



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

## **Inžinerinis projektas**

Įterptinės sistemos, T170B417

---

**Linas Beinorius**

Studentas

**Prof. dr. Žilvinas Nakutis**

Dėstytojas

---

**Kaunas, 2025**

## **Turinys**

<b>1. Teorinė analizė.....</b>	<b>4</b>
1.1. Matavimo reikalavimai.....	4
1.2. Mikroprocesorius.....	4
1.3. Indikatorius.....	4
1.4. Apšviestumo jutiklis.....	5
<b>2. Principinė schema ir BOM .....</b>	<b>9</b>
<b>3. Programos aprašas .....</b>	<b>11</b>

## **Paveikslų sąrašas**

<b>1 pav.</b>	Transimpedasinis stiprintuvas apšviestumui išgauti .....	5
<b>2 pav.</b>	Naudojamo jutiklio atvirkštinės srovės priklausomybė nuo apšviestumo .....	7
<b>3 pav.</b>	Įterptinės sistemos blokinė diagrama .....	9
<b>4 pav.</b>	Principinė projekto schema .....	10
<b>5 pav.</b>	BOM.....	10
<b>6 pav.</b>	Programos būsenų diagrama .....	11
<b>7 pav.</b>	Sujungtos schemos nuotrauka .....	12

## 1. 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.

### 1.1. 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 taimerus, 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 įvygdytas 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.

### 1.2. 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 pradžių 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).

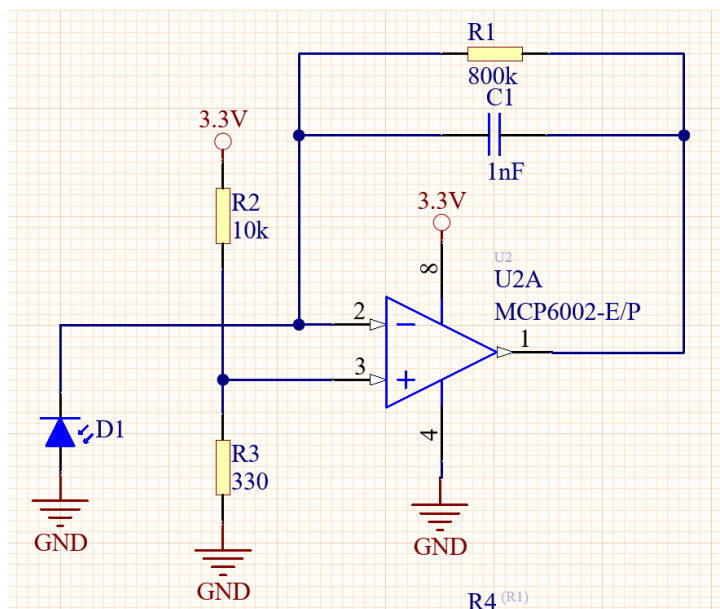
### 1.3. Indikatorius

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 įjungama 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 lygiagrečiai 4 bitų sąsaja. Priverstinis mės vėlinimas bus panaudojant vieną iš taimerio skaitiklių, kadangi panaudojant blokuojančią „HAL\_Delay“ funkciją yra per ilgas laiko tarpas, dėl kurios galima pastebėti LCD mirgėjimą, duomenų įrašymo slinkimą.

#### 1.4. Apšvietumo jutiklis

Yra reikalingas apšvietumo 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 apšvietumo 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 apšvietumo priklausomybė nuo atvirkštinės srovės yra tiesinė logaritminėje skalėje, todėl patogiu 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.



**1 pav.** Transimpedansinis stiprintuvas apšvietumui išgauti

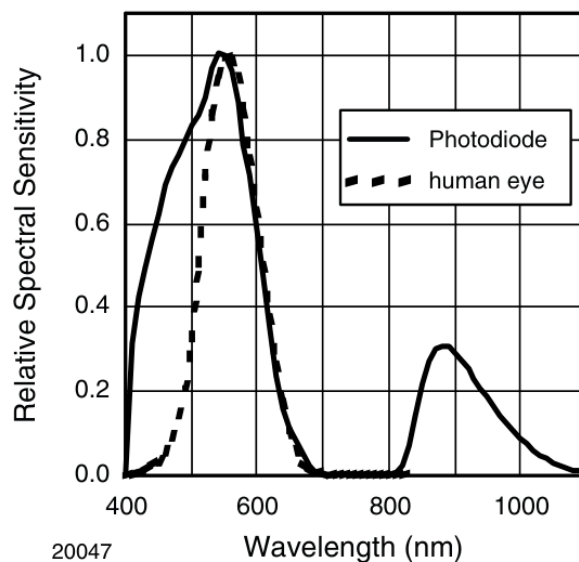
Fotodiodas veikia atvirkštinės srovės režime, kurio srovė priklauso nuo apšvietumo.  $R_1$  rezistorius nustato tekančios srovės stiprinimą. Fotodiodai yra linkę užsigeneruoti, todėl naudojamas kondensatorius  $C_1$ , kuris veikia kaip žemų dažnių filtras ir apriboja aukštus dažnius pagal formulę:

