****

**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Inžinerinis projektas**

Įterptinės sistemos, T170B417

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| **Linas Beinorius**  Studentas | (parašas) (data) |
|  |  |
| **Prof. dr. Žilvinas Nakutis**  Dėstytojas | (parašas) (data) |
|  |  |

**Kaunas, 2025**

Turinys

[1. Teorinė analizė 4](#_Toc197287244)

[1.1. Matavimo reikalavimai 4](#_Toc197287245)

[1.2. Mikroprocesorius 4](#_Toc197287246)

[1.3. Indikatorius 4](#_Toc197287247)

[1.4. Apšviestumo jutiklis 5](#_Toc197287248)

[2. Principinė schema ir BOM 9](#_Toc197287249)

[3. Mikroprocesoriaus programos aprašas 11](#_Toc197287250)

[4. Kompiuterio programa 13](#_Toc197287251)

[5. Paklaidų matavimas 14](#_Toc197287252)

[Šaltiniai 17](#_Toc197287253)

[Priedas 18](#_Toc197287254)

Paveikslų sąrašas

[**1 pav.** Transimpedasinis stiprintuvas apšviestumui išgauti 5](#_Toc197287278)

[**2 pav.** Naudojamo jutiklio atvirkštinės srovės priklausomybė nuo apšviestumo 7](#_Toc197287279)

[**3 pav.** Aprašyta jutiklio atvirkštinės srovės priklausomybė nuo apšviestumo 8](#_Toc197287280)

[**4 pav.** Įterptinės sistemos blokinė diagrama 9](#_Toc197287281)

[**5 pav.** Principinė projekto schema 10](#_Toc197287282)

[**6 pav.** BOM 10](#_Toc197287283)

[**7 pav.** Programos būsenų diagrama 11](#_Toc197287284)

[**8 pav.** Sujungtos schemos nuotrauka 12](#_Toc197287285)

[**9 pav.** Pagrindinis programos langas 13](#_Toc197287286)

[**10 pav.** Parametrų nustatymo langas 13](#_Toc197287287)

[**11 pav.** Detektorių jautrumo kreivės[2] 14](#_Toc197287288)

[**12 pav.**  Varžos tolerancijos ir fotodiodo jautrumo koeficiento įtakos nuo išmatuojamos įtampos 16](#_Toc197287289)

[**13 pav.** Mikroprocesoriaus ADC paklaidos 16](#_Toc197287290)

# Teorinė analizė

**Darbo tikslas –** suprojektuoti ir realizuoti įterptinę sistemą, kuri yra sudaryta iš STM32 valdiklio. Sistema turi atitikti šiuos reikalavimus:

* Du apšviestumo jutikliai
* LCD indikatorius (16x2)
* Duomenų perdavimo sąsaja į personalinį kompiuterį ir jų saugojimas (PK)

Mano užduoties variantas yra 5, tai reiškia, jog įrenginys turi atlikti tokius matavimus:

* 2 kanalų apšviestumas.
* Vidurkio ir kanalų skirtumo skaičiavimai.
* Signalo pralaidumo juostas yra 0 – 100 Hz.
* Indikatoriuje vidurkis atvaizduojamas kas 2 sekundes.
* Į kompiuterį siunčiami duomenys yra 0.2 s periodu.

## Matavimo reikalavimai

Skaičiavimo reikalavimams reikalinga iki 100 Hz pralaidumo juosta, tai reiškia, jog diskretizuoti reikia bent 2 kartais daugiau vieną kanalą. Tai nėra didelis dažnis, galima sudaryti taimerį, kurio diskretizavimo periodas yra 400 (dvigubai daugiau nei teoriškai reikalingas) Hz ir kas kart reikalauti kanalų reikšmes. Paprastumo dėlei galima turėti du atskirus taimerius, kurių kitas būtų atsakingas už duomenų atvaizdavimą ir siuntimą į personalinį kompiuterį, kurį galima aprašyti 200 ms periodu, taip indikatoriuje atvaizduoti vidurkį ir skirtumą kas 10 pertrauktį. Duomenų siuntimas į kompiuterį turi būti įvykdytas kas 200 ms, tai reiškia, jog vidurkintos dviejų kanalų reikšmės turės apytiksliai 80 naujų reikšmių kiekvieną kartą, prieš siunčiant duomenis į personalinį kompiuterį. Indikatoriaus atvaizdavimui taip pat reikalingas vidurkinimo skaičius, todėl jis bus atvaizduojamas nuo paskutinės iki atvaizdavimo pertraukties gautos reikšmės.

