

Vilniaus universitetas  
Fizikos fakultetas  
Taikomosios elektrodinamikos ir telekomunikacijų institutas

Domantas Čiapas

**EKG IR EEG BIOPOTENCIALŲ REGISTRAVIMAS IR PERDAVIMAS BEVIELIU RYŠIU**

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Elektronikos ir telekomunikacijų technologijų studijų programa

Studentas

Domantas Čiapas

Darbo vadovas

doc. Vytautas Jonkus

Recenzentas

doc. Kęstutis Svirskas

Instituto direktorius

prof. Robertas Grigalaitis

Vilnius 2024

# Turinys

<b>Įvadas</b>	<b>4</b>
<b>1 Teorinis įvadas</b>	<b>5</b>
1.1 Elektrokardiogramų registravimo ypatumai	5
1.1.1 Matuojami signalai	5
1.2 Triukšmai	5
1.2.1 Vidiniai triukšmų šaltiniai	6
1.2.2 Išoriniai triukšmų šaltiniai	6
1.2.3 Registruojamame signale esantis triukšmas	6
1.2.4 Elektrodai	7
1.3 Mikrovaldiklis ESP32	8
1.4 Registratorius ADS1292	9
1.4.1 Apžvalga	9
1.4.2 Veikimas	11
1.4.3 $\Delta\Sigma$ analoginiai-skaitmeniniai konverteriai	11
1.4.4 Programavimas	13
1.5 SPI sąsaja	13
1.6 UDP paketai	15
1.7 Egzituojantys įrenginiai	15
1.8 Laboratoriniai gyvūnai	16
<b>2 Prietaiso gamyba, programavimas bei matavimo metodika</b>	<b>17</b>
2.1 Prietaiso schema	17
2.2 ADS1292 aptarnaujančios plokštės gamyba	18
2.3 Programavimo aplinkos	18
2.4 Programos kodas	19
2.4.1 Kompiuterinės programos komunikavimo su ESP32 protokolas	19
2.4.2 Programų veikimo schema	21
2.4.3 Mikrovaldiklio ESP32 detalus kodo veikimo aprašymas	21
2.4.4 Kompiuterinės programos funkcijų aprašymas	24
2.4.5 Kompiuterinės programos vaizdinė aplinka ir atliekamos funkcijos	24
2.4.6 Naudojamos išorinės bibliotekos	27
2.5 Matavimo metodika	27
2.5.1 Triukšmų matavimas	28
2.5.2 Nuolatinės įtampos nuskaitymo kokybė	28
2.5.3 Energijos suvartojimas	29
2.5.4 Realus EKG signalo matavimas	29
<b>3 Rezultatai</b>	<b>31</b>
3.1 Triukšmų įvertinimas	31

3.2	Nuolatinės įtampos nuskaitymas . . . . .	31
3.3	Energijos suvartojimas . . . . .	32
3.4	Realaus EKG signalo matavimas . . . . .	34
	<b>Išvados</b>	<b>35</b>
	<b>Literatūra</b>	<b>36</b>
	<b>Santrauka</b>	<b>39</b>
	<b>Summary</b>	<b>40</b>

## Įvadas

Su kiekvienais metais elektronikos komponentų gamybos industrijai žengiant į priekį, atsiveria naujos galimybės pagaminti produktus, kurių nebuvo įmanoma sukurti iki šiol. Svarbūs aspektai nėra tik maža prietaisų kaina, tačiau ir kompaktiškumas, mažos energijos sąnaudos, tikslumas bei naudojimo patogumas. Šios pažangos elektronikoje paskatino biosignalų jutiklių gausą ir prieinamumą ne tik medicinos įstaigoms, bet ir kiekvienam vartotojui. Nesunkiai prieinamo, tikslaus bei lengvai pritaikomo biopotencialus (elektrokardiogramos, elektroencefalogramos ir t.t.) matuojančio prietaiso sukūrimas leistų paprasčiau atlikti biologinius tyrimus bei galėtų tapti įrankiu, naudojamu laboratoriniuose tyrimuose ar medicinoje.

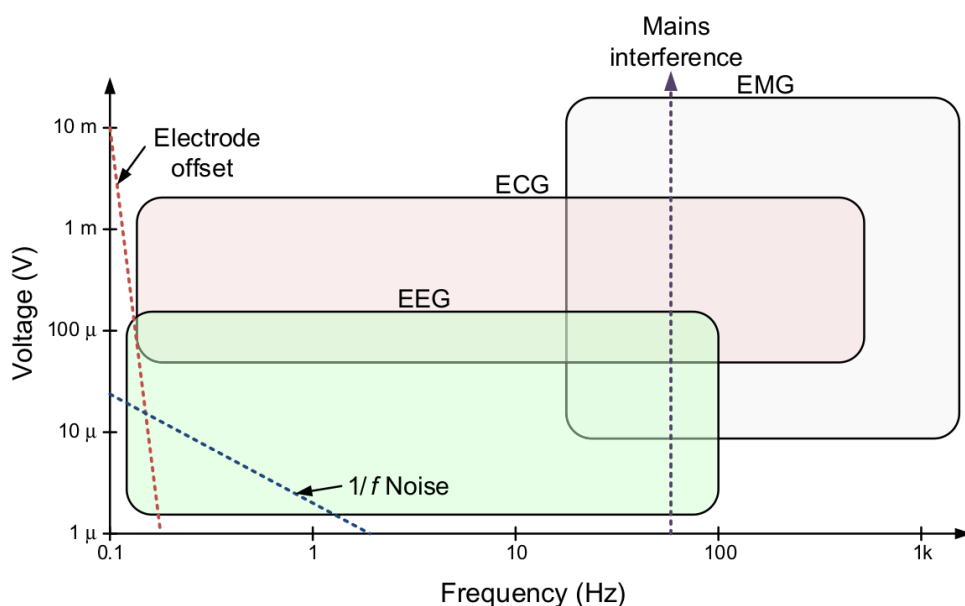
Galutinio produkto sukūrimas yra ilgas procesas, susidedantis iš elektroninių schemų sukūrimo, mikrovaldiklių programavimo, testavimo bei optimizavimo, dizaino sprendimų. Šio darbo tikslas – sukurti prietaisą, kuris gebės realiu laiku registruoti EKG ir EEG biopotencialus dviem kanalais 24-ių bitų raiška ir 1 kHz dažniu. Išmatuotus duomenis bus galima persiųsti WiFi tinklu ir analizuoti bei atvaizduoti sukurtoje kompiuterinėje programoje. Prietaisą turi būti galima pritaikyti laboratoriniuose tyrimuose su gyvūnais.

# 1 Teorinis įvadas

## 1.1 Elektrokardiogramų registravimo ypatumai

### 1.1.1 Matuojami signalai

Elektrokardiografijos (ECG/EKG), elektromiografijos (EMG) bei elektroencefalografijos (EEG) matuojamų įtampų žmogaus kūne priklausomybė nuo dažnio pateikta 1 pav. Kaip matoma, matuojami dydžiai yra mažų įtampų (tarp šimtų mikrovoltų ir kelių milivoltų) srityje. Reikalinga tiksli matavimo įranga su mažais vidiniais triukšmais, didele skyra. Taip pat signalai turi dažninį pasiskirtumą, EKG atveju tai nuo apie  $0,5-200\text{Hz}$ . Įtaką matavimams daro triukšmai ir iš išorės, kurie tiesiogiai fiksuojami matavimuose, pagrindinis jų – elektros tinklų indukuota įtampa paciento kūne [1, 2].



1 pav. ECG, EMG bei EEG įtampų žmogaus kūne priklausomybė nuo dažnio. Taip pat pateikiami pagrindiniai triukšmų šaltiniai punktyrinėmis linijomis [2].

## 1.2 Triukšmai

Realiuose prietaisuose į sistemą visuomet yra įnešami triukšmai. Triukšmai nepageidaujamai užteršia signalą, todėl reikia jų išvengti arba sumažinti įtaką kaip įmanoma labiau. Tai galima padaryti žinant, kas sąlygoje triukšmus specifinėse sistemose. Biopotencialų registravimo atveju triukšmus galima išskirti į tris grupes:

- Vidiniai, analoginių-skaitmeninių konverterių (toliau ADC), triukšmai.
- Išoriniai elektronikos sistemos triukšmai.
- Triukšmai registruojamame signale.

### 1.2.1 Vidiniai triukšmų šaltiniai

- Šiluminis triukšmas. Priklausomas nuo temperatūros. Atsiranda dėl šiluminio krūvininkų judėjimo laidininkuose.
- $1/f$  triukšmas. Žemadažnis triukšmas, kurio galios tankis atvirkščiai proporcingas dažniui. Atsiradimo priežastys nežinomos.
- Taškinis triukšmas. Žemadažnis, atsirandantis dėl defektų. Atsitiktinis ir neprognozuojamas.
- Kvantizavimo triukšmas. Atsiranda dėl diskretinio tolydžių verčių nuskaitymo. Kitaip galima suprasti kaip diskretizavimo paklaidą.
- Stiprintuvo įnešamas triukšmas, jei toks naudojamas.

Šie triukšmų tipai plačiau aptariami [3] šaltinyje. Kadangi tai yra nuo specifinio naudojamo prietaiso priklausantys parametrai, tai juos galima rasti ADC dokumentacijoje [4]. Laikoma, jog šie triukšmų šaltiniai nėra didžiausios eilės, todėl į juos nebus atsižvelgiama.

### 1.2.2 Išoriniai triukšmų šaltiniai

- Vidinės ar išorinės atskaitos įtampos.
- Neidealūs maitinimo šaltiniai. Įnešamas triukšmas iš išorės per maitinimo sistemą.
- Vidiniai ar išoriniai dažnių generatoriai. Dažnio netolygumai reiškia skenavimo intervalų iškraipymą.
- Plokštės išplanavimas. Gali persiduoti nepageidaujami signalai iš vienos sistemos vietos į kitą. ADC atveju dažniausiai tai bus skaitmeninės grandinės dalies arba maitinimo signalo indukavimas analoginėje dalyje.

ADC galima išskirti triukšmus į šiluminius bei kvantizavimo, nes jie vienas nuo kito nepriklauso. Pagal tai, kuris didesnis, galima nustatyti, kokius metodus reiktų taikyti, kad pasiekti didesnę tikslumą atliekant matavimus. Jei kvantizavimo triukšmas didesnis už šiluminį, tokie ADC vadinami mažos skyros. Jei šiluminis didesnis – didelės skyros. Didelės skyros ADC atveju galima padidinti atskaitos įtampos vertę, kad kvantizavimo triukšmo vertės taptų tos pačios eilės šiluminiu triukšmu. Taip yra pasiekama geresnė rezoliucija, todėl yra pranašu naudoti didelės skyros ADC [3].

Tai galima apibendrinti kaip naudojamų elektronikos komponentų kokybės parametrų bei plokštės dizaino įtakojamus triukšmus. Vėlgi, tai nebus didžiausios eilės triukšmai, todėl į juos nebus atsižvelgiama.

### 1.2.3 Registruojamame signale esantis triukšmas

- Elektrodo triukšmas. Elektrodo-elektrolito-odos ribų parametrai sąlygoje sistemos impedansą, kuris, jei netinkamas, sąlygoja signalo silpninimą skirtinguose [5].
- Pagrindo nuokrypis (angl. baseline offset). Tai žemo dažnio triukšmas, dažniausiai iki 1 Hz, pasireiškiantis kaip nuolatinės įtampos komponentės nepastovumas. Atsiranda dėl elektrodo parametrų nesutapimo ir matuojamo objekto judėjimo [6].

- Elektros tinklo indukuojamas triukšmas. Lietuvoje tai 50 Hz dažnio sinusoidinis signalas.
- EMG triukšmas. Tai kūno raumenų judėjimo elektrinis signalas. Gali pasireikšti plačiame dažnių diapazone.

Labai didelį triukšmą sukelia iš elektros linijų ateinantis indukuojamas triukšmas kūne (50 Hz arba 60 Hz), kai yra matuojami biopotencialai. Šį triukšmą svarbu nufiltruoti. Dalinis filtravimas atliekamas išsiunčiant papildomu elektrodu, vadinamu dešinės kojos elektrodu (toliau RLD, angl. Right Leg Drive), atvirkštinės fazės signalą elektros linijų signalui. Taip signalai susideda destruktiviai ir sumažina triukšmo lygį [1, 2].

