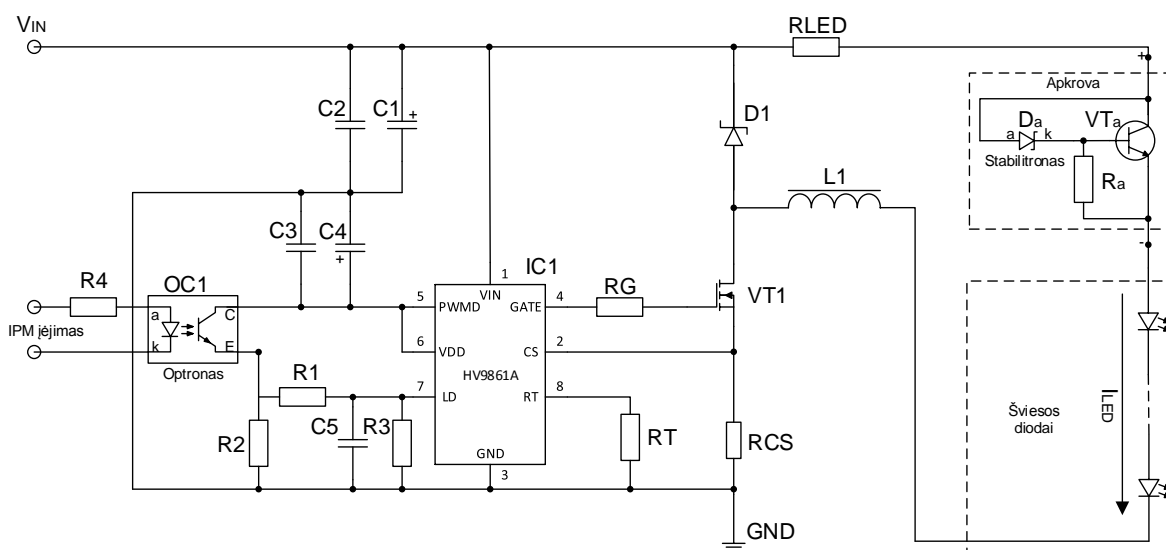


7.2.2 pav. Optrono išėjimo įtampos $U_{\text{išėj}}$ priklausomybės nuo įėjimo srovės $I_{\text{įėj}}$ grafikas

Iš charakteristikos matosi, kad įėjimo srovei pasiekus apie $3,4 \text{ mA}$ vertę, oprotone esantis tranzistorius įsisotina, todėl reikia parinkti schemas įėjimo grandies rezistoriaus vertę tokia, kad prijungus 5 V maitinimo įtampą, įėjimo grandinėje tekėtų $3,4 \text{ mA}$ srovė. Taip buvo apskaičiuota įėjimo grandies rezistoriaus vertė:

$$R1 = \frac{U_{\text{sat}} - U_{VD}}{I_{\text{įėj}}} = \frac{5V - 1,1V}{3,4 \text{ mA}} = 1,147 \Omega \approx 1,1 \text{ k}\Omega. \quad (7.2.2)$$

Parinkus tinkamą rezistoriaus vertę, sudaryta schema tolimesniems matavimams atlikti (7.2.3 pav.).



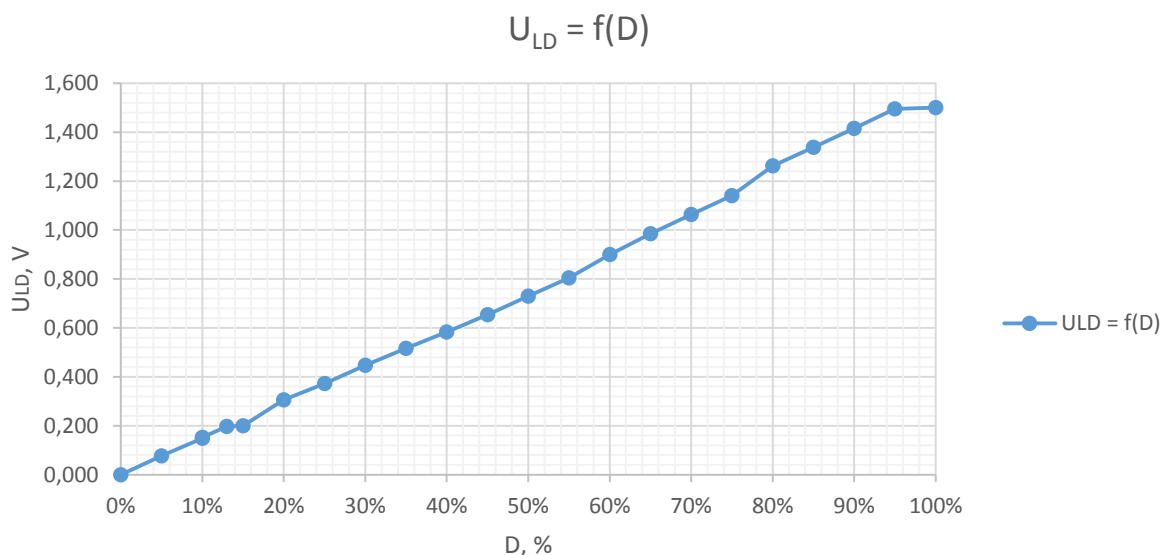
7.2.3 pav. Šviesos diodų maitinimo šaltinio schema

Tiriant maitinimo šaltinį, impulso pločio moduliacijos IPM įėjime (7.2.3 pav.) buvo generuojami 5 kHz dažnio 5 V įtampos impulsai. Pagal techninę valdiklio IC1 dokumentaciją [13], valdiklis veikia, kai LD išvado įtampos U_{LD} diapazonas yra nuo 200 mV (150 mV jau išjungia valdiklį) iki $1,5 \text{ V}$. Tolygiai keičiant įtampos U_{LD} vertę, keičiasi ir valdiklio išėjimo srovė nuo minimalios iki maksimalios. Keičiant impulsų plotčio santykį su periodu buvo matuojama nuolatinė įtampa 7-ame valdiklio išvade (LD) ir maitinimo šaltinio išėjimo srovė I_{LED} . Gauti rezultatai pateikti 7.2.2 lentelėje.