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \approx 194 \text{ Hz}$$

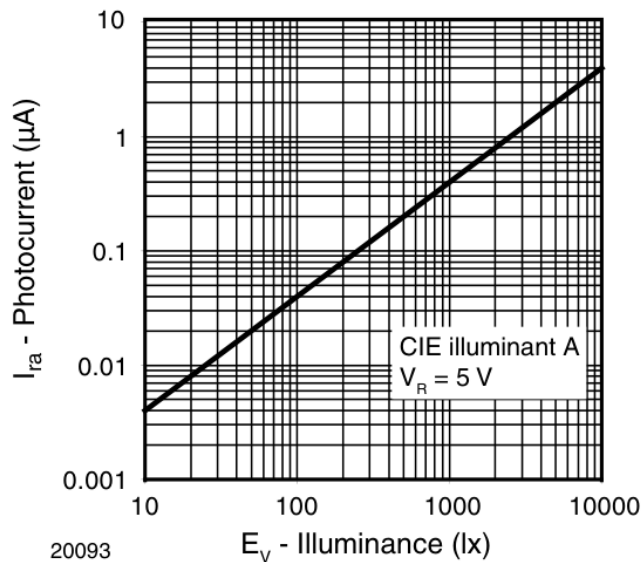
Šis taip pat veikia kaip ir antisanklodinis filtras, kadangi signalai po to bus perduodami į diskretizuojantį keitiklį. Kadangi maitinimas yra vienpolis, reikalingas operacinio stiprintuvo virtualaus nulio pakėlimas (pasirinkta 100 mV), kad nebūtų stiprintuvo išotinimas. Šiuo atveju pasirinktas operacinis 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:

$$R_{gain} = \frac{V_{maksimali} - V_{minimali}}{I_{inmax}} = \frac{3.3 - 0.1}{4\mu A} \approx 800k\Omega$$

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 tikslesnę apšvietą, lyginamą su žmogaus jautrumu, reiktų turėti filtrą, kuris sugeria visus infraraudonuosius spindulius.



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



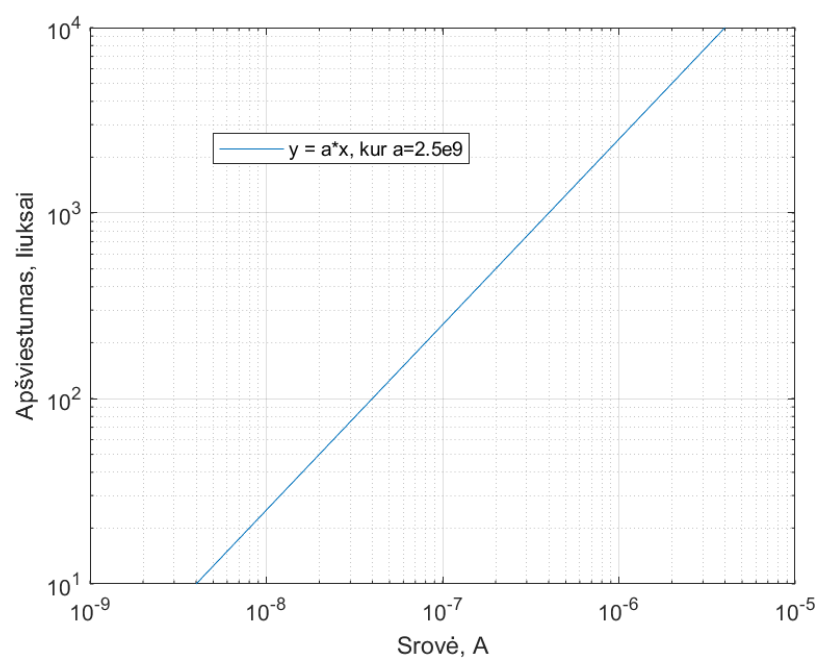
**2 pav.** Naudojamo jutiklio atvirkštinės srovės priklausomybė nuo apšviestumo