#### **1.2.4 Elektrodai**

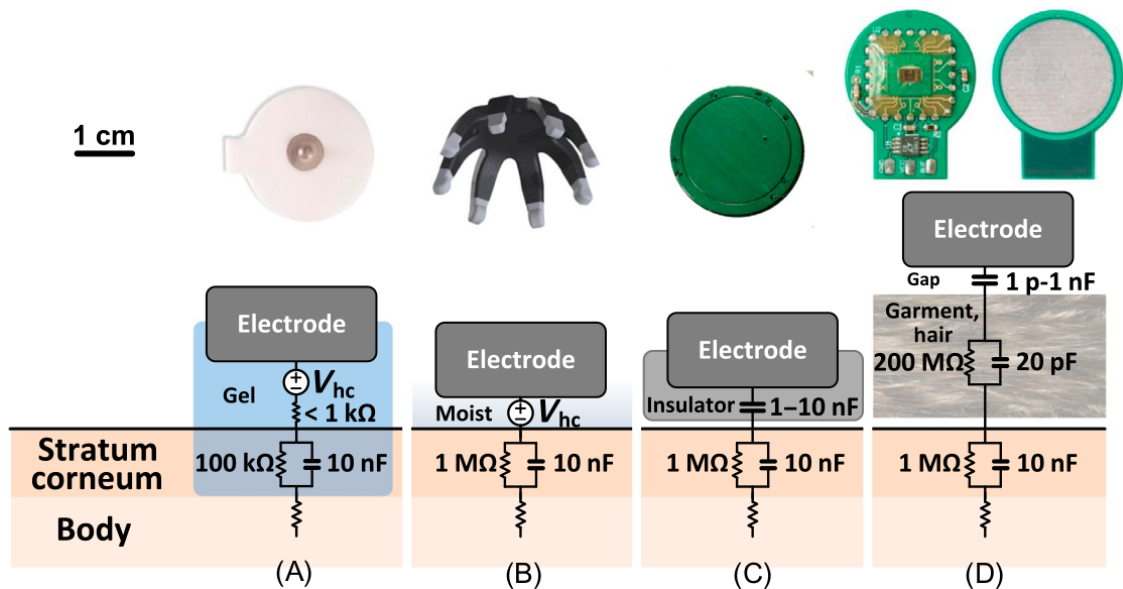
Elektrodai skirti sukurti sąsajai tarp biopotencinių elektrinių signalų ir matuojančios sistemos įėjimo. Tai yra pati pirma matavimo pakopa, todėl svarbu kuo labiau sumažinti triukšmo kiekį joje. Yra trys pagrindiniai elektrodų tipai: šlapi, sausi ir bekontaktčiai (2 pav.) [2]. Šlapio kontakto elektrodai pasižymi tiksliausiomis matavimų savybėmis, tačiau yra nepatogūs ir neilgaamžiški (gelis išdžiūna – mažėja tikslumas).

Sausuose elektroduose metalas tiesiogiai kontaktuoja su kūnu be papildomų laidžių tarpininkų. Yra pasinaudojama tuo, kad kūnas būna bent kažkiek sudrėkęs, todėl signalas gali būti efektyviai perduodamas. Kuo oda sausesnė, tuo impedansas didesnis.

Sausi elektrodai su izoliatoriumi veikia kaip su nuosekliai prijungtu kondensatoriumi. Gali būti lėti, blogų dažninių charakteristikų, tačiau labai saugūs pacientui.

Bekontaktčius elektrodus yra patogiau prijungti prie paciento, tačiau atsiranda kitų problemų: labai didelės impedansų vertės, jautrumas aplinkos sąlygoms (oro drėgmei, medžiagai tarp paciento ir elektrodo, judėjimui ir pan.).

Elektrodo tipo pasirinkimas labai priklauso nuo norimų atlikti matavimų pobūdžio. Sunkiai išskiriamų signalų kaip EEG registravimui bus reikalingi elektrodai su tinkamomis dažninėmis charakteristikomis bei mažais triukšmais, kuriais pasižymi geliniai elektrodai. Tuo tarpu mažai invaziniam registravimui (elektrodas naudojamas ant rūbų ar tiesiog su blogu kontaktu) labiau tinka bekontaktčiai.



2 pav. Elektrodo tipai [2]. A – šlapias gelio tipo kontaktas iš Ag/AgCl. B – sausas kontaktas, remiasi kūno drėgme. C – sausas kontaktas su izoliatoriumi. D – bekontaktis, pro plaukus ar rūbus.

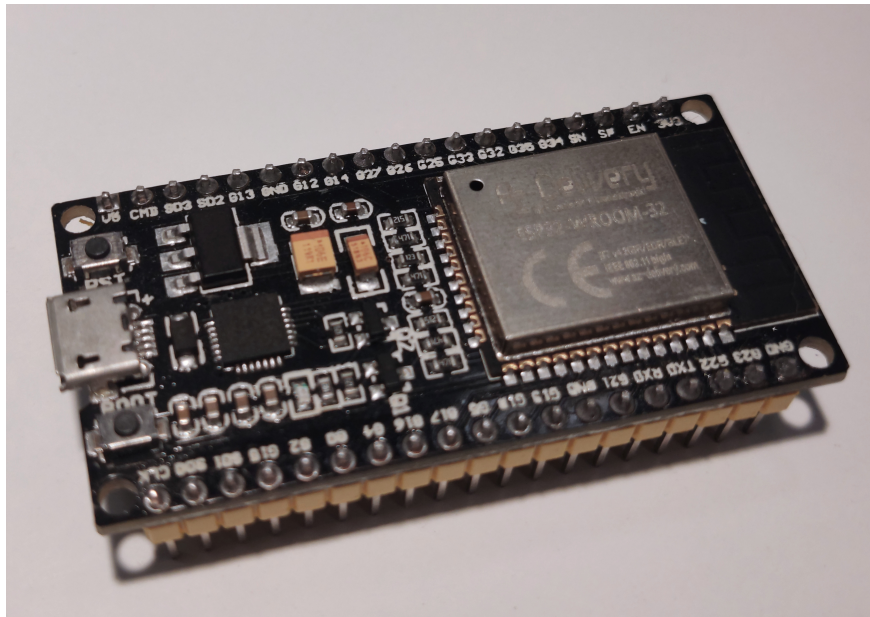
### 1.3 Mikrovaldiklis ESP32

Šiame darbe naudojamas *Espressif* [7] mikrovaldiklis ESP32-WROOM-32. Pagrindinės jo savybės yra integruoti Wi-Fi bei Bluetooth moduliai bei dviejų branduolių procesorius, kurio branduolius galima nepriklausomai valdyti. Palaiko tokias sąsajas kaip SPI, UART, SD kortelės, I2C.

Procesoriaus greitis gali būti reguliuojamas nuo 80 MHz iki 240 MHz. Tai yra pakankami greičiai atlikti paprastus skaičiavimus realiu laiku. SPI sąsaja veikia iki (priklausomai nuo naudojamų jungčių) 40 MHz arba 80 MHz. Turi daug GPIO (angl. General-Purpose Input/Output) jungčių, kurios reikalingos prijungti periferinę įrangą. Plokštės dažniausiai gamintojo parduodamos su jau įdiegta FreeRTOS operacine sistema [8].

ESP32-WROOM-32 programuotojo plokštės vaizdą galima matyti 3 pav. Daugiau informacijos apie EPS32 galimybes galima rasti nuorofoje [9].





3 pav. ESP32-WROOM-32 nuotrauka su programuotojo plokšte (angl. Developer kit).

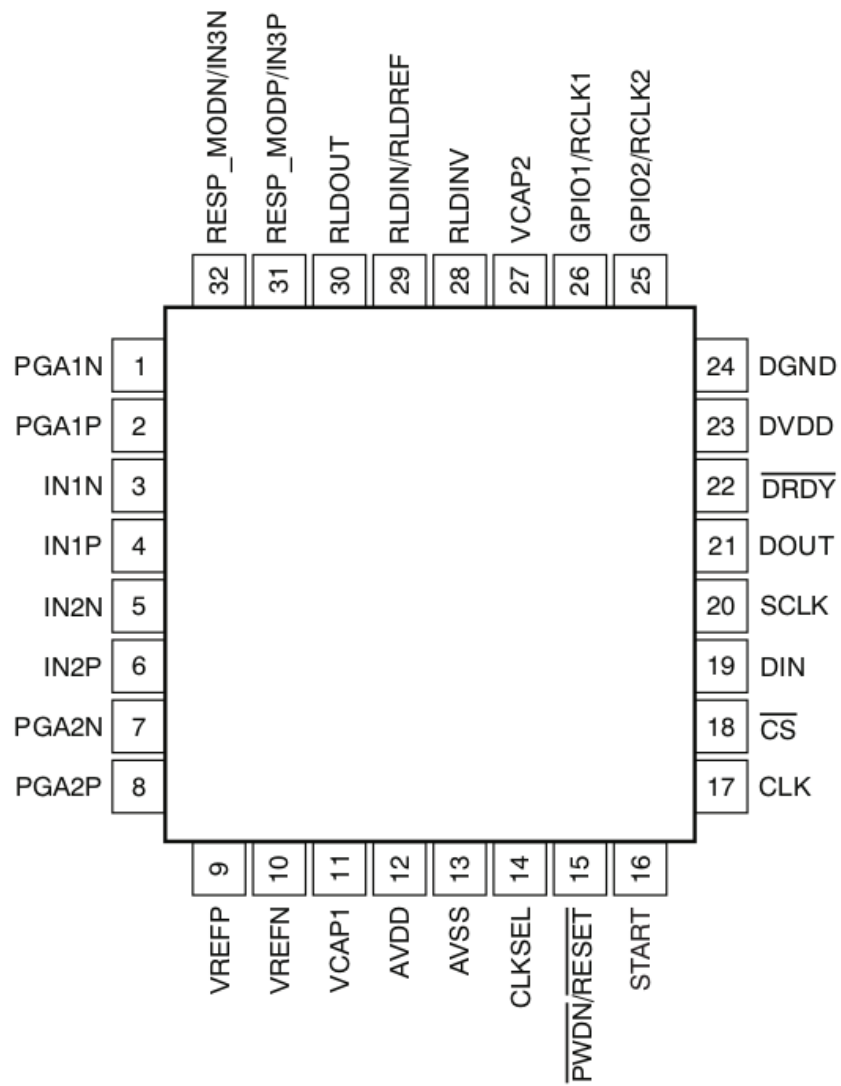
## 1.4 Registratorius ADS1292

### 1.4.1 Apžvalga

ADS1292 yra delta-sigma ( $\Delta\Sigma$ ) analoginis-skaitmeninis keitiklis, gaminamas Texas Instruments [4]. Prietaisas turi du 24-ių bitų kanalus biopotensinių signalų registravimui. Mažų gabaritų lustas, nedidelis išorinių komponentų skaičius bei mažos elektros sąnaudos leidžia gaminti nedidelius (taip pat ir nešiojamus) bei pigius medicininius prietaisus.

ADS1292 turi galimybę viduje generuoti testavimo signalus, matuoti temperatūrą, palaiko elektrodų prijungimo detektavimo funkciją (leidžia patikrinti, ar elektrodas teisingai prijungtas prie kūno). Taip pat kiekvienas įėjimas gali būti panaudotas kaip RLD signalo generatoriaus įėjimas. Turi programuojamo stiprinimo stiprintuvus, palaiko iki 8 kSPS duomenų perdavimo dažnį. ADS1292R modelis turi ir kvėpavimo signalo registravimo funkciją.

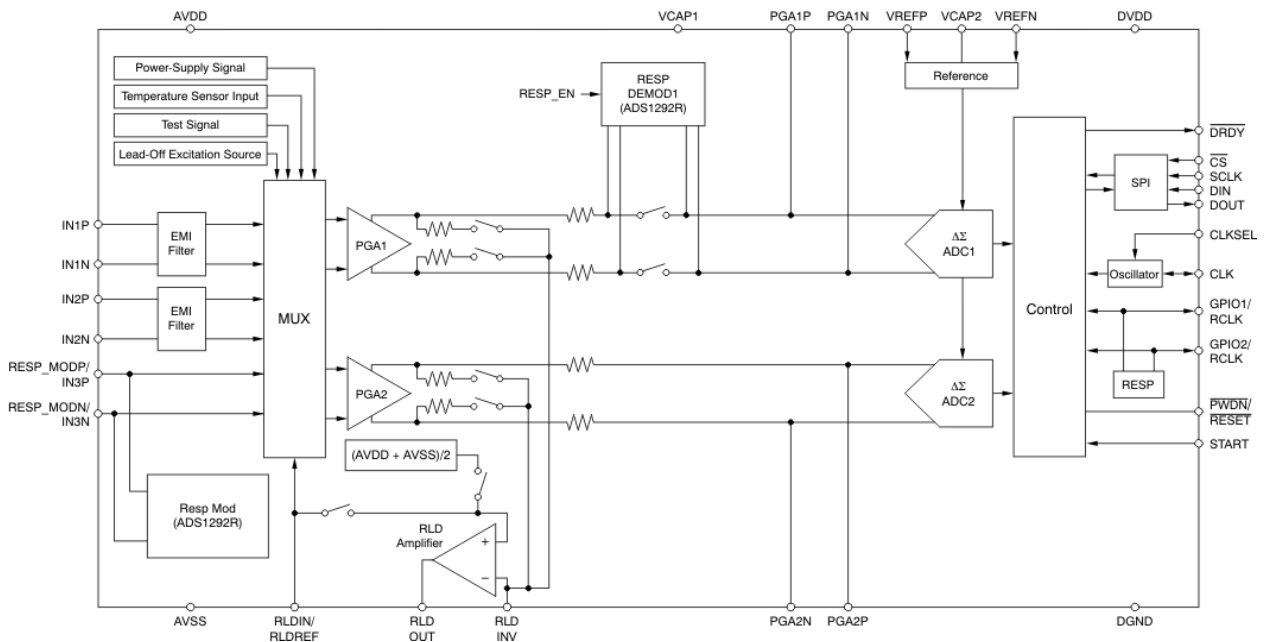
ADS1292 lusto jungčių diagrama pavaizduota 4 pav.