7.2.2 lentelė. Maitinimo šaltinio valdymo charakteristikos

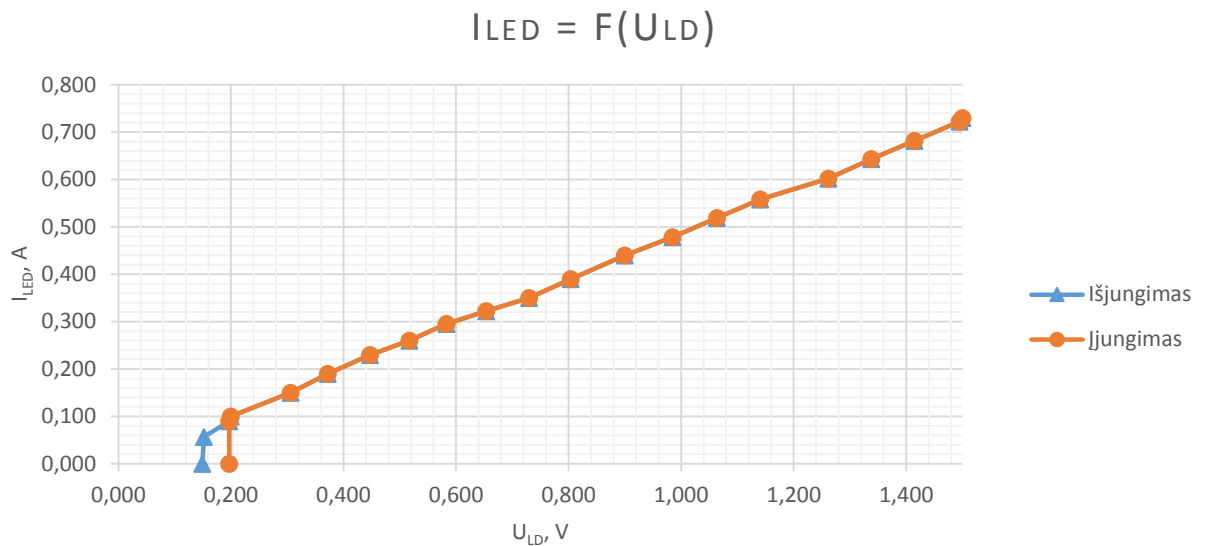
Įjungimas			Įjungimas			Išjungimas			Išjungimas		
D, %	U_{LD} , V	I_{LED} , A	D, %	U_{LD} , V	I_{LED} , A	D, %	U_{LD} , V	I_{LED} , A	D, %	U_{LD} , V	I_{LED} , A
0%	0,000	0,000	45%	0,654	0,322	0%	0,000	0,000	45%	0,654	0,322
5%	0,076	0,000	50%	0,730	0,350	5%	0,076	0,000	50%	0,730	0,350
9%	0,149	0,000	55%	0,804	0,390	9%	0,149	0,000	55%	0,804	0,390
10%	0,152	0,000	60%	0,900	0,440	10%	0,152	0,057	60%	0,900	0,440
13%	0,197	0,090	65%	0,985	0,478	13%	0,197	0,090	65%	0,985	0,478
15%	0,200	0,100	70%	1,064	0,519	15%	0,200	0,100	70%	1,064	0,519
20%	0,306	0,150	75%	1,141	0,558	20%	0,306	0,150	75%	1,141	0,558
25%	0,372	0,190	80%	1,262	0,602	25%	0,372	0,190	80%	1,262	0,602
30%	0,447	0,230	85%	1,338	0,643	30%	0,447	0,230	85%	1,338	0,643
35%	0,517	0,260	90%	1,415	0,682	35%	0,517	0,260	90%	1,415	0,682
40%	0,583	0,295	95%	1,495	0,722	40%	0,583	0,295	95%	1,495	0,722
45%	0,654	0,322	100%	1,500	0,730	45%	0,654	0,322	100%	1,500	0,730

7.2.4 pav. parodyta gauta įtamos U_{LD} priklausomybė nuo impulsų pločio santykio su periodu D charakteristika.



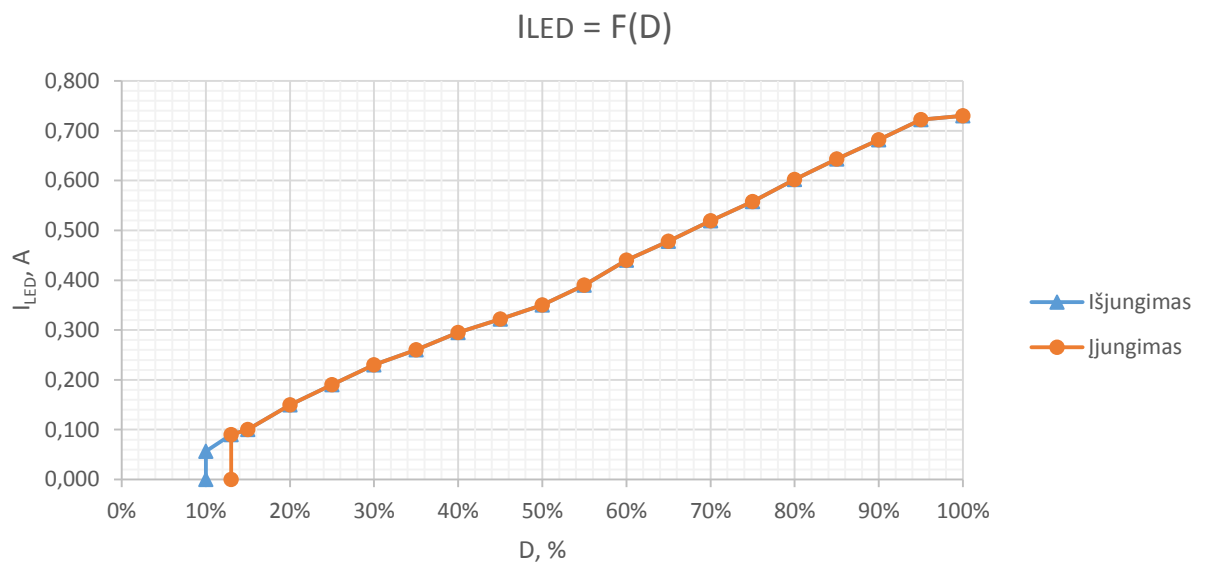
7.2.4 pav. Valdymo įtamos U_{LD} priklausomybė nuo keičiamo impulsų pločio santykio su periodu D

Iš 7.2.4 paveiksle esančio grafiko matosi, kad keičiant impulsų pločio santykį su periodu D , tiesiškai keičiasi ir nuolatinės įtamos lygis. Išmatuota išėjimo srovės I_{LED} priklausomybė nuo valdymo įtamos U_{LD} dydžio pateikta 7.2.5 paveiksle.