## Mikroprocesorius

Šiuo atveju nėra didelio duomenų apdorojimo, dėl kurio procesorius nesugebėtų suspėti visko suskaičiuoti, atvaizdavimui ir duomenų išgavimui. Projekto realizavimui reikalingi bent 2 taimeriai, 1 analogas–kodas keitiklis (ASK) su keliais kanalais, 1 UART sąsaja. Dėl mažesnio mikroprocesoriaus apkrovimo duomenų perdavimui bus naudojamas taimeris, kuris aparatiškai po savo pertraukties nusiųs komandą ASK pradėti nuskaitinėti abiejų kanalų įtampą. Po sekvencinio nuskaitymo per tiesioginį mainų kanalą duomenys bus siunčiami į atmintį, į buferį, kuriuos jau galės apdirbti procesorius. Darbui galima naudoti STM32F103 mikroprocesorių, kuris turi visas projektui reikalingas periferijas, tačiau dėl patogumo iš pradžiių sistema bus kuriama STM32L452RE NUCLEO plokšte, jog būtų paprastesnis programavimas ir prieiga prie personalinio kompiuterio duomenų siuntimui (viduje jau egzistuoja keitiklis, todėl užtenka duomenis perduoti per UART2 išvadus ir peržiūrėti per terminalą asmeniniame kompiuteryje).

## Indikatorius

Matavimams ir jų atvaizdavimams nėra reikalingas grafinis indikatorius. Kadangi nėra galimybės atlikti šiems matavimams kalibravimo funkcijos, nėra būtinybės turėti mygtukų matricos bei grafinės sąsajos. Maža duomenų atvaizdavimo sparta (200 ms) yra pakankama LCD indikatoriui realizuoti. Kadangi yra numatyta matuoti iki 10000 liuksų, tai naudojant dvi linijas kiekvienam kanalui atskirai yra pakankamai ilgio (numatyta atvaizduoti tokiu pavidalu „CHx=XX lx“ iš viso bent 9 simboliai) ir atvaizdavimo perstūmimai nereikalingi. Pasirenkamas naudoti 16x2 LCD indikatorius. Kanalų skirtumas gali būti kaip atvaizdavimo funkcija, kuri yra įjungiama nuspaudus mygtuką arba slenkant indikatoriaus dinaminę atmintį. Yra dar viena galimybė, tai 100 ms skirti atvaizdavimui kanalų, o kita pusė – kanalų skirtumui. LCD apšvietimas yra nuo 5V, tačiau tai problemų nekelia, nes maitinimas yra tiekiamas iš personalinio kompiuterio. Duomenų linijos yra pritaikytos naudoti 3.3 V ir 5 V siuntimui. Naudojamas duomenų perdavimo protokolas yra lygiagreti 4 bitų sąsaja. Priverstinis μs vėlinimas bus panaudojant vieną iš taimerio skaitiklių, kadangi panaudojant blokuojančia „HAL\_Delay“ funkciją yra per ilgas laiko tarpas, dėl kurios galima pastebėti LCD mirgėjima, duomenų įrašymo slinkimą.

## Apšviestumo jutiklis

Yra reikalingas apšviestumo skaičiavimas, todėl reikia naudoti šviesos priklausomybę turinčius komponentus. Rinkoje tai gali būti fotorezistoriai („LDR“), fotodiodai ir fototranzistoriai. Taip pat rinkoje yra pilnai apdirbtų produktų, modulių, kurie jau yra kalibruoti ir atvaizduoja apšviestumo signalą keičiant išėjimo dažnį arba išsiuntimas vyksta per protokolą. Jų principas yra toks pat kaip ir šiuo atveju naudojant fotodiodus, tačiau norint išgauti kuo tikslensį spektro jautrumą, naudojami lygiagrečiai keli ar keliasdešimt fotodiodų. Lėtas fotorezistoriaus reakcijos laikas ir nestatūs frontai gali būti nepakankami atvaizduoti 100 Hz kintančio signalo, dėl ko bus naudojami fotodiodai. Jų apšviestumo priklausomybė nuo atvirkštinės srovės yra tiesinė logaritminėje skalėje, todėl patogu matuoti. Kadangi iš jų yra gaunama tik srovė, ją reikia konvertuoti į įtampą, kurią mikroprocesorius gali apdoroti ASK (analoginis-skaitmeninis keitiklis). Tai yra padaroma transimpedansiniu stiprintuvu.