4 pav. ADS1292 jungčių diagrama [4].

## 1.4.2 Veikimas

Funkcinių ADS1292 veikimo blokų diagrama pateikta 5 pav. Siekiant suprasti prietaiso veikimą, seksime signalo kelią nuo įėjimų.



5 pav. ADS1292 funkcinių blokų diagrama [4].

Signalas patenka į EMI (angl. Electromagnetic Interference) elektromagnetinių trukdžių filtrą, kuris atlieka aukštų dažnių filtro funkciją (–3 dB ties 3 MHz).

Toliau signalas eina pro multiplekserį. Multiplekseris yra jungiklių rinkinys, kuris atsakingas, kad reikiamas įėjimo signalas reikiamu laiku pasiektų išėjimą. Naudojama, kai yra daug įėjimų, bet mažai išėjimų. Multiplekseris yra valdomas ADS1292 mikroprocesoriaus. Veikimo tipą galima nustatyti keičiant registrų vertes.

Po multiplekserio yra stiprinimo pakopa PGA (angl. Programmable Gain Amplifier). Šių stiprintuvų stiprinimo koeficientą galima keisti skaitmeniškai (nustatomi keičiant registrų vertes). Stiprinimo vertes galima keisti rėžyje nuo 1 iki 12 kartų.

Po stiprinimo delta-sigma analoginis-skaitmeninis konverteris skaitmenizuoja analoginį signalą. Modulatoriaus nuskaitymo dažnis yra  $f_{MOD} = \frac{f_{CLK}}{4}$  arba  $\frac{f_{CLK}}{16}$  (nustatoma programiškai), kai  $f_{CLK} = 128$  kHz. 24-ių bitų raiška leidžia išmatuoti  $\frac{\pm V_{REF}}{2^{23}-1}$  vertes, kur  $V_{REF}$  yra pasirinkta įtampos atskaitos vertė. Jei  $V_{REF} = 2,42$  V, tai mažiausia vieno bito vertė yra  $0,3 \mu V$ .

Po nuskaitymo, nuskaityti duomenys yra persiunčiami SPI sąsaja į valdymo įrenginį.

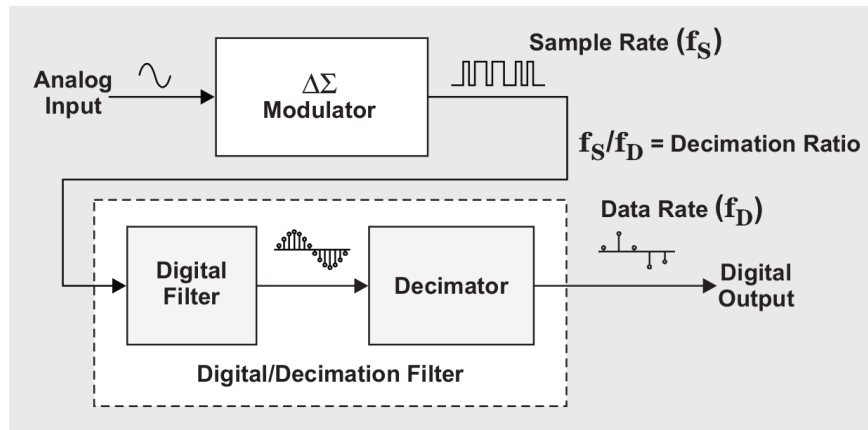
Detalesnį veikimo aprašymą galima rasti ADS1292 dokumentacijoje [4].

## 1.4.3 $\Delta\Sigma$ analoginiai-skaitmeniniai konverteriai

$\Delta\Sigma$  ADC pasižymi didele bitų skyra su mažais kvantizavimo triukšmais.

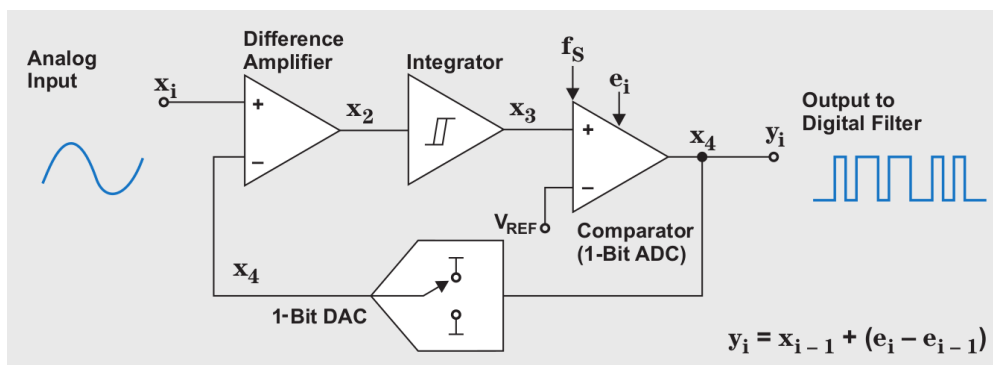
Dvi pagrindinės  $\Delta\Sigma$  ADC dalys yra modulatorius ir skaitmeninis/decimacijos filtras (6 pav.).

Modulatorius yra atsakingas už analoginio signalo nuskaitymą ir pavertimą į skaitmeninių bitų seką, kuri laiko informaciją apie pradinį signalą. Tokie modulatoriai veikia perdiskretizavimo



6 pav.  $\Delta\Sigma$  ADC blokinė schema [10]

principu (angl. oversampling). Modulatoriaus veikimo schema pateikta 7 pav. Analoginis signalas  $x_i$  patenka į skirtuminį stiprintuvą. Sustiprintas signalas  $x_2$  ateina į integratorių. Signalas  $x_3$  polinkio kampas ir kryptis priklauso nuo  $x_2$  įtampos ženklo ir amplitudės. Kai  $x_3$  vertė pasiekia komparatoriaus atskaitos įtampą  $V_{REF}$ , pasikeičia įtampos  $x_4$  ženklas. Signalas  $x_4$  keliauja toliau grandine, bei taip pat siunčiamas atgal į skirtuminį stiprintuvą (paverstas atgal į analoginį signalą), kad užtikrinti grįžtamąjį ryšį. Taip šis signalas atimamas iš įėjimo signalo, kas sumažina paklaidas. Visa ši sistema, jei veikia pakankamai dideliu dažniu  $f_s$ , sukuria bitų eilutę, kurią susumavus gaunamas pradinis signalas [10].

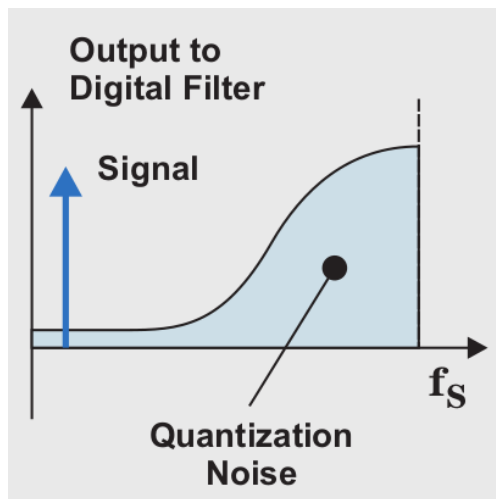


7 pav.  $\Delta\Sigma$  ADC modulatoriaus blokinė schema. [10]

Komparatorius įneša kvantizavimo paklaidas, kurios priklauso nuo  $e_i$  ir  $e_{i-1}$  paklaidų skirtumo. Kuo daugiau integratorių pakopų, tuo mažesnės kvantizavimo paklaidos mažuose dažniuose. Integratoriai atlieka triukšmo formavimo funkciją. Žemuose dažniuose triukšmas yra sumažinamas didelių dažnių triukšmo sąskaita (8 pav.).

Ši charakteristika yra pagerinama filtruose. Signalas iš modulatoriaus patenka į skaitmeninį filtrą. Šiuose skaitmeniniuose filtruose dažnai naudojamas sinc funkcijos atsako filtras. Jis atlieka suvidurkinimą bei nufiltruoja aukštus dažnius, kuriuose būna didžiausias triukšmas [11, 12].

Nufiltravus aukštus dažnius, didelis signalo verčių skaičius tampa nereikalingas, nes dideli dažniai nebus reprezentatyvūs. Tam yra naudojamas decimatorius, kuris sumažina signalo verčių skaičių, taip sumažindamas dažnį iš  $f_s$  į  $f_D$ . Dažnių santykis  $\frac{f_s}{f_D}$  yra vadinamas decimacijos santykiu. Tai sumažina sistemos dažninį atsaką, tačiau galima pasiekti didelę rezoliuciją mažuose dažniuose.



8 pav. Signalų triukšmo priklausomybė nuo dažnio  $\Delta\Sigma$  ADC moduliatoriaus išėjime. [10]

Jeigu decimacijos santykis mažas, sistemoje lieka daugiau triukšmo. Triukšmą galima sumažinti nekeičiant decimacijos santykio, bet didinant  $f_s$ . Dažniausiai  $f_s$  yra limituojamas pačios sistemos galimybių [11].

#### 1.4.4 Programavimas

ADS1292 komunikuoja su mikrovaldikliu naudojant SPI sąsają. SPI sąsajos veikimas aptariamas 1.5 skyr.

ADS1292 programavimas turi dvi funkcines dalis: komandos ir registrai [4].

Komandos yra atsakingos už įrenginio būseną. Sistemos komandos valdo, ką daro įrenginys. Tai tokios komandos kaip „startas“, „sustabdymas“, „perkrovimas“ ir panašiai. Duomenų nuskaitymo komandos valdo tai, kaip vyksta duomenų nuskaitymas: pastoviai nuskaityma, nenuskaityma, nuskaityma su komanda. Taip pat komandomis galima įrašinėti ir nuskaityti registrus.

Registrai laiko informaciją apie prietaiso veikimo parametrus ar prietaiso informaciją. Registrai nusako tokių parametrų vertes kaip stiprintuvo stiprinimo koeficientas, testinio signalo generavimas, išorinė ar vidinė atskaitos įtampos vertė naudojama ir kitus panašius parametrus.

Norimas prietaiso veikimas yra pilnai reguliuojamas komandomis bei registrų vertėmis. Taip pat svarbu atsižvelgti į prietaiso techninėje dokumentacijoje pateiktus patarimus, kaip tinkamai naudoti registrus bei komandomis (gali reikėti palaukti tam tikrą laiką tarp komandų, naudoti specifinius SPI dažnius ir panašiai).

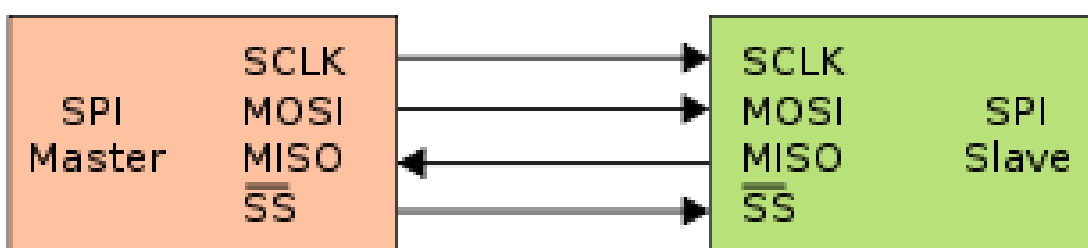
### 1.5 SPI sąsaja

SPI (angl. Serial Peripheral Interface) sąsaja dažnai naudojama mikrovaldiklių komunikacijai su periferiniais įrenginiais. Tai yra sinchroninė (angl. synchronous) dvipusė (angl. duplex) bei valdovo-pavaldinio (angl. master-slave) topologijos sąsaja. SPI gali turėti vieną valdovo tipo įrenginį ir daug pavaldinių (tipinėje veikoje). Sąsaja sudaryta iš keturių jungčių (9 pav.) [13]:

- *MOSI* (angl. Master Output Slave Input) – valdovo išėjimas, pavaldinio įėjimas. Jungtis

sukonfigūruota kaip išėjimas valdove ir įėjimas pavaldinyje. Duomenys siunčiami valdovo ir nuskaityti pavaldinio.

- *MISO* (angl. Master Input Slave Output) – valdovo įėjimas, pavaldinio išėjimas. Atvirkštinis *MOSI* variantas – duomenys perduodami iš pavaldinio valdovui.
- *SCLK* (angl. Serial Clock) naudojamas dažnio signalui persiųsti tarp įrenginių. Taip atliekama įrenginių sinchronizacija. Taip pat dažnai žymima *CLK*, *SCK*, *SCL*.
- *CS* (angl. Chip Select) naudojamas pasirinkti pavaldinio įrenginį. Kiekvienas pavaldinio įrenginys turi būti prie valdovo prijungtas atskira jungtimi. Įprastai pavaldinys prijungtas, kai *CS* vertė žema, ir atjungtas, kai aukšta. Taip pat dažnai žymima  $\overline{SS}$ ,  $\overline{CS}$ ,  $\overline{SS}$ .