7.2.5 pav. Išmatuota šaltinio išėjimo srovės I_{LED} priklausomybė nuo valdymo įtampos U_{LD}

Išmatuota išėjimo srovės I_{LED} priklausomybė nuo impulsų pločio santykio su periodu D parodyta 7.2.6 pav. Tai pilna charakteristika, parodanti kaip signalas iš impulsų generatoriaus praeina ilgą kelią (optroną, įtampos keitiklį, maitinimo šaltinį) ir valdo srovę per šviesos diodus.

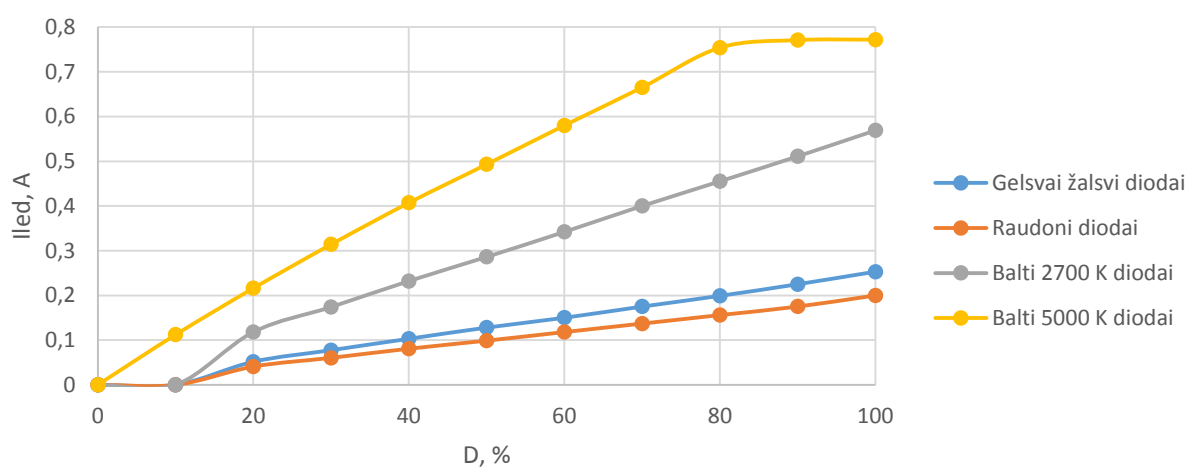


7.2.6 pav. Išėjimo srovės I_{LED} priklausomybė nuo impulsų pločio santykio su periodu D

Analogiškai buvo išmatuotos ir kitų šaltinių charakteristikos. Gauti rezultatai pateikti 7.2.3 lentelėje ir atvaizduoti grafiškai 7.2.7 pav.

7.2.3 lentelė. Keturių kanalų šviesos diodų maitinimo šaltinio srovės valdymo rezultatai.

D, %	Luxeon Z Lime	Luxeon Z Red	Luxeon 3020 2700 K	Luxeon 3020 5000 K
	I_{LED}, A	I_{LED}, A	I_{LED}, A	I_{LED}, A
0	0	0	0	0
10	0	0	0	0,112
20	0,0516	0,0408	0,118	0,216
30	0,0775	0,0604	0,174	0,314
40	0,103	0,0808	0,232	0,407
50	0,128	0,0988	0,286	0,493
60	0,15	0,118	0,342	0,58
70	0,175	0,137	0,4	0,665
80	0,199	0,156	0,455	0,754
90	0,225	0,175	0,511	0,771
100	0,253	0,2	0,569	0,772



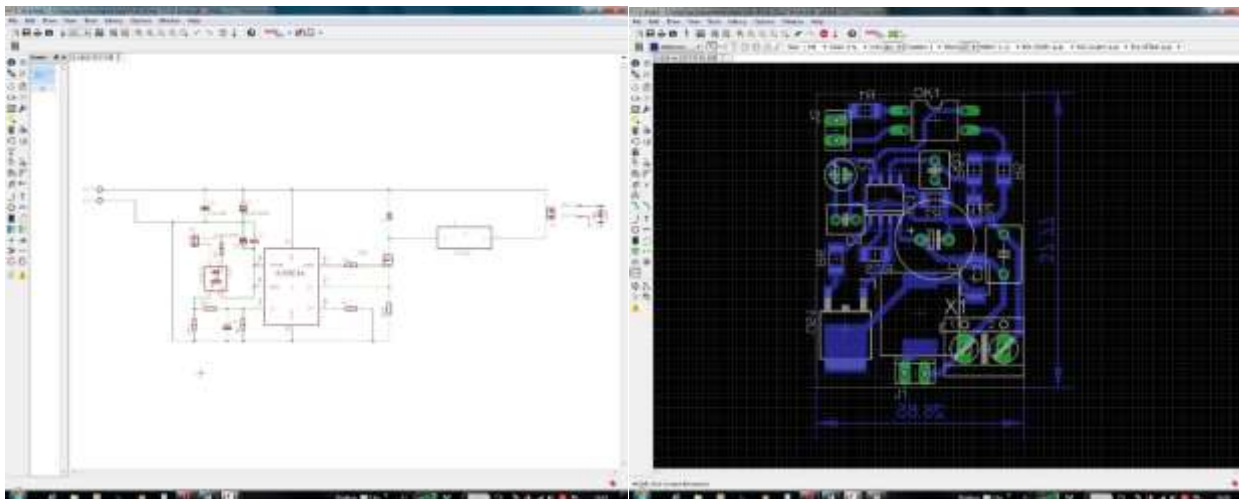
7.2.7 pav. Keturių kanalų šviesos diodų maitinimo šaltinio srovės valdymo charakteristikos

Iš gautų rezultatų matosi, kad visų kanalų šviesos diodų srovės valdomos tiesiškai. Spalvinių šviesos diodų maksimalios srovės gaunamos artimos projektuojamoms 250 mA srovėms. Baltų šviesos diodų srovės turi būti apie 700 mA. Matuojant skiriasi tik 2700 Kelvinų šviesos diodų maksimali srovė. Ji gauta apie 600 mA. Paklaidos atsiranda, nes kiekvieno maitinimo šaltinio apkrovoje naudojami diodai palaiko skirtingas maitinimo įtampas. Jeigu apkrovos įtampos neatitinka, tai neatitinka ir srovės, tekančios šviesos diodais.