A diagram of a circuit

AI-generated content may be incorrect.

**1 pav.** Transimpedasinis stiprintuvas apšviestumui išgauti

Fotodiodas veikia atvirkštinės srovės režime, kurio srovė priklauso nuo apšviestumo. rezistorius nustato tekančios srovės stiprinimą. Fotodiodai yra linkę užsigeneruoti, todėl naudojamas kondensatorius , kuris veikia kaip žemų dažnių filtras ir apriboja aukštus dažnius pagal formulę[1]:

Šis taip pat veikia kaip ir antisanklodinis filtras, kadangi signalai po to bus perduodami į diskretizuojantį keitiklį. Kadangi maitinimas yra vienpolis, reikalingas operacinio stiprintuvo virtualaus nulio pakėlimas (pasirinkta 100 mV), kad nebūtų stiprintuvo įsotinimas. Šiuo atveju pasirinktas operacinis stiprintuvas turi įėjimo įtampų ruožą, kuris yra 300 mV žemiau už bendrą išvadą, todėl norint gauti didesnio tikslumo apšvietos reikšmes prie mažo apšvietimo, galima neinvertuojantį įėjimą prijungti ir prie žemės. Stiprinimo varža yra apskaičiuojama pagal formulę:

Naudojamas PIN fotodiodas yra SMD tipo ir jo spektro maksimumas yra artimas 555 nm dažniui. Lyginant su žmogaus spektriniu jautrumu, kainos ir panašumo atžvilgiu rinkoje, šis buvo tinkamiausias, tačiau pastebime, jog iš pateikto jautrumo, fotodiodas taip pat sugeria ir dalį infraraudonojo spektro, bei visiškai nesugeria raudonos spalvos, todėl norint gauti tikslesne apšvietą, lyginamą su žmogaus jautrumu, reiktų turėti filtrą, kuris sugeria visus infraraudonuosius spindulius.

A graph of a normal spectrum

AI-generated content may be incorrect.

Kadangi fakultete nėra kalibravimo galimybės, srovės tekėjimo duomenys yra paimami iš duomenų lapo, nors pats srovės statumas gali būti ir kitoks.

A graph of a line graph

AI-generated content may be incorrect.

**2 pav.** Naudojamo jutiklio atvirkštinės srovės priklausomybė nuo apšviestumo

Iš čia yra paimama maksimali srovė 4 μA. Tai reiškia, jog mūsų matuojamas diapazonas bus iki 10 kiloliuksų (lx arba lux matavimo vienetai). Naudojamas operacinis stiprintuvas – MCP6002, kuris turi rail–to–rail įėjimus ir išėjimą, taip pat svarbu tai, jog yra pagamintas KMOP technologijos. Pasirinktas toks stiprintuvas, kadangi reikalingas mažas srovės tekėjimas į įėjimus, jog nebūtų užgožiamos fotodiodo srovės. Šio stiprintuvo srovė – 1 pA kambario temperatūroje ir to užtenka, kadangi fotodiodo atbulinė srovė tamsioms sąlygomis yra 0.1 nA, 100 kartų mažesnė nei įtekama. Stiprintuvo maitinimas bus tiekiamas iš mikroprocesoriaus bendros paskirties išvadų, kadangi srovės yra mažos ir nesiekia 15 mA, kas yra nurodyta mikroprocesoriaus duomenų lape prie maksimalių ištekamų srovių. Dėl šio jungimo galima prijungti papildomą kanalą maitinimo įtampos nuskaitymui, taip gaunant tikslesnius matavimo rezultatus.

Kadangi naudojamas mikroprocesorius, išsivedama formulė, kuri yra skaičiuojama iš **2 pav.** Ši formulė bus naudojama po įtampos konvertavimo į srovę, tekančia per diodą, nes tada turėsime vieną iš ašių reikšmių. Pastebime, kad logaritminėje skalėje ši formulė yra tiesė, vadinasi ji gali būti aproksimuojama nuolatine dedamąja ir skalės statumu. Statumas yra skaičiuojamas pagal formulę:

Gaunamas rodiklio pagrindas – 1, tai reiškia, jog ši formulė gali būti aproksimuojama tiesės pavidalu. Šiuo atveju užtenka dviejų lygčių iš kurių pagal tiesinės lygties formulę yra išgaunami koeficientai pateikti žemiau.