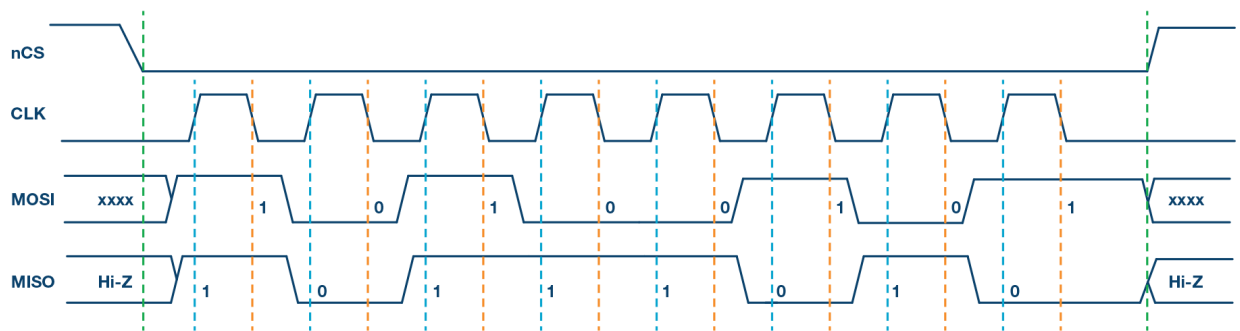
9 pav. SPI sąsajos valdovo-pavaldinio konfigūracija bei jungčių pavadinimai [13].

Norint teisingai perduoti duomenis bitais, reikia tarp įrenginių suderinti fazės ir poliškumo parametrus. Fazė nustato, ar duomenys bus siunčiami ar priimami, kai *SCLK* pereina iš aukšto į žemą arba iš žemo į aukštą. Fazė gali turėti dvi vertes *CPHA* = 0 arba 1. Poliškumas parodo, kokia bus *SCLK* pradinė vertė (aukšta ar žema), kai *CS* vertė tampa žema (arba duomenų perdavimo pradžioje). Poliškumas gali turėti dvi vertes *CPOL* = 0 arba 1. Taip gaunamos keturios konfigūracijos, vadinamos SPI režimais (angl. SPI modes), nurodytos 1 lent. [13–15].

SPI režimas	Poliškumas <i>CPOL</i>	Fazė <i>CPHA</i>	Veikimas
0	0	0	Duomenys nuskaityti <i>SCLK</i> kylant ir išsiunčiami leidžiantis
1	0	1	Duomenys nuskaityti <i>SCLK</i> leidžiantis ir išsiunčiami kylant
2	1	0	Duomenys nuskaityti <i>SCLK</i> kylant ir išsiunčiami leidžiantis
3	1	1	Duomenys nuskaityti <i>SCLK</i> leidžiantis ir išsiunčiami kylant

1 lentelė. SPI režimų tipai.

SPI perdavimo pavyzdys SPI\_mode\_1 režimu pateiktas 10 pav. [14]. Kai *CS* jungtis gauna žemą vertę, *SCLK* startuoja iš žemos vertės, nes *CPHA* = 1. Bitai nuskaityti, kai *SCLK* leidžiasi, o išsiunčiami, kai kyla. Skaitymas ir išsiuntimas visada vyksta paraleliai, nes SPI yra dvipusio (duplex) tipo. Kai perdavimas baigiamas, *CS* tampa aukštu.



10 pav. SPI sąsajos komunikavimo jungčių įtampų verčių schema SPI\_mode\_1 režime. Nurodytos siunčiamų bei nuskaitomų bitų vertės. Brūkšniuotos linijos žymi SCLK signalo vertės pasikeitimo zoną [14].

## 1.6 UDP paketai

UDP (User Datagram Protocol) yra vienas iš internetinio tinklo duomenų perdavimo protokolų. UDP paketas yra sudarytas iš antraštės ir duomenų. Standartinę antraštę sudaro:

- Siuntėjo portas<sup>1</sup> (16 bitų).
- Gavėjo portas (16 bitų).
- Paketo ilgis (16 bitų).
- Duomenų patikros suma (16 bitų).

Toliau einantys duomenys teoriškai gali užimti tiek vietos, kiek palaiko IP (angl. Internet Protocol), t.y. apie 67000 baitų. Tam reikalinga siųsti duomenis per kelis IP adresus, o tai nėra patogu ar reikalinga šiuo atveju. Su vienu IP galima sutalpinti iki 500 baitų duomenų į vieną UDP paketą.

UDP nėra savaime saugus duomenims – galimas paketų praradimas, dubliavimas ir pan. Visa tai reikia apgalvoti, kuriant UDP paketus priimančią programą. Alternatyva yra naudoti TCP (angl. Transmission Control Protocol), kuris užtikrintų duomenų saugumą. To minusas pasireiškia veikimo sparta. Šiuo atveju siekiama perduoti registruojamų signalų duomenis greitai, todėl UDP tinkamesnis variantas.

## 1.7 Egzituojantys įrenginiai

Ieškant panašias funkcijas atliekančių įrenginių, galima rasti dvi kategorijas: vienit – pilnai paruošti ir pardavinėjami įrenginiai, o kiti – atviro kodo projektai.

Atviro kodo projektai yra gera bazė pradėti kurti savo įrenginį, tačiau jų tikrai negalima greitai ir patogiai pritaikyti realiam naudojimui. Todėl jų toliau nagrinėti neverta.

Prekyboje esantys prietaisai yra kelių rūšių. Dalis jų yra dideli, naudojami kaip stacionarūs, ar neturi bevielio ryšio duomenis perduoti. Tokie įrenginiai netinka pagal nustatytus reikalavimus.

EKG matavimo prietaisų, kurie būtų bevieliai bei pakankamai maži – nėra daug. Tie, kuriuos pavyko surasti, gali kainuoti kelis šimtus eurų. Galima numanyti, kad su jais nepavyks pasiekti tokio konfigūravimo lygio, kaip galima pasiekti šio darbo atveju. Taigi galima teigti, jog mažas

<sup>1</sup>angl. port. Terminas naudojamas interneto protokoluose.

prieinamumas bei didelė kaina esamų produktų suteikia prasmę šiame darbe gaminamam įrenginiui, kuris bus nebrangus ir suteiks galimybę pačiam pagal poreikius jį konfigūruoti.

## **1.8 Laboratoriniai gyvūnai**

Darbe gaminamas prietaisas yra skirtas matuoti laboratorinių gyvūnų biopotencinius signalus, todėl turi būti tam pritaikytas. Populiarūs laboratoriniai gyvūnai yra žiurkės [16]. Wistar laboratorinės žiurkės, priklausomai nuo lyties, gali sverti 300–500g [17]. Teigiant, jog žiurkė gali panešti apie 10–20% savo kūno svorio, tai 400 g žiurkė galėtų panešti apie 40–80g svorio prietaisą. Prietaiso plokštės masė gali siekti 10g be baterijos. Galima rasti 1000 mA baterijas, kurios sveria 20g, bei 2000 mA – 40g. Tokios talpos baterijos yra optimalios šiam prietaisui, jei naudojama su laboratorinėmis žiurkėmis.

Signalų nuskaitymo sparta taip pat turi būti pakankama žiurkių EKG matuoti. Širdies dūžių skaičius gali siekti iki 370 dūžių per minutę [18]. Tokiam signalui nuskaityti reikia bent 740 Hz dažnio, o artimiausias prietaiso nuskaitymo dažnis šiai vertei yra 1000 Hz.



## 2 Prietaiso gamyba, programavimas bei matavimo metodika

### 2.1 Prietaiso schema

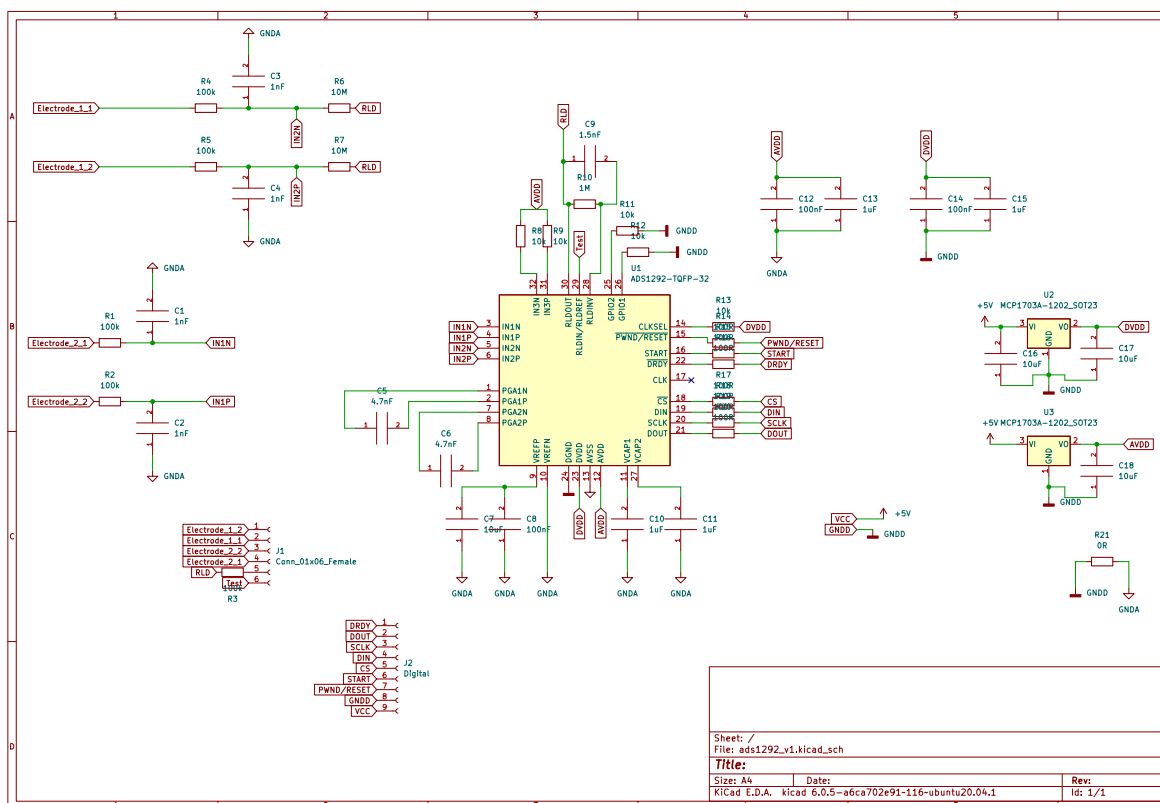
Prietaiso su ADS1292 elektroninė schema pateikta 11 pav. Trumpa apžvalga schemos veikimo.

Pagrindinis komponentas – ADS1292 lustas. Jis turi du skirtingus signalų tipus: analoginį bei skaitmeninį. Svarbu užtikrinti, kad šie du signalų tipai kuo mažiau sąveikautų tarpusavyje, nes tai padės sumažinti triukšmus matavimuose. Maitinimas tiekiamas atskirai skaitmeninei ir analoginei daliai, naudojantis dviem įtampos stabilizatoriais MPC1703 [19]. Taip pat naudojami standartiniai maitinimą stabilizuojantys kondensatoriai. Kaip ir maitinimas, žemės jungtys schemoje suskirstytos į skaitmeninę bei analoginę. Jos yra sujungiamos su 0 R varžu kuo arčiau lusto, kad būtų mažiausias įmanomas persiklojimas.

Skaitmeninė schemos dalis yra atsakinga už komunikavimą su mikrovaldikliu, kuris šiame projekte yra ESP32. Tai yra keturios SPI komunikacijos jungtys (CS, DIN, SCKL, DOUT) bei trys papildomos ADS1292 aptarnavimo jungtys (DRDY, START, PWND/RESET). Prie kiekvienos jungties yra nuosekliai prijungti 100 R nominalo apsauginiai varžai.

Analoginėje dalyje prijungiami elektrodai (palikti kontaktai elektrodo jungtims) pro didelės varžos apsauginius varžus (skirti apsaugoti kūną juo galimų elektrinių signalų pro elektrodus). Taip pat yra prijungiami kondensatoriai, kurie, kartu su varžais, formuoja aukštų dažnių filtrą.

Likę komponentai buvo prijungti taip, kaip nurodyta ADS1292 dokumentacijoje [4].