7.3 Spausdinto montažo plokščių projektavimas ir tyrimas

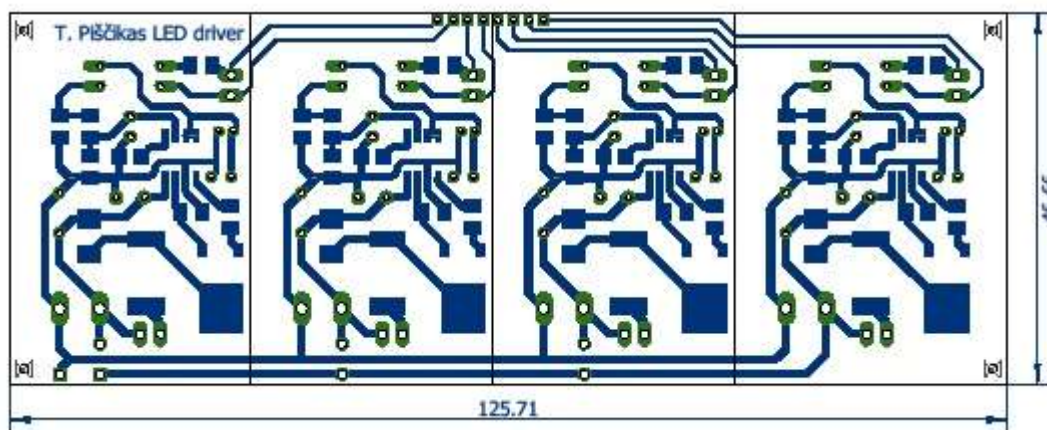
7.3.1 Įtampą žeminančių maitinimo šaltinių plokštė

Plokštės projektavimui ir braižymui buvo naudojama „AUTODESK Eagle 8.1.0“ [25][26] projektavimo ir braižymo programa. Pirmiausiai buvo įvedama šaltinio schema, o po to visi elementai perkeliama į spausdinto montažo plokštės projektavimo etapą. Tokiu būdu buvo lengviau išvengti klaidų ir galima lengvai redaguoti tarp dviejų langų (žr. 7.3.1.1 pav.).



7.3.1.1 pav. Programos „AUTODESK Eagle 8.1.0“ projektavimo langas kairėje ir braižymo - dešinėje

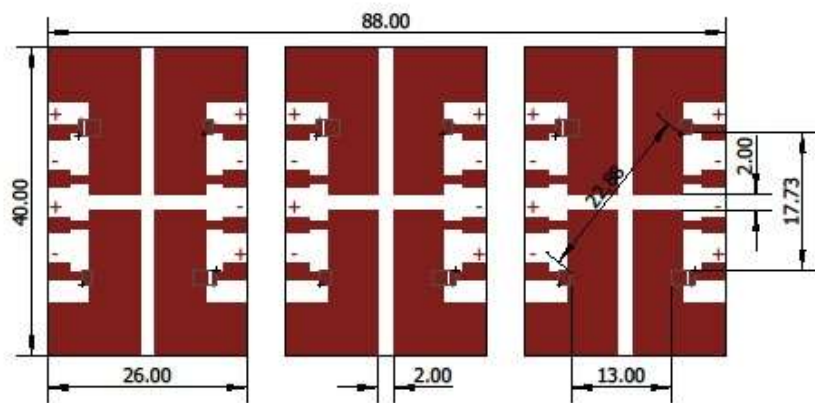
Suprojektavus plokštę gaunamas juodai baltas takelių vaizdas. Plokštės gamybai buvo taikomas fotorezistyvus išdėsinimo metodas, turimas takelių vaizdas atspausdinamas ant skaidruolės. Suprojektuotos spausdinto montažo plokštės maketas yra – $37.77\text{mm} \times 26.65\text{mm}$ dydžio (7.3.1.2 pav.).



7.3.1.2 pav. Spausdinto montažo plokštės brėžinys

7.3.2 Šviesos diodų plokštelės

Atsižvelgiant į švietuve naudojamus šviesos diodus, buvo suprojektuotos šviesos diodų plokštelės, takeliai bei aušinimas. Pagrindiniai gamintojo reikalavimai, į kuriuos buvo atsižvelgiama: minimalus atstumas tarp takelių reikalaujamas ne mažesnis nei $0,2\text{ milimetras}$. Takeliai buvo pagaminti tokia pačia tvarka, kaip ir maitinimo šaltinių plokštė. Šviesos diodai buvo lituojami fenu naudojant 180°C lydymosi temperatūros bešvinę litavimo pastą, kaitinant ją ne daugiau nei 200°C temperatūra. Projektuojamų takelių vaizdas parodytas paveiksle.



7.3.2.1 pav. Spausdinto montažo šviesos diodų plokštės brėžinys

Kaip matyti iš paveikslo, tarp gretimų diodų išdėstymo buvo laikomasi *13-22 milimetrų* atstumo. Atstumai nedideli, kadangi maišant spalvas, turi skirtingos spalvos šviesti iš vieno nedidelio šviesos taško.

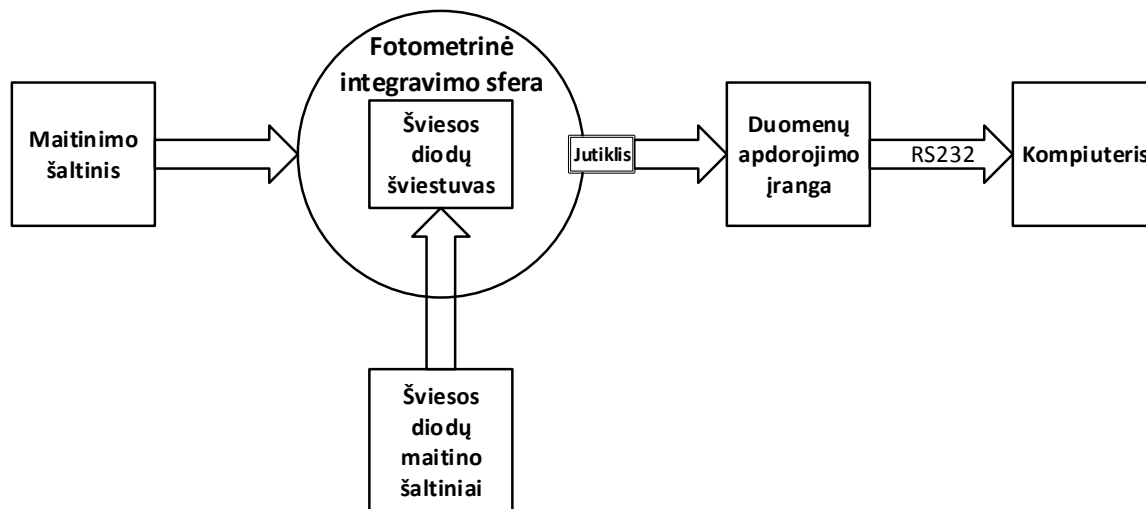
7.4 Apšvietimo sistemos spalvų maišymo tyrimas