A graph with a line

AI-generated content may be incorrect.

**3 pav.** Aprašyta jutiklio atvirkštinės srovės priklausomybė nuo apšviestumo

# Principinė schema ir BOM

Žemiau pateikiama sistemos blokinė diagrama.

A screenshot of a cell phone

AI-generated content may be incorrect.

**4 pav.** Įterptinės sistemos blokinė diagrama

Sistemos blokinė diagrama yra nuosekli ir paprasta. Apšviestumo matavimui naudojami 2 kanalai, kuriems reikalingas nuskaitymas atliekamas viduje mikroprocesoriaus esančiu keitikliu. Nuskaityti duomenys yra apdorojami mikroprocesoriuje ir kas 2 sekundes yra atvaizduojama į LCD indikatorių atskiro kanalo apšviestumas, nuspaudus mygtuką vietoj dviejų kanalų reikšmių yra nustatoma skirtuminė jų reikšmė. Kas 200 ms duomenys yra perduodami per UART sąsają į išorinį keitiklį, kuris apdoroja duomenis taip, jog būtų išsiunčiami į personalinį kompiuterį per USB sąsają, pasinaudojant dedikuotu pagal integrinį grandyną draiveriu.



**5 pav.** Principinė projekto schema

A close-up of a screen

AI-generated content may be incorrect.

**6 pav.** BOM

Preliminari šio projekto schema yra 32 eurai, tačiau šiuo atveju nėra įtraukiamas USB–UART išorinis keitiklis, kurį galima įsigyti už kelis eurus. Į kainą taip pat neįtraukiama plokštės gaminimo ir surinkimo kaštai.

# Mikroprocesoriaus programos aprašas

Žemiau pateikiama programinio kodo būsenų diagrama, į kurią įtraukiami svarbiausi kintamieji, būsenų pasikeitimui atlikti (kodas nebuvo automatiškai sugeneruotas ir atliktas pagal žemiau pateiktą diagramą).

A screenshot of a computer

AI-generated content may be incorrect.

**7 pav.** Programos būsenų diagrama

Mikroprocesoriaus begaliniame cikle yra tikrinamos vėliavėlės, kurios nustatomos pertraukčių aptarnavimo funkcijose. LCD atvaizdavimui reikalinga kas dešimta pertrauktis, todėl sudaromas sąlyginis sakinys per kiekvieną TIM15 pertrauktį. TIM6 yra nustatytas siųsti aparatūrinę pertrauktį keitikliui diskretizavimo dažniu, o nuskaitytos visų kanalų reikšmės yra perskaičiuojamos į apšviestumą ir kaupiamos buferyje. Kadangi pagrindinis ciklas yra begalinis ir greitas, derinimo režimui „Itemis Create“ aplinkoje yra nustatoma atnaujinimo reikšmė kas 1 sekundę, taip nesutrikdant programos. Inicializavimo metu yra patikrinamos periferijos ir klaidos atveju programa atvaizduoja avarinį signalą LCD indikatoriuje ir pradeda blyksėti indikacinė lemputė.

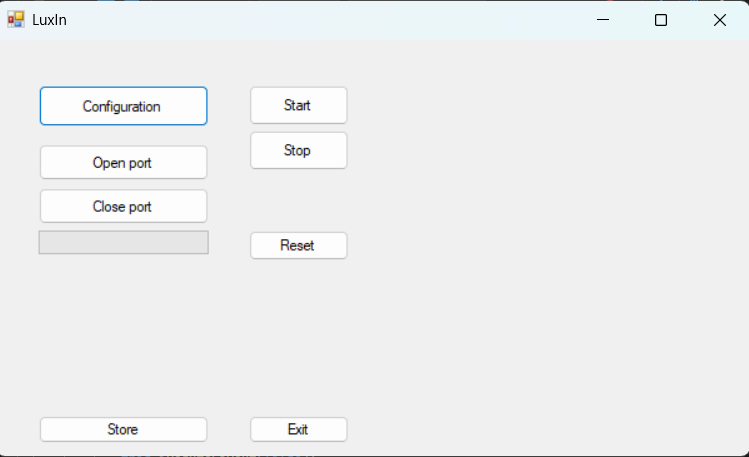
A computer with wires connected to it

AI-generated content may be incorrect.