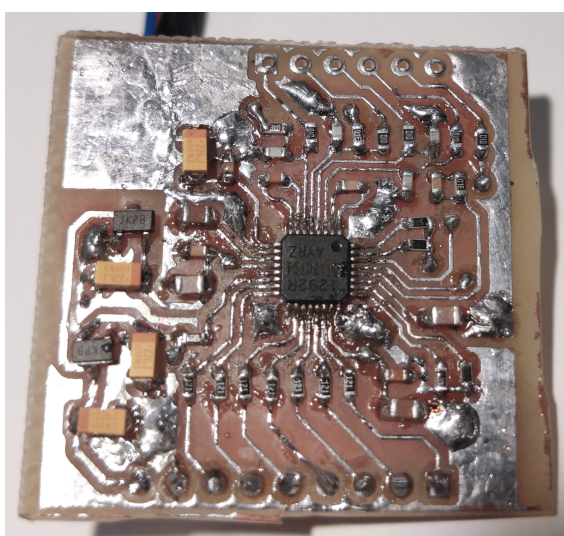


11 pav. ADS1292 plokštės elektroninė schema.

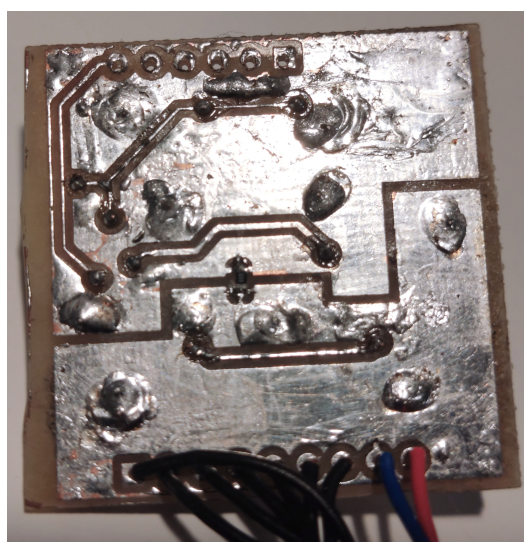
## 2.2 ADS1292 aptarnaujančios plokštės gamyba

Būsimos plokštės trafaretas buvo atspausdintas ant permatomo plastiko lapo. Gamybai naudojama variu padengta maketinė plokštė su fotorezisto sluoksniu. Plokštė buvo uždengta iš abiejų pusių atspausdintu trafaretu (dvipusė plokštė). Tuomet ji buvo apšviesta  $\approx 400$  nm bangos ilgio ultravioletiniais šviesos diodais, kad paveikti fotorezistą. Fotorezistas nuimamas naudojant ryšką. Tuomet plokštė ėsdinama, siekiant panaikinti norimą vario sluoksnį.

Plokštės varis padengiamas lydmetalio sluoksniu. Išgręžiamos skylės bei prilituojamos jungtys tarp viršutinio bei apatinio plokštės sluoksnio. Tuomet prilituojami pasyvūs komponentai, jungtys, aktyvūs komponentai bei galiausiai ADS1292 lustas. Tai daroma tokia tvarka, kad nepažeisti jautriausių komponentų. Galutinis plokštės vaizdas matomas 12 pav. Plokštės fiziniai matmenys yra  $36 \times 36$  mm.



(a) Viršus



(b) Apačia

12 pav. ADS1292 aptarnaujančios plokštės viršaus ir apačios vaizdas.

## 2.3 Programavimo aplinkos

Programos kodo kompiliavimas ir įkėlimas į ESP32 atliekamas naudojantis *PlatformIO* platforma [20]. Ši platforma palaiko *Espressif* produktų programavimą bei suteikia galimybę įsirašyti papildomus paketus (tokius kaip *Arduino* bibliotekos [21]). Ją, kaip plėtinį, galima įsirašyti į *Visual Studio Code (VS Code)* [22] programavimo aplinką.

ESP32 naudoja *ESP-IDF* programavimo kalbą [23]. Taip pat yra sukurtos bibliotekos, kurios leidžia ESP32 naudoti su *Arduino* programavimo kalba [24] (tai veikia ta pačia *ESP-IDF*, tačiau aukštesnio lygio funkcijos yra *Arduino* pavidale). Tai dažniausiai supaprastina programavimo darbą, tačiau ne visos *ESP-IDF* galimybės yra prieinamos *Arduino* kalboje.

ESP32 mikrovaldikliuose įprastai būna įrašyta *FreeRTOS* operacinė sistema [8]. Operacinė sistema gali supaprastinti daugelį sudėtingesnių prietaiso veikimo darbų. Šiuo atveju daugiausia naudojamos programos veikimo nuoseklumą keičiančios funkcijos (pvz.: laukiama signalo, o jį gavus, programa „peršoka“ į kitą funkciją).

Kompiuterinei programai sukurti naudojama *QT Creator* aplinka [25]. Tai yra programavimo aplinka, kuri leidžia kompiliuoti ir paleisti *Qt* kodą. *Qt* kodas veikia naudojant *PyQt6* [26]. Tai yra *Python* sąsaja skirta naudoti *Qt* funkcionalumams.

## 2.4 Programos kodas

### 2.4.1 Kompiuterinės programos komunikavimo su ESP32 protokolas

Kompiuterinės programos ir ESP32 komunikavimo UDP paketais protokolas pateiktas 13 pav. Informacija siunčiama keturių baitų ilgio beženkliais skaičiais (uint32). Kiekviena komanda, siunčiama iš kompiuterio, turi gauti atsakymą iš ESP32. Komanda yra užkoduota pirmame skaičiuje, po jos eina duomenis atitinkantys skaičiai. Esminės protokolo dalys – darbo parametrų nustatymas bei matavimo duomenys.

Darbo parametrus sudaro:

- Matavimo statusas, kuris turi tris vertes:
  - Išjungtas (off) – ESP32 duomenų nuskaitymas išjungtas.
  - Testinis (test) – duomenų nuskaitymas įjungtas, o į ADC įėjimą paduodamas testinis signalas su standartinėmis vertėmis.
  - Darbo (work) – duomenų nuskaitymas įjungtas. Duomenys nuskaityti tiesiai iš ADC įėjimo.
- Kanalų statusas parodo, kurie ADC duomenų nuskaitymo kanalai yra įjungti.
- Matavimo sparta (bitrate) nustato visų ADC kanalų matavimo spartą.
- Išmatuoto signalo stiprinimas (gain) nustato kiekvieno kanalo stiprinimo vertę atskirai.

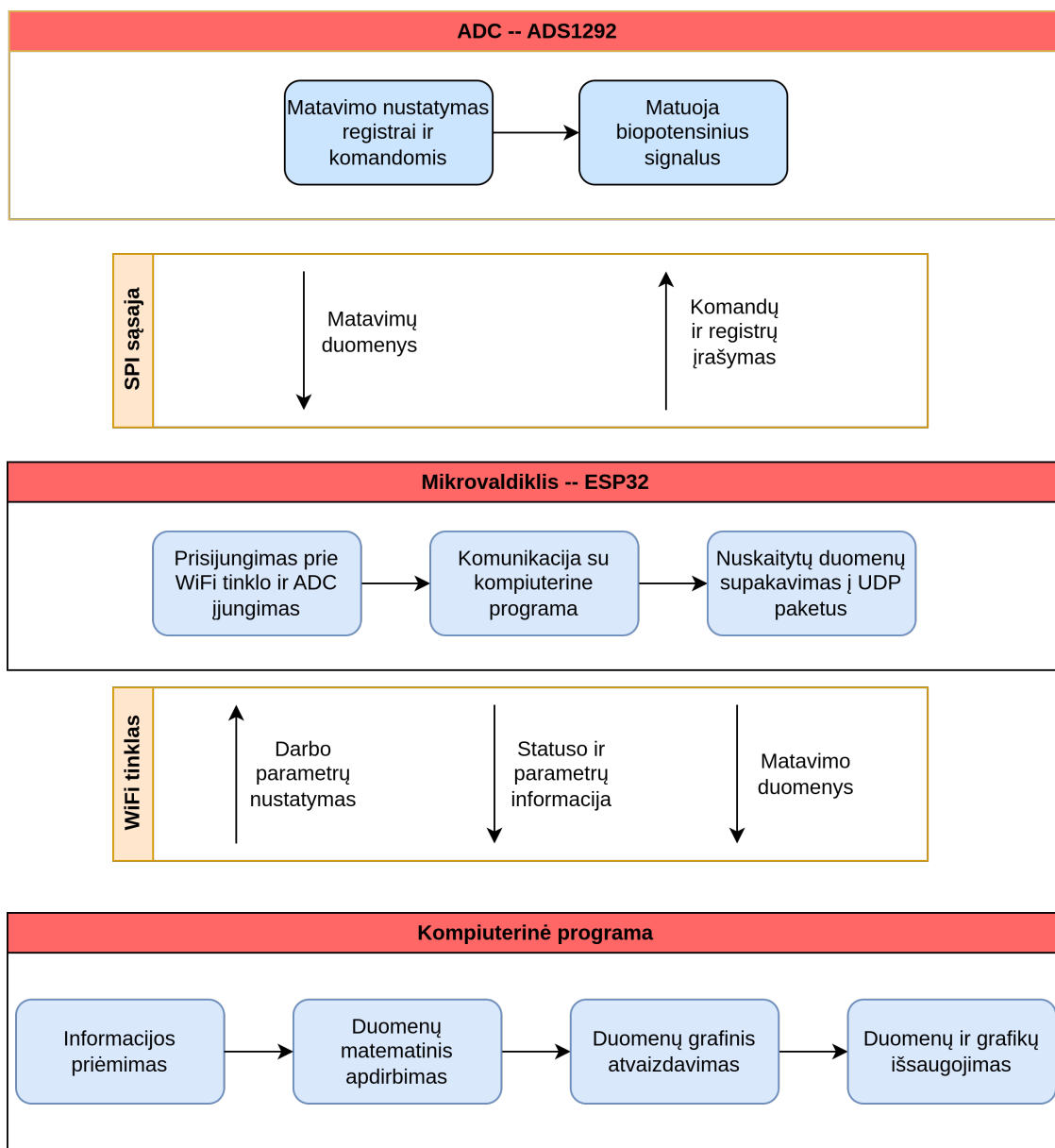
Matavimo duomenų paketą sudaro parametrai, su kuriais buvo atlikti ADC matavimai. Tuomet seka paketo numeris. Jis reikalingas tam, kad būtų žinoma ar nėra dingusių paketų. Matavimų skaičius parodo, kiek duomenų verčių bus siunčiama šiame pakete. Kaip buvo minėta anksčiau, vienu IP su UDP galima siųsti iki 500 baitų ilgio paketus. Buvo pasirinkta siųsti 200 duomenų verčių viename pakete.

Paketo tipas: UDP  
 Portas: 7757  
 IP: paskutinio teisingo paketo IP

Komanda siunčiama PC=>Registratorius	Komanda (atsakymas) siunčiama Registratorius=>PC
<b>Plokštės ID užklausa</b> uint32 0x01	<b>Plokštės ID</b> uint32 0x02 uint32 Plokštės nr. uint32 Hardware ver. uint32 Software ver.
<b>Statuso užklausa</b> uint32 0x03	<b>Statusas</b> uint32 0x04 uint32 Plokštės nr. uint32 Matavimo statusas (0–off, 1–test, 2–work) uint32 Kanalų statusas (kiekvienas bitas - kanalas) uint32 Bitrate uint32 Gain1 uint32 Gain2 uint32 regID uint32 regCONFIG1 uint32 regCONFIG2 uint32 regLOFF uint32 regCH1SET uint32 regCH2SET uint32 regRLD_SENS uint32 regLOFF_SENS uint32 regLOFF_STAT uint32 regRESP1 uint32 regRESP2 uint32 regGPIO
<b>Nustatyti statuso siuntimo periodą</b> uint32 0x05 uint32 periodas, ms	<b>Atsakymas į statuso siuntimo periodą</b> uint32 0x06 uint32 Plokštės nr. uint32 Error (0 – nėra klaidos, <>0 – klaidos kodas)
<b>Nustatyti darbo parametrus</b> uint32 0x07 uint32 Matavimo statusas uint32 Kanalų statusas (kiekvienas bitas – kanalas) uint32 Bitrate uint32 Gain1 uint32 Gain2 uint32 RLD (kiekvienas bitas – kanalas ir poliariškumas iš eilės nuo teigiamo)	<b>Atsakymas į darbo parametrų nustatymą</b> uint32 0x08 uint32 Plokštės nr. uint32 Error (0 – nėra klaidos, <>0 – klaidos kodas)
<b>Nustatyti registrą</b> uint32 0x0B uint32 Registro pavadinimas uint32 Registro vertė	
	<b>Matavimo duomenys</b> uint32 0x0A uint32 Plokštės nr. uint32 Kanalo nr. uint32 Bitrate uint32 Gain uint32 Matavimų skaičius (N) uint32 Data[0] uint32 Data[1] ... uint32 Data[N-1]

13 pav. Kompiuterinės programos komunikavimo su ESP32 UDP paketais protokolas.

## 2.4.2 Programų veikimo schema



14 pav. Prietaiso ir programinės įrangos veikimo schema.

## 2.4.3 Mikrovaldiklio ESP32 detalus kodo veikimo aprašymas

Trumpa vizualinė mikrovaldiklio programos veikimo schema pateikta 15 pav.