Ištyrus visos sistemos veikimo principus bei išmatavus pagrindinius parametrus, buvo atliekamas spalvų maišymo tyrimas. Tyrimas atliktas įmonėje „UAB Žilinskis ir KO“, kurioje yra gamintojo „Everfine“ fotometrinių integravimo sferų šviesos parametrų matuoti. Sfera yra 1,5 metro skersmens, jos nuotrauka pateikta 7.4.1 paveiksle. Sferoje yra šviesos parametrus matuojantis jutiklis, į kurį patenka šviesa. Sfera yra suprojektuota taip, kad viduje esančio matuojamo šviesos šaltinio šviesa difuziniu būdu atsispindėtų vidiniame sferos paviršiuje ir visoje sferoje šviesa pasklistų tolygiai. Todėl nepriklausomai nuo to, kurioje sferos paviršiaus vietoje yra jutiklis, matuojami parametrai gaunami identiški.



7.4.1 pav. Tyrime naudota fotometrinių integravimo sfera

Tyrimui reikalinga įranga: sfera su parametų jutikliu, išmatuotų parametų apdorojimo įranga ir kompiuteris. Tyrimo blokinė schema pateikta pav. Parametų apdorojimo įranga jungiama prie kompiuterio per RS232 sąsaja, ir gautiems rezultatams matyti ir apdoroti naudojama programa „Everfine“ [27].



7.4.2 pav. Spalvinių parametų matavimo įrangos blokinė schema

Tyrimo naudojamos suprojektuotos dvi šviesos diodų plokštelės, sudėtos viena nuo kitos, kadangi tokiu būdu sferoje geriau pasiskirsto šviesa – gaunasi identiškas švietimas standartinei kaitrinei lempai. Pirmiausiai ištyrinėti visų tipų šviesos diodai, kiekvieną iš jų atskirai įjungiant maksimalia galia. Gauti rezultatai pateikti ir palyginti 7.4.1 lentelėje.

7.4.1 lentelė. Gautų tyrimo rezultatų palyginimas su kompiuterinio modeliavimo rezultatais

Parametras	Šviesos diodas	Modeliavimo rezultatas	Tyrimo rezultatas
<i>Šviesos srautas, lm</i>	2700K baltas	400	377,64
	5000K baltas	400	492,03
	Gelsvai žalsvos spalvos	600	593,48
	Raudonos spalvos	150	125,3
<i>Spalvų perteikimo CRI indeksas</i>	2700K baltas	80	81,5
	5000K baltas	80,7	83,7
	Gelsvai žalsvos spalvos	41,3	44,8
	Raudonos spalvos	-18,1	15
<i>Raudonos spalvos atgavos koeficientas R9</i>	2700K baltas	-0,5	12
	5000K baltas	-1,9	20
	Gelsvai žalsvos spalvos	-123,3	0
	Raudonos spalvos	-326,3	0
<i>Koreliuota spalvinė temperatūra, K</i>	2700K baltas	2705	2734
	5000K baltas	5122	4952
	Gelsvai žalsvos spalvos	4164	4190
	Raudonos spalvos	1630	1001
<i>Spinduliavimo galia, W</i>	2700K baltas	1,227	1,207
	5000K baltas	1,221	1,573
	Gelsvai žalsvos spalvos	1,28	1,278
	Raudonos spalvos	0,762	0,6497

Didesnė dalis matavimo rezultatų nedaug skiriasi nuo kompiuteriu modeliūtų rezultatų. Šviesos srautai, spalvinės temperatūros bei spinduliavimo galia praktiškai nesiskiria, skiriasi tik spalvų perteikimo indeksas bei R9 koeficientas. Galima daryti prielaidą, kad kompiuterinis modeliavimas nėra tinkamas skaičiuoti koeficientus, kai yra mažas spinduliavimo srautas.

Atlikus skirtingų šviesos diodų tyrimus, buvo ištirtas ir spalvų maišymas. Geriausi apšvietimo rezultatai gauti maišant šaltus baltus šviesos diodus su raudonais ir gelsvai žalsvais šviesos diodais. Gauti rezultatai pateikti ir palyginti su modeliavimo rezultatais 7.4.2 lentelėje, o grafiniai matavimo rezultatai pateikti [priede 3](#).

7.4.2 lentelė. Gautų tyrimo rezultatų palyginimas su kompiuterinio modeliavimo rezultatais

Parametras	Pirmas apšvietimo pasirinkimas			Antras apšvietimo pasirinkimas		
	Modeliavimas Nr 1	Eksperimentas Nr 1	Santykinė paklaida	Modeliavimas Nr 2	Eksperimentas Nr 2	Santykinė paklaida
<i>Šviesos srautas, lm</i>	580	519,06	11,74%	950	830,33	14,41%
<i>x koordinatė</i>	0,3866	0,3875	0,23%	0,4178	0,4176	0,05%
<i>y koordinatė</i>	0,3713	0,3741	0,75%	0,4108	0,4107	0,02%
<i>Spalvinė temperatūra, K</i>	3790	3789	0,03%	3401	3405	0,12%
<i>Spalvų perteikimo indeksas CRI</i>	94,3	94,5	0,21%	90,9	91,4	0,55%
<i>Indeksas R1</i>	99	98	1,02%	95,4	96	0,62%
<i>Indeksas R2</i>	95,1	95	0,11%	90,1	91	0,99%
<i>Indeksas R3</i>	87,6	89	1,57%	81,4	82	0,73%
<i>Indeksas R4</i>	93,1	94	0,96%	93,2	94	0,85%
<i>Indeksas R5</i>	96,7	96	0,73%	91,8	93	1,29%
<i>Indeksas R6</i>	91,8	92	0,22%	86,1	87	1,03%
<i>Indeksas R7</i>	94,3	95	0,74%	92,7	93	0,32%
<i>Indeksas R8</i>	96,6	97	0,41%	96,2	95	1,26%
<i>Indeksas R9</i>	92,6	92	0,65%	88,2	95	7,16%
<i>Spinduliavimo galia, W</i>	1,799	1,65	9,03%	2,747	2,471	11,17%