**8 pav.** Sujungtos schemos nuotrauka

# Kompiuterio programa

Kompiuteryje pasinaudojame grafinės sąsajos įrankiu „Windows form“ Visual Studio aplinkoje. Duomenų siuntimas ir sustojimas bus inicializuoti kompiuteriu, paspaudus „Start“ ir „Stop“ mygtukus, kuriais bus siunčiamas informacijos paketas. Šis paketas yra nuskaitomas mikroprocesoriumi ir yra nustatoma vėliavėlė, kuri leidžia siųsti apšviestumo duomenis per sąsają. Duomenų atvaizdavimui yra sudaromas grafinis laiko ašyje langas, kuriame, priklausomai nuo to, kas pasirinkta siųsti, yra dviejų kanalų reikšmės arba skirtuminis signalas. Kadangi duomenys yra siunčiami per UART sąsają, reikalinga duomenų konfigūracija, todėl visų pirma reikia pasirinkti, kuriame „COM“ išvade yra prijungtas mikroprocesorius ir jam reikalingi parametrai. Patogumui yra dar sudaromi keli kiti mygtukai, bei minimalus klaidų atvaizdavimas.



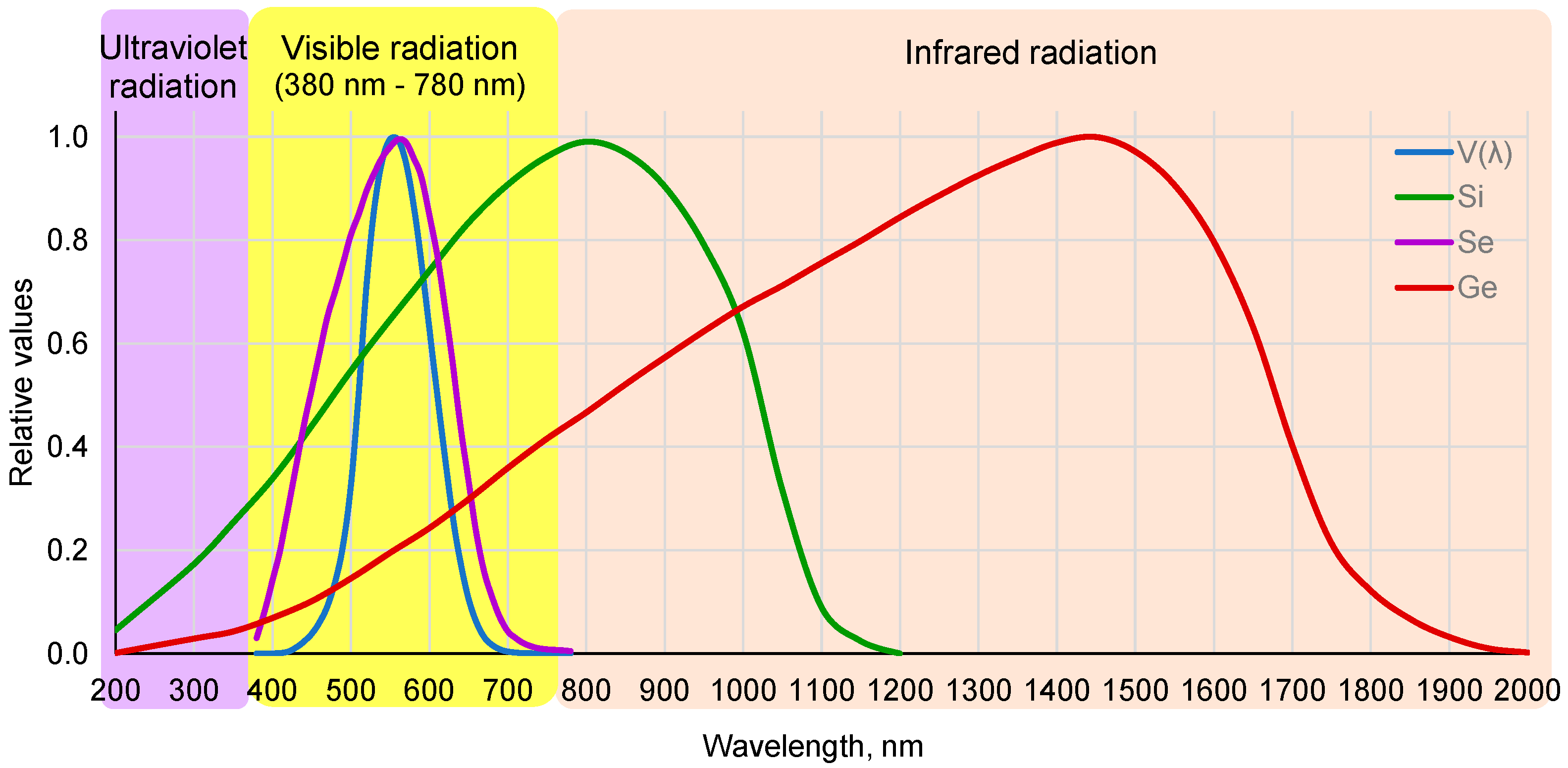
**9 pav.** Pagrindinis programos langas



**10 pav.** Parametrų nustatymo langas

# Paklaidų matavimas

Reikalavimai vidutinėms darbinio apšvietimo vertėms reglamentuojami atitinkamuose standartuose.[2].



**11 pav.** Detektorių jautrumo kreivės[2]

Kadangi nėra kalibravimo galimybės, sunku nusakyti, kokia yra mūsų paklaida, lyginant su standartizuotu dydžiu. Taip pat nėra galimybės nusakyti ir mūsų aproksimuotos logaritminės tiesės teisingumo, kadangi kiekvienas fotodiodas skiriasi savo statumu, tą galima pastebėti ir matuojant mūsų prietaisu. Dėl šių priežasčių mes galime dalinai nusakyti skaičiavimo metu daromas paklaidas, kurios pasireiškia dėl verčių apvalinimo, skyros.