- ADC inicializavimas
  - Sukonfigūruojamos ESP32 jungtys (angl. pin).
  - Pradedama SPI komunikacija su ADC.
  - Atliekamas ADC startavimas pagal dokumentacijos nurodymus.
  - Nustatomos norimos pradinės ADC registrų vertės.
  - Nuskaitomi ADC darbiniai parametrai.

- Sukuriama nutraukimo funkcija, kuri laukia, kol ADC paruoš duomenis nuskaitymui.
- Duomenų perdavimo inicializavimas
  - Prisijungiama prie WiFi.
  - Pradedamas užklausių UDP paketų laukimas iš kompiuterio programos.
  - Sukuriama automatinė statuso siuntimo užduotis (angl. task), išsiunčianti UDP paketą pastoviais laiko intervalais.
  - Duomenų tipo konvertavimo pagalbinės funkcijos (UDP pakete duomenys talpinami po baitą, o protokole ir matavimuose naudojamas uint32 tipas).
- Duomenų iš kompiuterinės programos priėmimas
  - AsyncUDP bibliotekos pagalba UDP paketai priimami asinchroniškai.
  - Kai gaunamas naujas paketas, tikrinama, kokia yra atsiųsta informacija.
  - Atliekamos užduotys, aprašytos protokole 2.4.1 skyr. (t.y. nustatomi gauti parametrai ir/arba siunčiami reikalingi atsakymai).
- Duomenų iš ADC nuskaitymas ir išsiuntimas
  - Kai iš ADC gaunamas signalas, jog duomenys paruošti nuskaitymui, suveikia nutraukimo funkcija.
  - Nutraukimo funkcija pakeičia specialų kintamąjį, kurio pasikeitusios vertės laukia duomenų nuskaitymo funkcija.
  - Kai nuskaityti duomenys, semaforo pagalba padaroma, kad kitos funkcijos negalėtų veikti, kol semaforo ribojamas kodo blokas nesibaigia. Tai užtikrina, kad nevyktų kitos SPI komunikacijos.
  - Duomenys nuskaityti ir kaupiami, kol pasiekiamas tam tikras fiksuotas duomenų kiekis.
  - Surinkti duomenys yra išsiunčiami UDP paketais reikiamu portu.



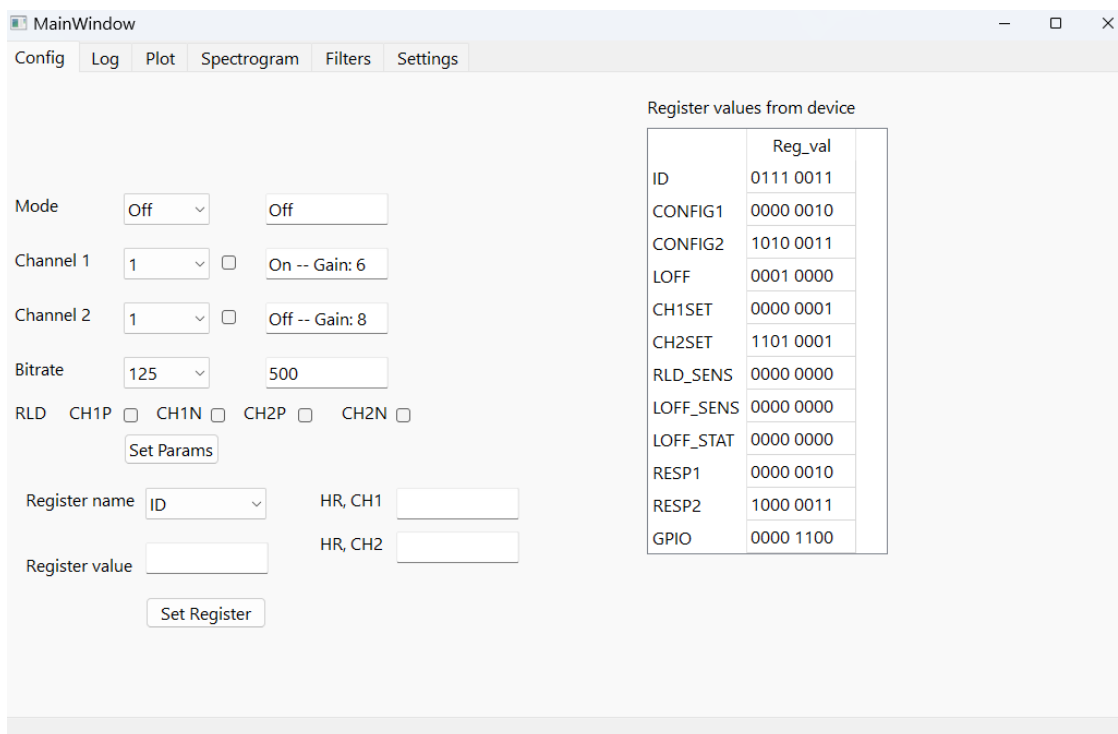
## 2.4.4 Kompiuterinės programos funkcijų aprašymas

Kompiuterinės programos atliekamos funkcijos:

- Vizuali vartotojo aplinka.
- Komunikavimas su prietaisu. Atliekama naudont Wi-Fi ir siunčiant bei priimant UDP paketus. Šie paketai analizuojami pagal protokolą 2.4.1 skyr. Programa prie gaminio prisijungia automatiškai, jei kompiuteris ir gaminys yra prisijungę prie to paties Wi-Fi tinklo.
- Matavimo duomenų priėmimas ir konvertavimas. Neapdoroti ADC duomenys yra konvertuojami į įtampą pagal dokumentacijoje pateiktus nurodymus [4].
- Duomenų filtravimas. Jei yra sukonfigūruoti filtrai (vartotojas juos gali sukurti pagal poreikį), atliekamas duomenų filtravimas. Filtrai yra sukurti naudojant *SciPy* biblioteką [27].
- Duomenų laikinis atvaizdavimas. Duomenys yra atvaizduojami laiko skalėje grafiko pavidalu.
- Duomenų spektrinis atvaizdavimas. Paskaičiuojamas duomenų spektras ir pateikiamas grafiškai.
- Duomenys automatiškai išsaugomi į failą.

## 2.4.5 Kompiuterinės programos vaizdinė aplinka ir atliekamos funkcijos

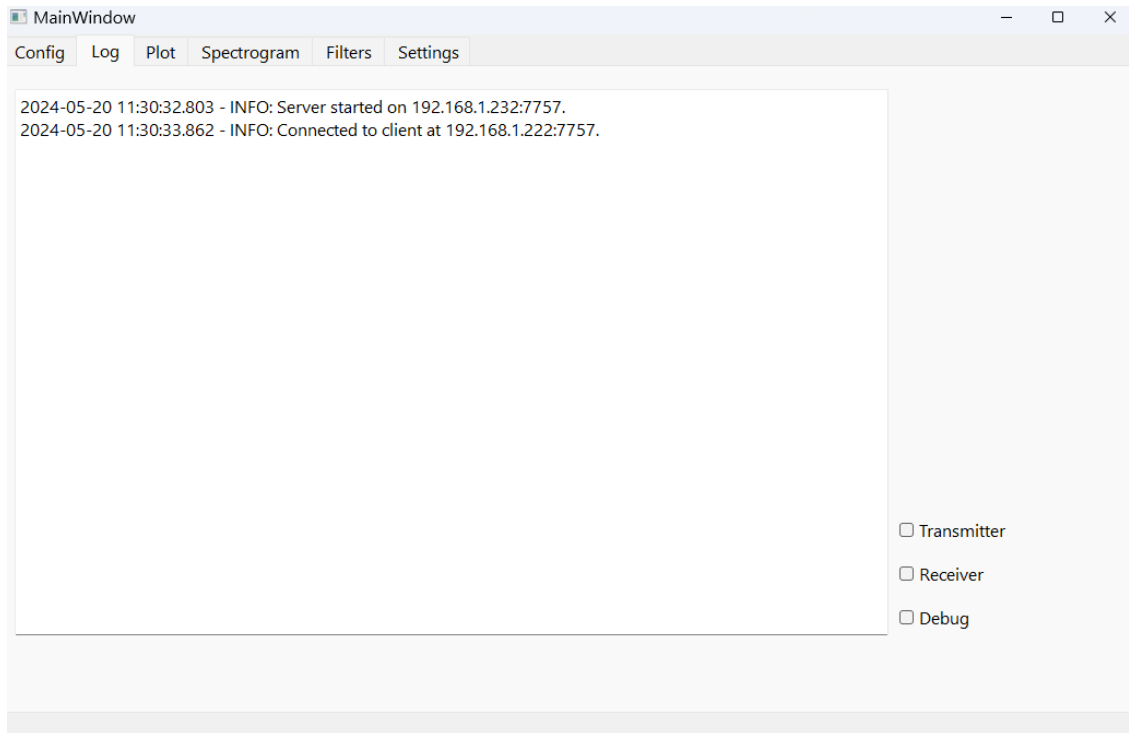
Kompiuterinė programa yra skirta vartotojui lengviau dirbti su prietaisu, naudojant vaizdinę aplinką. Programa suskirstyta į skirtingus langus. „Config” langas pavaizduotas 16 pav. Šiame lange galima pamatyti pagrindinius gaminio parametrus bei juos konfigūruoti. Galima sukonfigūruoti veikimo tipą, kanalus, nuskaitymo dažnį ar dešinės kojos signalo nuskaitymo kanalus. Taip pat galima nustatyti kiekvieną registrą individualiai. Taip suteikiama daugiau kontrolės naudotojui.



16 pav. Kompiuterinės programos konfigūravimo langas „Config”.



Lange „Log” pateikiamas programos žurnalas (angl. log) 17 pav. Jame galima matyti programos veikimo informaciją.



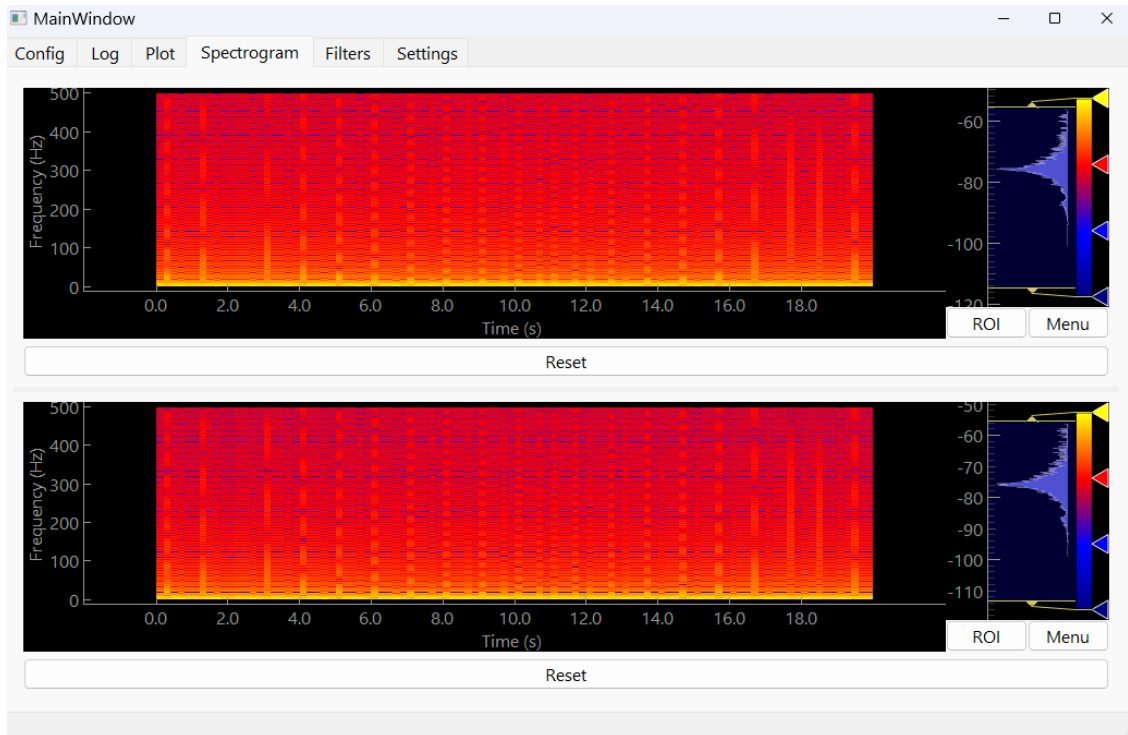
17 pav. Kompiuterinės programos žurnalo langas „Log”.

Lange „Plot” pateikiami abiejų kanalų matuojamos įtampos grafikai 18 pav. Grafikai automatiškai pakeičia ašių vertes priklausomai nuo įtampos verčių bei duomenų nuskaitymo dažnio. Taip galima lengvai įvertinti, kas yra matuojama ir kaip duomenys keičiasi laike.



18 pav. Kompiuterinės programos grafikų atvaizdavimo langas „Plot”.