Iš čia yra paimama maksimali srovė  $4 \mu A$ . 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, tekančią 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:

$$a = \frac{\log(I_2) - \log(I_1)}{\log(E_2) - \log(E_1)} = \frac{3}{3} = 1$$

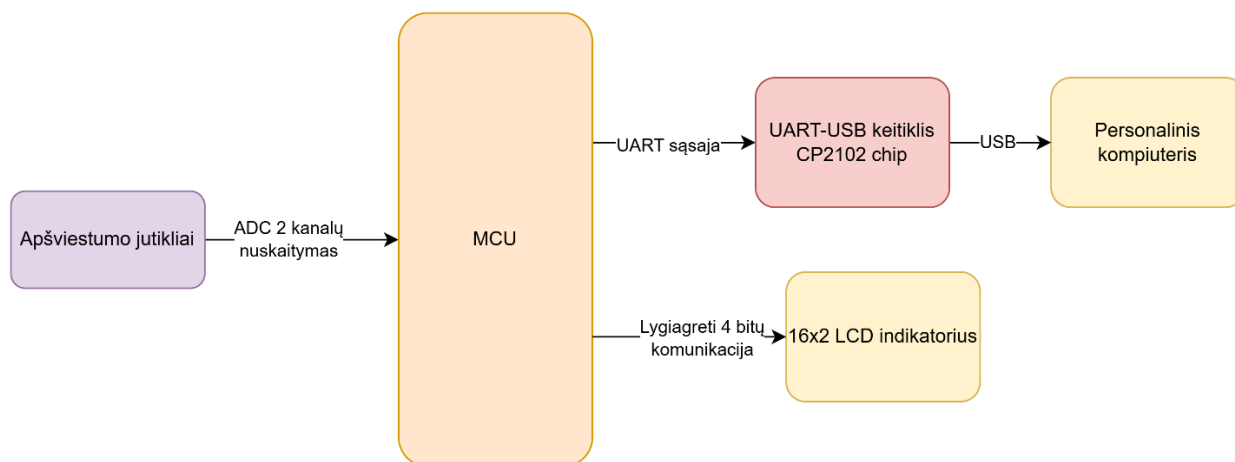
Gaunamas rodiklio pagrindas – 1, tai reiškia, jog ši formulė gali būti aproksimuojama tiesės pavidalu. Šiuo atveju užtenka dviejų lygčių iš kurių pagal tiesinės lygties formulę yra išgaunami koeficientai pateikti žemiau.