Skaičiuojant santykinę paklaidą naudojama formulė:

$$\Delta\% = \frac{|Eksperimento rezultatai - Modeliavimo rezultatai|}{Eksperimento rezultatai} \cdot 100\%. \quad (6.4.1)$$

Iš gautų rezultatų matome, kad eksperimentinio tyrimo rezultatai nedaug skiriasi nuo kompiuterinio modeliavimo rezultatų. Todėl galima teigti, kad sfera yra sukalibruota tinkamai ir gauti rezultatai yra teisingi. Remiantis šiais rezultatais galima daryti išvadą, kad būtent tokio tipo apšvietimą būtų tikslinga įprogramuoti į valdymo programą, kad apšvietimo vartotojas galėtų nesunkiai pasiekti aukštų parametrų apšvietimą. Gautų apšvietimo taškų pagrindiniai parametrai

yra ganėtinai aukšti: spalvų perteikimo CRI indeksas siekia 91-94, o raudonos spalvos atgavos koeficientas R9 siekia 92-95.

IŠVADOS

1. Atlikta techninė literatūros analizė parodo, kad kuriamai valdomų parametrų apšvietimo sistemai tinkamiausi yra įtampą žeminantys maitinimo šaltiniai. Šie šaltiniai pasižymi aukštu naudingumo koeficientu, yra nedidelių matmenų, turi galimybę valdyti apkrovos srovę.
2. Remiantis kompiuteriniu šviesos parametrų modeliavimo rezultatais nustatyta, kad valdomų parametrų apšvietimo sistemai tikslinga naudoti šiltus ir šaltus baltus bei spalvinius raudonus ir gelsvai žalsvus šviesos diodus, kuriuos maišant galima valdyti spalvinius apšvietimo parametrus.
3. Sukurtas valdymo signalų formavimo ir apdorojimo algoritmas ir parašyta programa leidžia valdyti apšvietimo sistemos parametrus išmaniuoju telefonu, turinčiu „Android“ arba „iOS“ operacinę sistemą.
4. Eksperimentinis maitinimo šaltinių tyrimai parodė, kad sukurtų įtampą žeminančių maitinimo šaltinių naudingumo koeficientas yra 96 %.
5. Naudojant fotometrinę integravimo sferą ištirta, kad maišant šiltus bei šaltus ir spalvinius raudonus bei gelsvai žalsvus šviesos diodus gaunamas spalvų perteikimo CRI indeksas 91-94, raudonos spalvos atgavos koeficientas R9 nuo 92 iki 95. Tokie apšvietimo sistemos parametrai yra aukšti.
6. Naudojant sukurtą valdomų parametrų apšvietimo sistemą galima reguliuoti apšvietimą ir netrikdyti paros cirkadinio ciklo – dienos metu galima sureguliuoti apšvietimą artimą natūraliam dienos šviesos apšvietimui, kuris turi daugiau mėlynos šviesos, o vakare - šiltesnį apšvietimą, turintį daugiau raudonos šviesos.

NAUDOTOS LITERATŪROS IR KITŲ INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. SCHUBERT, E. Fred. Light-Emitting Diodes: second edition. UK: Cambridge University Press, 2006. ISBN: 9780521865388, p. 422
2. CREE, Inc. LED Color Mixing: Basics and Background. USA, p. 23
3. SEESMART, Inc. How to Choose the Right LED Lighting Product Color Temperature. Application notes, p. 3
4. Straipsnis apie spalvų perteikimo koeficientus [žiūrėta 2016-05-15]. Prieiga per internetą: <http://www.eyelighting.com/resources/lighting-technology-education/general-lighting-basics/r9-color-rendering-value/>
5. NARENDRAN, N; DENG, L. Color Rendering Properties of LED Light Sources. NY: Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, p. 7
6. Gamintojo „OSRAM Sylvania“ programos „LED Color Calculator“ modeliavimo programa [žiūrėta 2016-05-15]. Prieiga per internetą: <https://www.sylvania.com/en-us/tools-and-resources/Pages/led-color-calculator.aspx>
7. Gamintojo „Lumileds“ programos „LED Color Mixing“ modeliavimo programa [žiūrėta 2016-05-15]. Prieiga per internetą: <http://lumileds.pnwsoft.com/RunPython.aspx?t=3>
8. Gamintojo „LUMILEDS“ LUXEON Z serijos šviesos diodų duomenų pasas [žiūrėta 2016-05-31]. Prieiga per internetą: <http://www.lumileds.com/uploads/415/DS105-pdf>
9. Gamintojo „LUMILEDS“ LUXEON 3020 serijos šviesos diodų duomenų pasas [žiūrėta 2016-05-31]. Prieiga per internetą: <http://www.lumileds.com/uploads/461/DS209-pdf>
10. Europos Sąjungos oficialusis leidinys: KOMISIJOS REGLAMENTAS (ES) 2015/1428. [žiūrėta 2016-05-15]. Prieiga per internetą: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A32015R1428>
11. WINDER, Steve. Power supplies for LED driving. USA: Newnes, 2008. ISBN: 978-0-7506-8341-8, p. 234
12. Izoliuoto „Mean Well“ maitinimo šaltinio duomenų pasas [žiūrėta 2016-05-15]. Prieiga per internetą: <http://www.meanwell.com/productPdf.aspx?i=247>
13. Kompanijos „Supertex Inc“ maitinimo šaltinio valdiklio HV9861A duomenų pasas [žiūrėta 2016-09-12]. Prieiga per internetą: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/hv9861a.pdf>
14. Kompanijos „Texas Instruments“ maitinimo šaltinio valdiklio LM3444 duomenų pasas [žiūrėta 2016-09-12]. Prieiga per internetą: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3444.pdf>