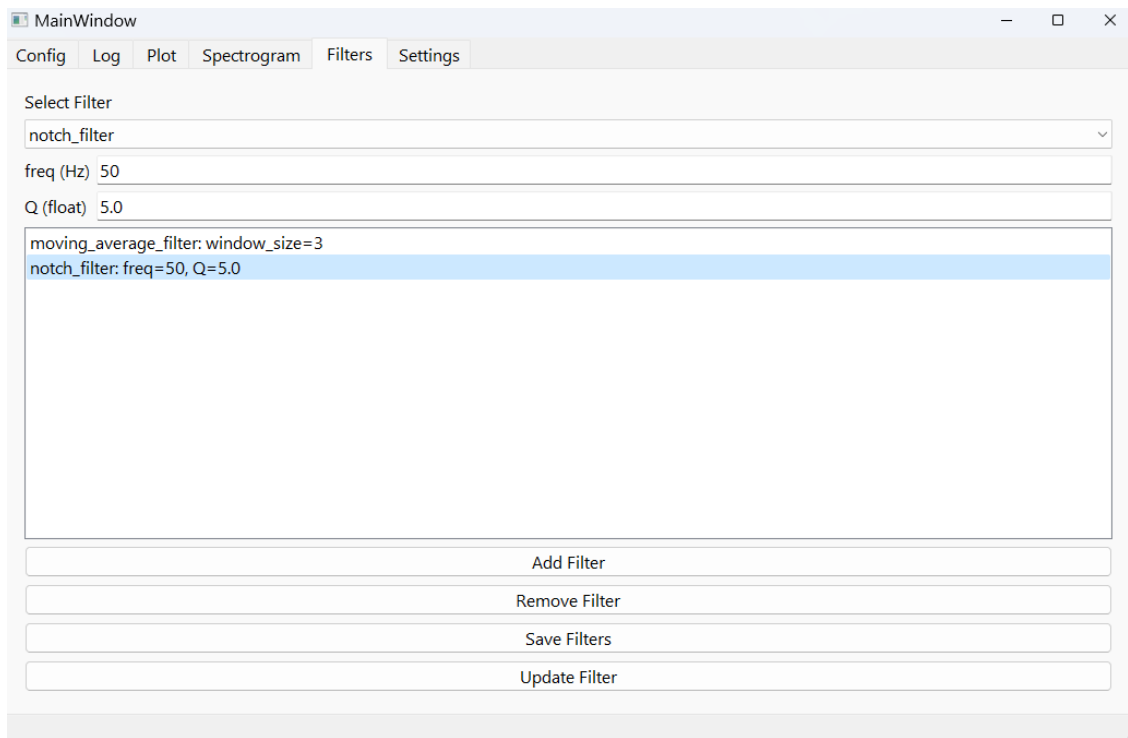
Lange „Spectrogram” pateikiamos abiejų kanalų spektrogramos 19 pav. Spektrogramos Y ašyje pavaizduoti dažniai, o X ašyje laikas. Spalva nurodo spektrinį tankį ir yra matuojama dB/Hz vienetais. Tai yra naudingas įrankis, norint nagrinėti dažninius signalus, tokius kaip EEG.



19 pav. Kompiuterinės programos spektrogramos langas „Spectrogram”.

Lange „Filters” galima nustatyti duomenų filtravimo tipus bei jų parametrus 20 pav. Filtrai yra ypač svarbūs realių signalų detektavime dėl aplinkos triukšmų, todėl juos reikia tinkamai sukonfigūruoti priklausomai nuo palinkos sąlygų. Filtrai, kuriuos galima naudoti programoje:

- Žemų dažnių filtras (angl. High-pass filter). Filtruoja dažnius mažesnius nei nurodytas.
- Aukštų dažnių filtras (angl. Low-pass filter). Filtruoja dažnius didesnius nei nurodytas.
- Juostinis filtras (angl. Notch filter). Filtruoja tik tam tikrą pasirinktą dažnį.
- Slankusis vidurkis (angl. Moving average). Filtras, kuris kiekvieną vertę suvidurkina su nurodytu kiekiu aplink jį esančių verčių. Veikia kaip tam tikras aukštų dažnių filtras.
- Kraštutinių verčių filtras (angl. Outlier filter). Filtras, kuris pašalina klaidingus duomenis, kurie gali atsirasti dėl laikino kontakto nebūvimo, duomenų nuskaitymo klaidos ir pan.



20 pav. Kompiuterinės programos filtrų langas „Filters”.

#### 2.4.6 Naudojamos išorinės bibliotekos

Visą naudojamą kodą galima rasti GitHub.

ESP32 kode naudojamos išorinės bibliotekos:

- Arduino programavimo biblioteka skirta ESP32 [24]. Tai leidžia naudoti standartines Arduino kalbos funkcijas su ESP32.
- AsyncUDP [28] yra iš ESP32-Arduino bibliotekos katalogo. Su ja galima asinchroniškai priimti UDP paketus bei juos išsiųsti.
- WiFi [29] biblioteka valdo ESP32 prisijungimą prie WiFi tinklo.
- SPI [30] biblioteka valdo ESP32 SPI sąsajos veikimą.

Kompiuterinės programos kode naudojamos išorinės bibliotekos:

- PyQt6 [31] naudojama sukurti vizualiai programos aplinkai.
- Scipy [27] duomenų analizei ir matematinėms operacijoms atlikti.
- NumPy [32] matematinės operacijos ir duomenų apdorojimo algoritmai.
- Pandas [33] matematinės operacijos ir duomenų apdorojimo algoritmai.
- PyQtGraph [34] duomenų atvaizdavimas grafikuose.

## 2.5 Matavimo metodika

Siekiant įvertinti prietaiso kokybę, yra atliekami tam tikrų prietaiso parametrų tyrimai. Šiame darbe atlikti tokie matavimai:

- Triukšmų matavimas.
- Nuolatinės įtampos nuskaitymo kokybė.
- Energijos suvartojimas.
- Realus EKG signalo matavimas.

### 2.5.1 Triukšmų matavimas

Prietaiso triukšmas matuojamas sujungus teigiamą bei neigiamą matavimo kanalą tarpusavyje, taip sukuriant trumpą jungimą jėjimuose. Šioje konfigūracijoje prietaisas matuoja tai, kas yra minimalus sistemos triukšmas. Įvertinus prietaisio triukšmą, galima daryti išvadas apie maksimalų prietaiso jautrumą.

### 2.5.2 Nuolatinės įtampos nuskaitymo kokybė

Matavimas skirtas įvertinti testuojamo prietaiso įtampos matavimo tikslumą matuojant skirtingas nuolatinės įtampos vertes.

Matavime yra naudojami:

- Maitinimo šaltinis *WZ5005E*, gebantis tiekti nuolatinę įtampą nuo 0 V iki 20 V žingsniu – 10 mV.
- Multimetras *UNI-T UT132C* naudojamas matuoti įtampai ir varžai. Parametrai:
  - Įtampos matavimo diapazonai: 0,2 V; 2 V; 20 V.
  - Įtampos matavimo paklaida:  $\pm(0,5\% + 2)$ .
  - Varžos matavimo diapazonai: 200  $\Omega$ ; 2 k $\Omega$ ; 20 k $\Omega$ ; 200 k $\Omega$ ; 2 M $\Omega$ .
  - Varžos matavimo paklaida:  $\pm(1,2\% + 3)$ .
- Varžų daliklių rinkinys, skirtas sumažinti matuojamos įtampos amplitudę.

Matavimo schemos aprašymas:

- Maitinimo šaltinis sujungtas su varžų daliklio jėjimu.
- Varžų daliklio išėjimas sujungtas su ADC jėjimo teigimu (prijungtas maitinimo šaltinio teigiamas išėjimas) ir neigiamu kanalu (prijungta žemė).
- ADC jėjimas (teigiamas ir neigiamas) yra prijungtas prie pusės prietaiso maitinimo įtampos 1,65 V. Taip yra parenkamas bendras matavimo taškas, pagal kūrį skirtuminis stiprintuvas gali matuoti prijungtą įtampą.
- Multimetras prijungtas prie maitinimo šaltinio išėjimo kaip voltmetras.

Matavimas atliekamas keičiant maitinimo šaltinio įtampos vertes norimuose režimuose ir jas matuojant testuojamu prietaisu.

### 2.5.3 Energijos suvartojimas

Matavime yra naudojami:

- Maitinimo šaltinis *WZ5005E*, gebantis tiekti nuolatinę įtampą nuo 0V iki 20V. Taip pat turi galios matavimo funkciją.

Matavimo schemos aprašymas:

- Gaminys įjungiamas naudojant maitinimo šaltinį.
- Energija suvartojimas matuojamas su tam tikra testuojamo prietaiso konfigūracija nustatyta laiko tarpą.
- Energijos suvartojimas yra matuojamas su skirtingais testuojamo prietaiso veikimo režimais (konfigūracijomis).

Svarbu įvertinti energijos suvartojimą, kad būtų galima nustatyti, kiek laiko gali veikti prietaisas su vienu baterijos įkrovimu, kai gaminys bus maitinamas baterija. Testavimas su skirtingomis konfigūracijomis taip pat leidžia suprasti, kuri prietaiso dalis sunaudoja daugiausia energijos ir ar galima šias sąnaudas sumažinti.

### 2.5.4 Realus EKG signalo matavimas

Matavimui naudojami *ESVIsensor GS54* Ag/AgCl elektrodai 21 pav. Tai yra geliniai elektrodai kurie yra prilipinami prie matuojamo kūno odos. Šiuo atveju buvo naudojami trys elektrodai: du prijungti prie skirtuminio stiprintuvo įėjimo viename kanale (P ir N elektrodai), o trečiasis yra dešinės kojos elektrodas (RLD).



21 pav. *ESVIsensor GS54* Ag/AgCl elektrodas

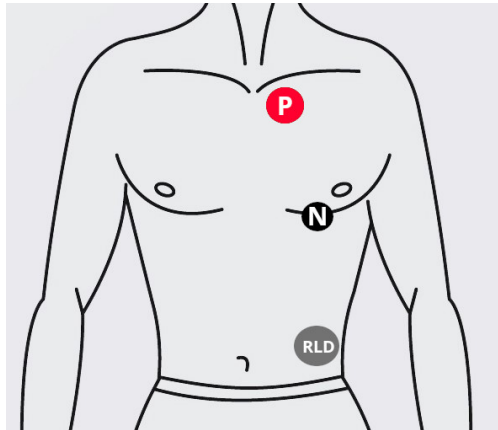
Testavimo metu buvo atjungti varžų dalikliai, kurie sugeneruoja pusę maitinimo įtampos ADC įėjimuose. Jų nebereikia, dėl RLD elektrodo. Detaliau, kaip tai veikia:

- Elektrodai prijungiami prie kūno.

- P ir N elektrodai matuoja kūno įtampą. Išmatuotos įtampos gali nepakliūti į ADC matuojamus režius.
- P ir N elektrodų išmatuotas signalas nukreipiamas į RLD grandinę, kur sugeneruojamas priešingos fazės signalas išmatuotam bendram signalui (angl. common-mode signal) bet taip pat ir sugeneruojama pastovus DC signalas pusės maitinimo įtampos vertės.
- Šie signalai per RLD elektrodą yra nukreipiami į matuojamą kūną. Taip sumažinami per visą kūną indukuoti triukšmai ir matuojama įtampa pakliūna į teisingus režius.

Nuo elektrodų pozicijos priklauso ir išmatuotas signalas. Siekiant pasiekti geresnį signalą, elektrodai klijuojami arti širdies, kaip pavaizduota 22 pav.

RLD neužteks, kad atsikratyti visų indukuotų triukšmų, todėl reikalingas filtravimas. EKG matavimui esminiai filtrai yra žemų ir aukštų dažnių filtrai, paliekant tik dominantį signalą režiuose nuo 0,5Hz iki 100Hz. Juostinis filtras skirtas išfiltruoti 50Hz triukšmą. Slenkančio vidurkio filtras stabilizuoja signalą, kad geriau matytųsi EKG tendencija.



22 pav. Elektrodų prijungimas prie kūno. [35]

### 3 Rezultatai

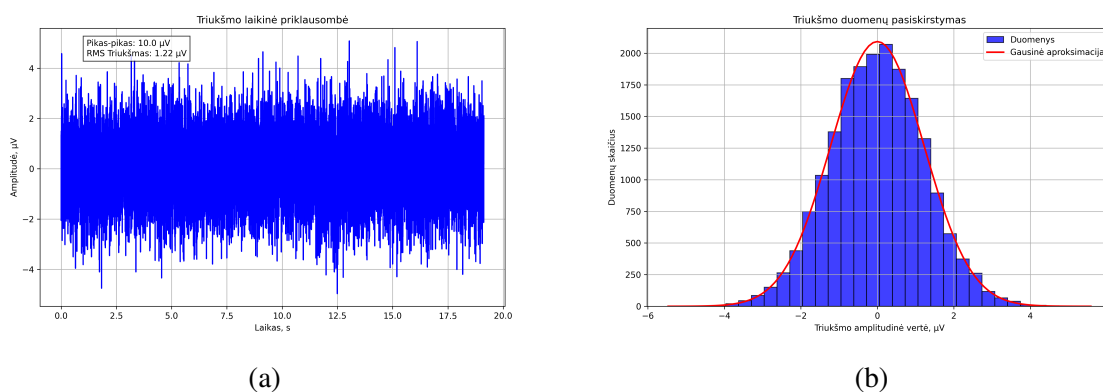
Sėkmingai įgyvendintas bevielės informacijos perdavimas iš prietaiso į kompiuterinę programą 1 kSPS sparta (1000 nuskaitytų verčių per sekundę). Tai yra pakankamai greita sparta, kad būtų galima matuoti biologinius signalus, tokius kaip EKG. Naudojamas ADC ADS1292 gali nuskaityti duomenis ir didesne sparta, tačiau tokiu atveju atsiranda klaidos nuskaityme, nes mikrovaldiklis nespėja su tokiais greičiais. Galima optimizuoti mikrovaldiklio kodą ir bandyti išgauti geresnę veikimą, tačiau 1 kSPS sparta yra pakankama biopotencialams registruoti.