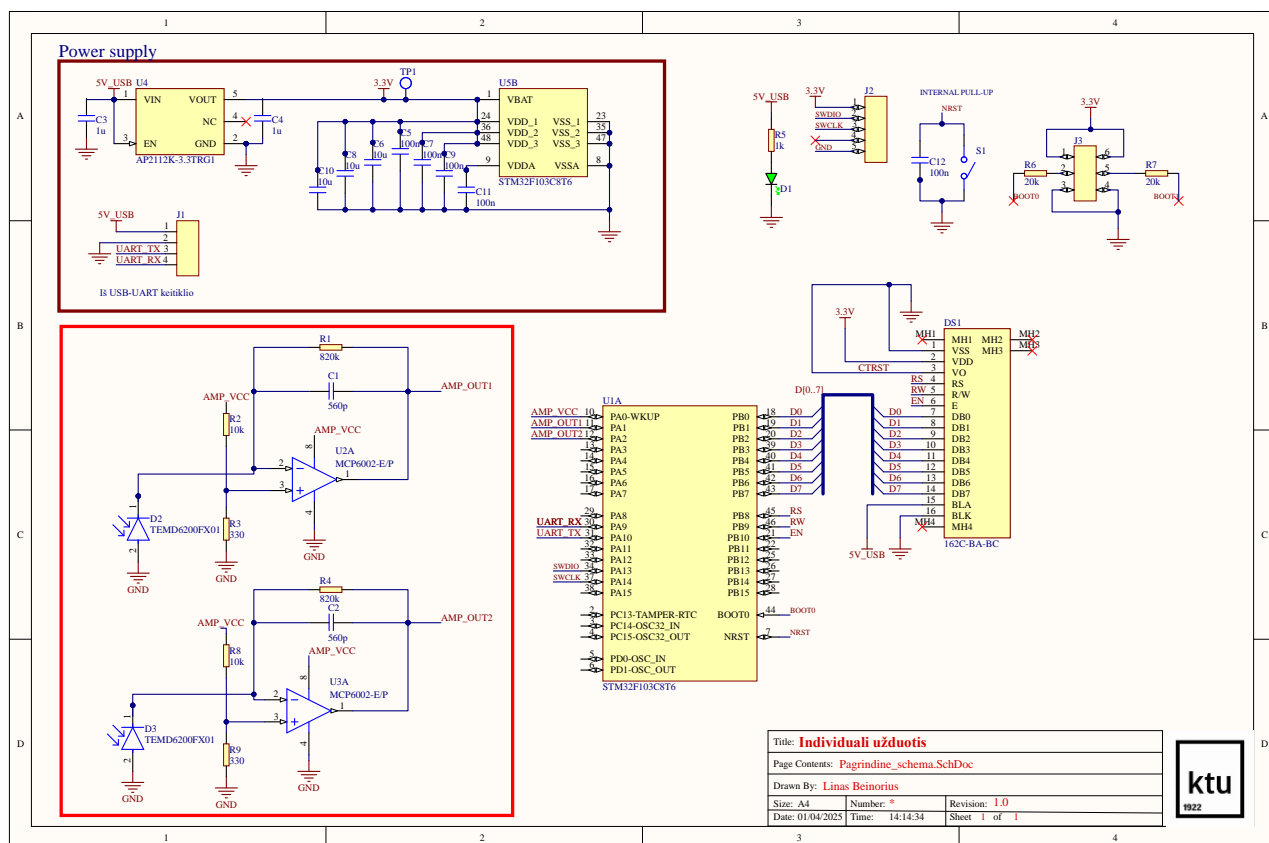
## 2. Principinė schema ir BOM

Žemiau pateikiama sistemos blokinė diagrama.



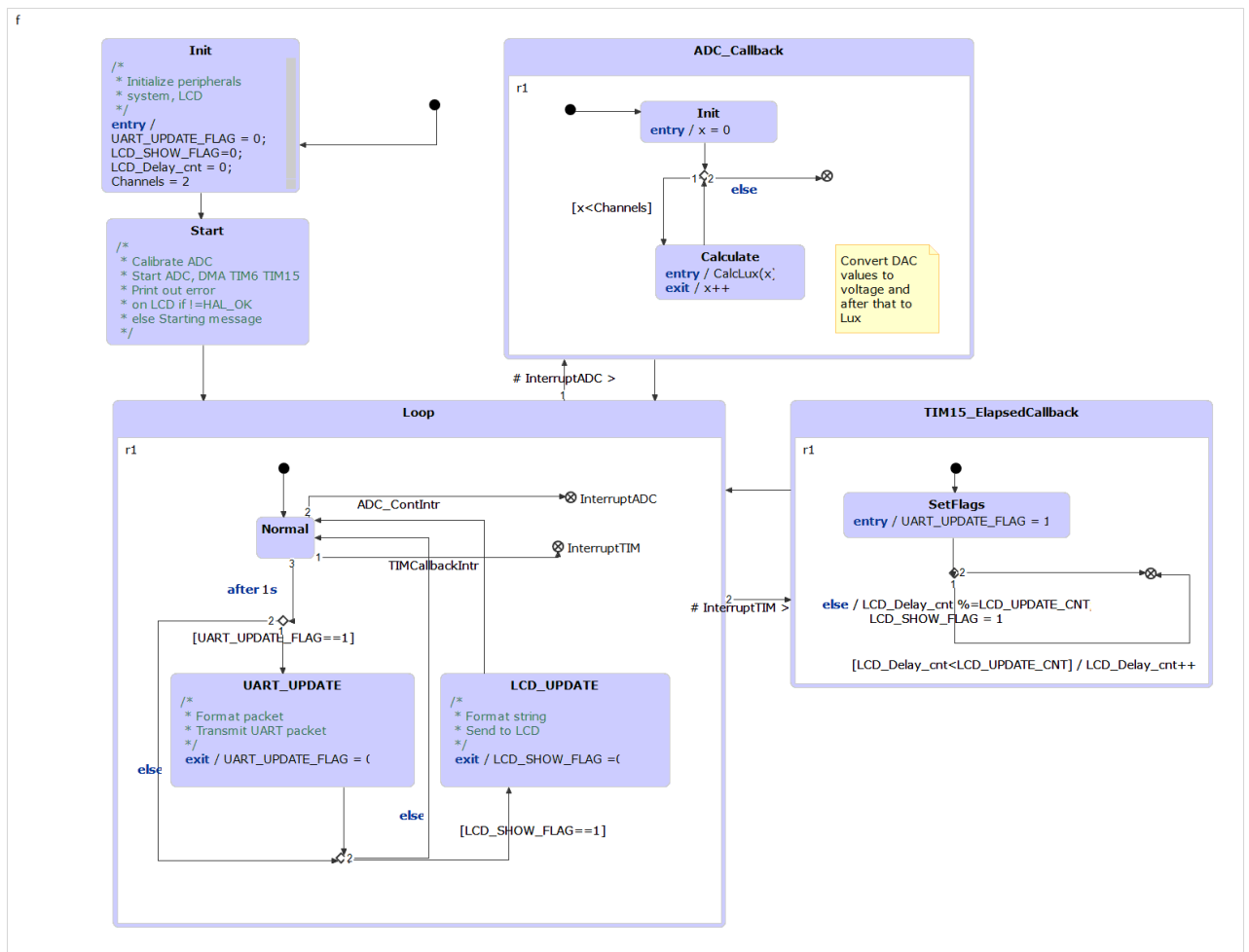
**3 pav.** Įterptinės sistemos blokinė diagrama