Mūsų matuojamas dydis yra netiesioginis, kadangi šviesos apšviestumą (šviesos kiekį plote) reikia surinkti, mūsų atveju surinkimas vyksta dviejų kanalų fotodiodais, kurie, priklausomai nuo jos kiekio, leidžia tekėti srovei. Ši srovė yra konvertuojama transimpedansiniu stiprintuvu (pirma apsakoma neapibrėžtis). Konvertuota įtampa yra perduota į mikroprocesoriaus keitiklį, kuris turi kvantuotas reikšmes (antra apsakoma neapibrėžtis). Šioji įtampos vertė atgal konvertuoja tekančios srovės vertę mikroprocesoriaus pagalba ir pagal duomenų lape nurodytą funkciją išskaičiuoja apšviestumą. Standartinė suminė netiesiogiai matuojamo dydžio neapibrėžtis, kai visi įėjimo dydžiai nesusiję (nekoreliuoti) yra skaičiuojama pagal formulę[3]:

, kur dalinės išvestinės yra įtakos koeficientai, o *u* dydžiai – įėjimų standartinės neapibrėžtys.

Įtampa skaičiuojama pagal formulę:

, kur – varža, o – atvirkštinė fotodiodo srovė.

Tada apšviestumas išskaičiuojamas pagal formulę:

k yra koeficientas, kuris išvedamas iš jautrumo koeficiento S (A/lux). Dėl šios priežasties gauname tokią standartinę suminę neapibrėžtį:

Iš čia susirandame standartines neapibrėžtis žinomų verčių:

yra vieno žingsnio (kurio skirstinys yra stačiakampis) standartinis nuokrypis:

yra varžos, kurią naudojame kaip atraminę įtampos gavimui, absoliutinė neapibrėžtis. Kadangi tariame, jog tai yra stačiakampis skirstinys, tai gauname vertę:

kΩ

yra fotodiodo gamyklinis išsibarstymas, kuris nėra nurodytas, todėl tariame, jog tai yra 15% nuo mūsų gauto jautrumo koeficiento S.

|  |
| --- |
|  |
|  |
|  |

Pastebime, jog vertės turi priklausomybę nuo išmatuojamos įtampos. Iš čia viską įsistatome į suminę neapibrėžtumo formulę ir suskaičiuojame (kai yra 3.3V):

Tuo tarpu, kai yra 0:

Matome, jog prie mažų įtampų mūsų suminė paklaida yra nedidelė, tačiau didėja, didėjant apšvietai. ADC keitiklio paklaida sudaro nedidelę dalį prie didelės įtampos, tačiau yra labai svarbus, kai apšvieta yra maža.