15. Kompanijos „Epcos“ tinklalapis [žiūrėta 2016-10-29]. Prieiga per internetą:
<http://en.tdk.eu/tdk-en/529796/products/product-catalog/inductors--coils-/smt-power-inductors--epcos->
16. METIVIER, R. Method for Converting a PWM Output to an Analog Output When Using Hall-Effect Sensor ICs. USA, p. 8
17. Aprašymas apie „Arduino“ valdiklius [žiūrėta 2016-11-13]. Prieiga per internetą:
http://wiki.robotiksmokykla.lt/doku.php?id=arduivadas_arduivadas
18. Informacija apie „Bluetooth“ modulio prijungimą prie valdiklio „Arduino UNO“ [žiūrėta 2016-11-17]. Prieiga per internetą:
http://www.bitstoc.com/image/data/Products/arduino_bluetooth_serial%20-%20Copy.jpg
19. „Bluetooth“ modulio prijungimo prie valdiklio „Arduino“ mokymai [žiūrėta 2016-11-28]. Prieiga per internetą: <https://create.arduino.cc/projecthub/user206876468/arduino-bluetooth-basic-tutorial-d8b737>
20. Valdiklių „Arduino“ programinė įranga [žiūrėta 2016-09-10]. Prieiga per internetą:
<https://www.arduino.cc/en/main/software>
21. Kompanijos „ON Semiconductor“ maitinimo šaltinio valdiklio NCP1200 duomenų pasas [žiūrėta 2016-10-25]. Prieiga per internetą
http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/NCP1200-D.PDF
22. Kompanijos „Vishay“ lauko tranzistoriaus IRFR110 duomenų pasas [žiūrėta 2016-10-29]. Prieiga per internetą: <http://www.vishay.com/docs/91265/sihfr110.pdf>
23. Maitinimo šaltinyje naudojamo Šotkio diodo duomenų pasas [žiūrėta 2016-10-29]. Prieiga per internetą: <http://www.promelec.ru/pdf/10mq100n.pdf>
24. Kompanijos „Lite-On“ tranzistorinio optrono LTV816 duomenų pasas [žiūrėta 2016-10-29]. Prieiga per internetą: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/LTV-8x6.pdf>
25. Spausdinto montažo plokščių projektavimo „CADSOFT Eagle 8.1.0“ programinė įranga [žiūrėta 2016-09-10]. Prieiga per internetą:
<https://www.autodesk.com/products/eagle/overview>
26. Spausdinto montažo plokščių projektavimo „CADSOFT Eagle 8.1.0“ programos elementų bibliotekos [žiūrėta 2016-09-10]. Prieiga per internetą:
https://www.element14.com/community/community/cadsoft_eagle/eagle_cad_libraries
27. Gamintojo „Everfine“ naudojamos fotometrines integravimo sferos aprašas bei programinė įranga [žiūrėta 2016-09-10]. Prieiga per internetą:
<http://www.everfine.net/productinfo.php?pid=193&fid=7>

PRIEDAS 1. SIGNALO FORMAVIMO IR APDOROJIMO PROGRAMOS KODAS, SKIRTAS IŠMANIESIEMS ĮRENGINIAMS, TURINTIEMS „ANDROID“ OPERACINĘ SISTEMA

```
// PWM LED ryškumo ir Bluetooth Serijinio Ryšio programa

int A_LED_Pin = 3;    // PWM išvadas Nr. 1
int B_LED_Pin = 9;    // PWM išvadas Nr. 2
int C_LED_Pin = 10;   // PWM išvadas Nr. 3
int D_LED_Pin = 11;   // PWM išvadas Nr. 4

// Arduino UNO 5 ir 6 išvadų dažnis pagal nutylėjimą yra 1kHz
// Arduino UNO 9, 10, 11 ir 3 išvadų dažnis pagal nutylėjimą yra 500Hz

// Kintamieji, skirti palaikyti ryškumo vertę nuo 0 (išjungta) iki 255 (maksimaliai įjungta)
int A_value = 0;
int B_value = 0;
int C_value = 0;
int d_value = 0;

char BluetoothData; // duomenys priimti iš "Bluetooth: serijinio ryšio"

void setup() {

    // Inicijuojami priskirti kintamieji kaip išėjimai
    pinMode(A_LED_Pin, OUTPUT);
    pinMode(B_LED_Pin, OUTPUT);
    pinMode(C_LED_Pin, OUTPUT);
    pinMode(D_LED_Pin, OUTPUT);

    //----- Nustatomas PWM dažnis D9 ir D10 išvadams -----
    TCCR1B = TCCR1B & B11111000 | B00000010;    // set timer 1 divisor to 8 for PWM frequency
    of 3921.16 Hz

    //----- Nustatomas PWM dažnis D3 ir D11 išvadams -----
    TCCR2B = TCCR2B & B11111000 | B00000010;    // set timer 2 divisor to 8 for PWM frequency
    of 3921.16 Hz

    // inicijuojama serijinė komunikacija
    Serial.begin(9600);
}

void loop() {

    // Apdorojama bet kokia informacija, ateinanti iš "Bluetooth" serijinio ryšio
    if (Serial.available())
    {
        BluetoothData = Serial.read(); // Gauti kitą vertę iš "Bluetooth" modulio
        if (BluetoothData == 'A') A_value = Serial.parseInt(); // Perskaityti A kanalo vertę
        if (BluetoothData == 'B') B_value = Serial.parseInt(); // Perskaityti B kanalo vertę
        if (BluetoothData == 'C') C_value = Serial.parseInt(); // Perskaityti C kanalo vertę
        if (BluetoothData == 'd') D_value = Serial.parseInt(); // Perskaityti D kanalo vertę
    }

    // Atnaujinti LED ryškumą
    analogWrite(A_LED_Pin, A_value);
    analogWrite(B_LED_Pin, B_value);
    analogWrite(C_LED_Pin, C_value);
    analogWrite(D_LED_Pin, D_value);

    delay(10);
}
```