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 bei skirtumas tarp jų. 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 integrinę grandyną draiveriu. Šiuo atveju naudojamas išorinis keitiklis, kuris nebus integruotas kaip vientisas įrenginio darinys, todėl principinėje schemoje atvaizduojama UART sąsaja yra paliekama kaip išvadai, kuriuos reikia prijungti prie keitiklio.



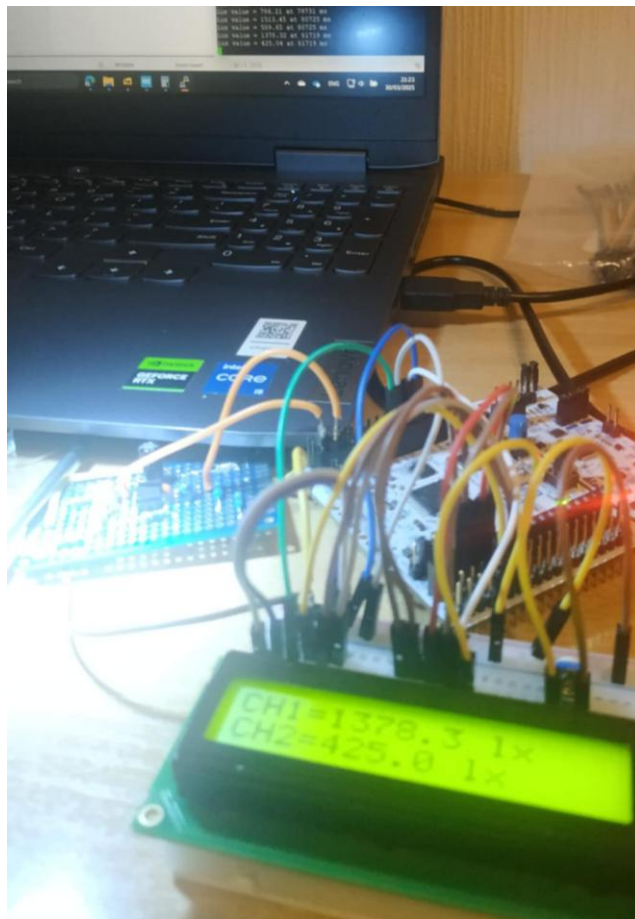
### 3. Programos aprašas

Žemiau pateikiama programinio kodo būsenų diagrama, į kurią įtraukiami svarbiausi kintamieji, būsenų pasikeitimui atlikti.



6 pav. Programos būsenų diagrama

Mikroprocesoriaus begaliniame cikle yra tikrinamos vėliavėlės, kurios nustatomos pertraukčių aptarnavimo funkcijose. LCD atvaizdavimui reikalinga kas dešimta pertrauktis, todėl sudaromas sąlyginis sakinyss per kiekvieną TIM15 pertrauktį. TIM6 yra nustatytas siųsti aparatūrinę pertrauktį keitkliui diskretizavimo dažniu, o nuskaitytos visų kanalų reikšmės yra perskaičiuojamos į apšviestumą ir kaupiamos buferyje. Kadangi pagrindinis ciklas yra begalinis ir greitas, derinimo režimui 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 blinkėti indikacinė lemputė.



**7 pav.** Sujungtos schemos nuotrauka