**12 pav.**  Varžos tolerancijos ir fotodiodo jautrumo koeficiento įtakos nuo išmatuojamos įtampos

Pastebime, jog jautrumo koeficiento svertinis narys sudaro didžiają dalį paklaidos prie didesnių įtampų, todėl, norint gauti geresne paklaidą, reikalingas tiksli jautrumo koeficiento priklausomybė (duomenų lape nėra nurodytas išsibarstymas, todėl pasirinkta vertė buvo 15%). Taip pat bėda yra triukšmas ir paklaidos prie mažų įtampų, kurios daro įtaką įtampos šuoliams, kurie staigiai gali pakeisti atvaizduojamą vertę. Šią paklaidą bandoma sumažinti vidurkinant.

A table with text and numbers

AI-generated content may be incorrect.

**13 pav.** Mikroprocesoriaus ADC paklaidos

Matome, jog pats mikroprocesorius turi keletos mažiausios skilties bitų paklaidas, kurios nėra tik absoliutinės. Kadangi matuojama iki 10 klux, tai reiškia, jog viena skiltis atitinka apytiksliai 2.5 lux(10000/4095). Pasirenkant diapazoną reikia atsižvelgti ir į tai, kiek triukšminga yra aplinka, kadangi bet kokia indukuota įtampa per laidus ar maitinimo įtampos šuoliai (nėra atraminės įtampos vertės) sudaro pokytį. Pasirenkame taip, jog šie neturėtų santykinai didelio pokyčio liuksmetro matavimams, todėl 50 lx galėtų būti minimali diapazono vertė. Duomenų atvaizdavime paliekamos vertės vizualizacijai.

# Galutinis projektas

Pratestuotas su L4 serijos mikrovaldikliu procesas veikė, tačiau buvo reikalingas patvarumas, kadangi laidams pajudinus būdavo nenuspėjamumas indikatoriaus atvaizdavimui ir apšviestumo skaičiavimui. Dėl šios priežasties sudarytas ant projektavimo plokštės įrenginys su F1 serijos mikrovaldikliu, kurio nepastovioji atmintis siekia 64 kB (programa be optimizacijos viršija 40 kB ribą, todėl šiam darbui šis mikroprocesorius yra tinkamesnis kainos atžvilgiu).

A green electronic device with a red light on it

AI-generated content may be incorrect.

**14 pav.** Apšviestumo matuoklis

A screenshot of a computer

AI-generated content may be incorrect.

**15 pav.** Atvaizduojami parametrai kompiuteryje

Kadangi duomenys yra paduodami iš mikroprocesoriaus, tuo pačiu metu siunčiami apšviestumo matavimo ir absoliutinio mikroprocesoriaus laiko, taip žinant tikslų momentą, kuriame įvyksta matavimas. Duomenys yra slankūs, t.y. grafike yra atvaizduojama 10s paskutiniųjų duomenų, kurie gali būti išsaugomi Excel faile žemiau pateiktu formatu.

A graph with numbers and lines

AI-generated content may be incorrect.

**16 pav.** Duomenų saugojimo pavyzdys (grafikas sukurtas rankiniu būdu vizualizacijai)

# Išvados

Pagamintas įrenginys matuoja dviejų kanalų apšviestumo absoliutines vertes, taip pat mygtuko paspaudimu yra perjungiamas į kanalų skirtumo atvaizdavimą. Šis įrenginys gali būti pritaikytas patalpų apšviestumo įvertinimui, dviejų skirtingų terpių ar patalpų apšviestumo skirtumo įvertinimui, siekiant terpes palaikyti vienalytiškoms.Tolesniam tobulinimui yra galimybė sukurti dedikuotą PCB bei korpusą, tiesioginę USB sąsają į kompiuterį (F1 palaiko USB protokolą, tačiau reiktų didesnės maksimalios srovės įtampos reguliatoriaus ant „Blue pill“ plokštės, tiesiogiai kišant į USB lizdą, reguliatorius perkais).

Šaltiniai

1. J. Caldwell, „1 MHz, Single-Supply, Photodiode Amplifier Reference Design“, 2014.

2. P. Tabaka ir J. Wtorkiewicz, „Analysis of the Spectral Sensitivity of Luxmeters and Light Sensors of Smartphones in Terms of Their Influence on the Results of Illuminance Measurements—Example Cases“, *Energies*, t. 15, nr. 16, Art. nr. 16, saus. 2022, doi: 10.3390/en15165847.

3. P. Kaškonas, modulio „Matavimai ir metrologija“ paskaita „Neapibrėžtis“, 2024 m.

Priedas