PRIEDAS 2. SIGNALO FORMAVIMO IR APDOROJIMO PROGRAMOS KODAS SKIRTAS, IŠMANIESIEMS ĮRENGINIAMS, TURINTIEMS „IOS“ OPERACINĘ SISTEMA

```
#include <SoftwareSerial.h>

SoftwareSerial bluetooth(0, 1); // Priskiriami Bluetooth duomenų išvadai RX, TX
int A_LED_Pin = 3; // PWM išvadas Nr. 1
int B_LED_Pin = 9; // PWM išvadas Nr. 2
int C_LED_Pin = 10; // PWM išvadas Nr. 3
int D_LED_Pin = 11; // PWM išvadas Nr. 4
String receivedBluetoothString = ""; // duomenys priimti iš "Bluetooth" serijinio ryšio

void setup()
{
  // inicijuojama serijinė komunikacija
  bluetooth.begin(9600);

  // Inicijuojami priskirti kintamieji kaip išėjimai
  pinMode(A_LED_Pin, OUTPUT);
  pinMode(B_LED_Pin, OUTPUT);
  pinMode(C_LED_Pin, OUTPUT);
  pinMode(D_LED_Pin, OUTPUT);

  // Arduino UNO 5 ir 6 išvadų dažnis pagal nutylėjimą yra 1kHz
  // Arduino UNO 9, 10, 11 ir 3 išvadų dažnis pagal nutylėjimą yra 500Hz
  // Nustatomas PWM dažnis naudojamiems išvadams

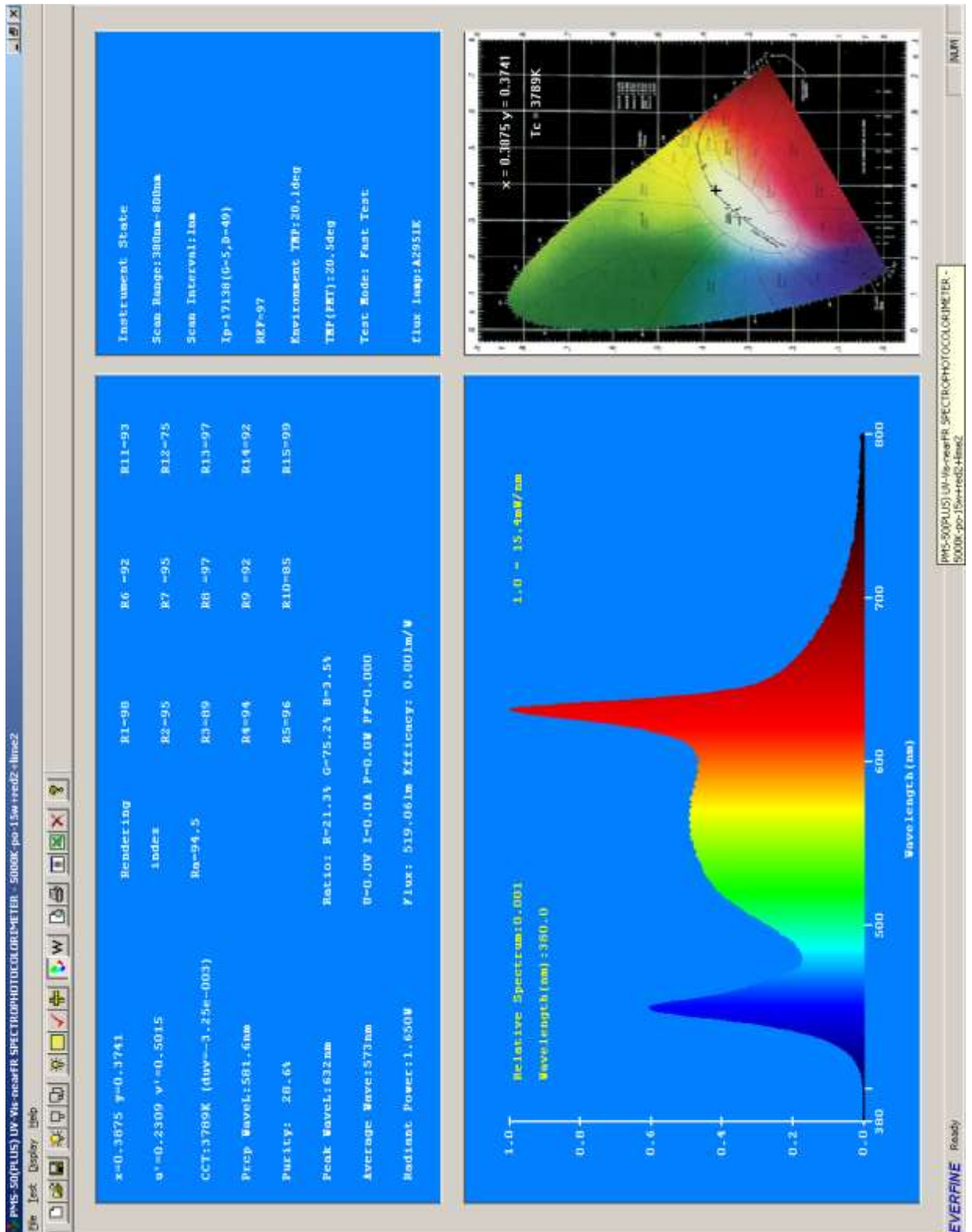
  TCCR1B = TCCR1B & B11111000 | B00000010; // set timer 1 divisor to 8 for PWM frequency
of 3921.16 Hz
  TCCR2B = TCCR2B & B11111000 | B00000010; // set timer 2 divisor to 8 for PWM frequency
of 3921.16 Hz
}

// Apdorojama bet kokia informacija, ateinanti iš "Bluetooth" serijinio ryšio
void loop()
{
  while (bluetooth.available() > 0)
  {
    char receivedBluetoothChar = bluetooth.read();
    receivedBluetoothString += receivedBluetoothChar;

    if (receivedBluetoothChar == '\n')
    {
      // Perskaityti A kanalo vertę
      if (receivedBluetoothString.endsWith("A\n"))
      {
        // Atnaujinti A LED ryškumą
        analogWrite(A_LED_Pin, receivedBluetoothString.toInt());
      }
      // Perskaityti B kanalo vertę
      else if (receivedBluetoothString.endsWith("B\n"))
      {
        // Atnaujinti B LED ryškumą
        analogWrite(B_LED_Pin, receivedBluetoothString.toInt());
      }
      // Perskaityti C kanalo vertę
      else if (receivedBluetoothString.endsWith("C\n"))
      {
        // Atnaujinti C LED ryškumą
        analogWrite(C_LED_Pin, receivedBluetoothString.toInt());
      }
      // Perskaityti D kanalo vertę
      else if (receivedBluetoothString.endsWith("D\n"))
      {
        // Atnaujinti D LED ryškumą
        analogWrite(D_LED_Pin, receivedBluetoothString.toInt());
      }
      receivedBluetoothString = "";
    }
  }
}
```

PRIEDAS 3. APŠVIETIMO SISTEMOS SPALVŲ MAIŠYMO TYRIMO REZULTATAI

Gauti tyrimo rezultatai, maišant šaltus baltus, raudonus ir gelsvai žalsvus šviesos diodus.



Gauti tyrimo rezultatai, pakeitus prieš tai minėtų šviesos diodų šviesos srautą.