#### 3.1 Triukšmų įvertinimas

Išmatuotos kelios prietaiso triukšmų priklausomybės. Matavimo metu naudojamos tokia prietaiso konfigūracija:

- Tarpusavyje sujungti teigiamas ir neigiamas kanalo įėjimas.
- Stiprinimas – 12
- Nuskaitymo dažnis – 1 kSPS
- Kanalų skaičius – 1

Triukšmo matavimo rezultatai pateikti 23 pav. Galima matyti, kad signalo pasiskirstymas yra gausinis, o didžiausi nuokrypiai nuo vidurkio išmatuotame intervale yra  $\pm 5 \mu\text{V}$ . Toks triukšmas yra palyginamas su [4] pateiktais triukšmo rodikliais (ten naudojama kitokia prietaiso konfigūracija, tačiau vertės palyginamos). Galima teigti, kad šioje sistemos dalyje papildomi triukšmai yra minimalūs.



23 pav. Triukšmo matavimo rezultatai. (a) – Triukšmo matavimo įtampos laikinė priklausomybė. (b) – Triukšmo verčių pasiskirstymo histograma.

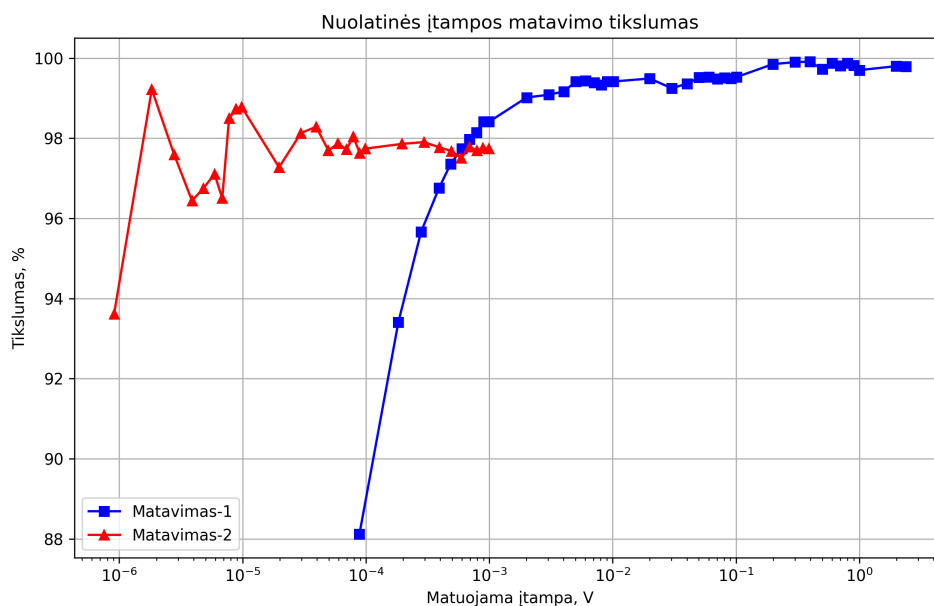
#### 3.2 Nuolatinės įtampos nuskaitymas

Prietaiso tikslumas nuolatinės įtampos matavime pavaizduotas 24 pav. Grafike pateiktos dvi priklausomybės, nes *Matavimas-1* atveju buvo matuojama įtampa nuo žemės potencialo. Tačiau, dėl varžų daliklio netikslumo tarp teigiamo ir neigiamo kanalų įėjimo, įtampa nėra matuojama nulinio

potencialo atžvilgiu. Dėl šios priežasties, pradeda kristi matavimo tikslumas mažinant įtampos amplitudę.

Tuomet buvo pakeista įtampos matavimo technika, kuri atsispindi *Matavimas-2*. Nuskaitoma įtampa, o tuomet įėjimai apkeičiami vietomis ir vėl nuskaitoma įtampa. Surandamas vidurkis tarp verčių, kuris yra tiksli amplitudinė vertė. Tai reikia turėti omenyje atliekant matavimus ateityje. Kompensuoti šį poslinkį galima programiškai, atliekant perkalibravimą. Šiame darbe tai nėra daroma, nes kūno biopotencialų matavime šios problemos nėra dėl RLD implementacijos.

Iš grafiko taip pat galima matyti, kad prietaiso tikslumas yra geras didelėms įtampų vertėms ir tai yra įtampos matavimo prietaiso paklaidų ribose. Tikslumas pradeda reikšmingai kisti, kai įtampa yra apie  $10\mu\text{V}$ . To galima tikėtis iš anksčiau pateiktų triukšmo matavimo rezultatų. Taigi rezultatas tenkina.

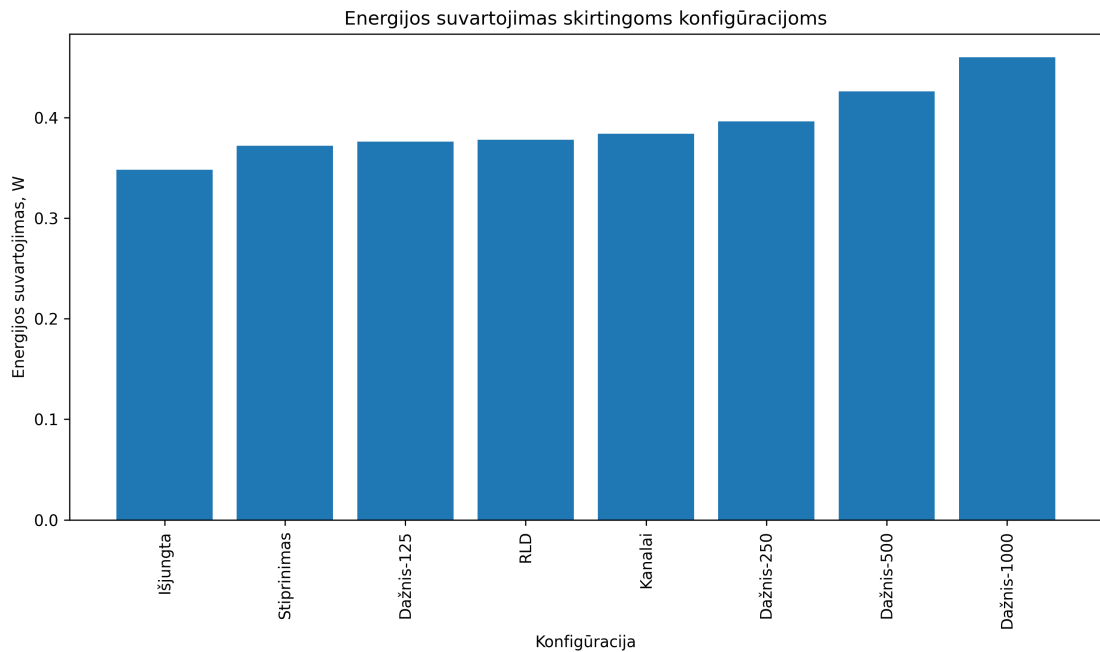


24 pav. Prietaiso nuolatinės įtampos nuskaitymo tikslumas skirtingoms įėjimo įtampos vertėms. *Matavimas-1* atliktas lyginant įtampą su žeme (0 V), o *Matavimas-2* yra skirtuminė įtampos vertė tarp įėjimų.

### 3.3 Energijos suvartojimas

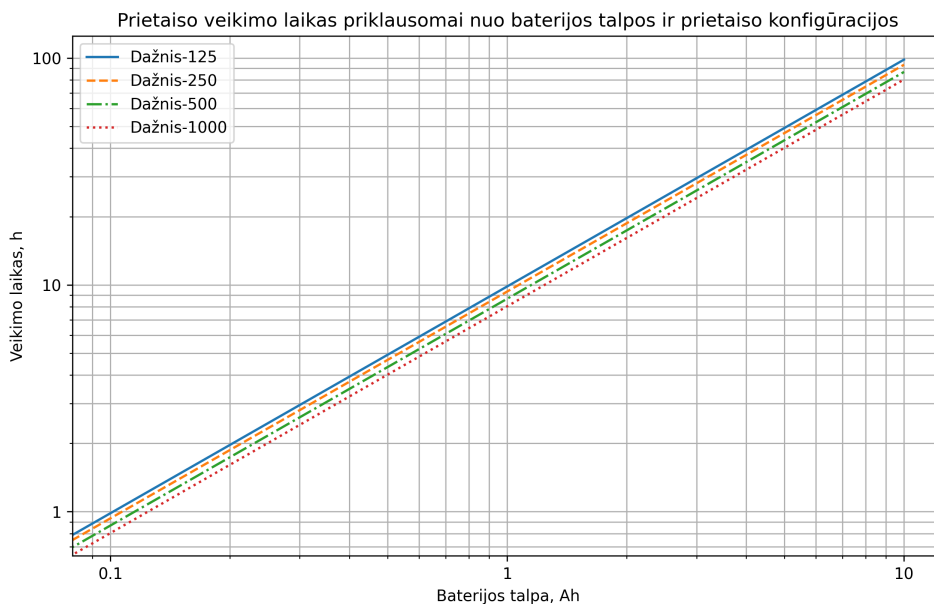
Nešiojamiems prietaisams svarbus mažas energijos suvartojimas. Prietaiso energijos suvartojimas (mikrovaldiklio kartu su ADC) skirtingais veikimo režimais pateiktas 25 pav. Galima matyti, jog stiprinimo koeficientas, RLD bei įjungtų kanalų kiekis neturi didelės įtakos energijos suvartojimui. Didžiausią įtaką daro nuskaitymo dažnis. Su didesniu nuskaitymo dažniu taip pat ir duomenų siuntimo sparta didesnė, o tai padidina mikrovaldiklio energijos sąnaudas. Kai ADC duomenų nuskaitymas išjungtas, energijos suvartojimas sumažėja nežymiai. Iš to galima spręsti, jog didžiausią energijos dalį išnaudoja mikrovaldiklis, o ne ADC.





25 pav. Prietaiso energijos suvartojimas skirtingais veikimo režimais.

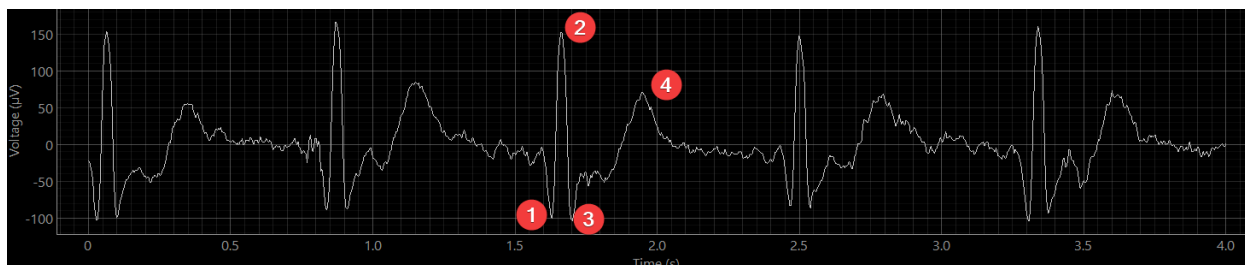
Išmatuotoms energijos suvartojimo vertėms pateiktas teorinės baterijos veikimo grafikas priklausomai nuo talpos 26 pav. Baterija su 1000mAh talpa gali būti nedidelių gabaritų, o su ja prietaisas galėtų veikti tarp 8h ir 10h, priklausomai nuo nuskaitymo dažnio. Jei tai nepakankama, reiktų keisti mikrovaldiklį į našesnį arba optimizuoti kodą (mažinti prisijungimų prie tinklo skaičių ir pan.).



26 pav. Prietaiso veikimo laikas priklausomai nuo teorinės talpos baterijos skirtingais veikimo režimais.

### 3.4 Realus EKG signalo matavimas

Išmatuotas žmogaus kūno EKG signalas pateiktas 27 pav. Absoliuti signalo įtampos vertė priklauso nuo elektrodų kokybės ir pozicijos ant kūno. Todėl šiuo atveju reikia nagrinėti signalo formą. Paveiksle pateiktas tik matavimo fragmentas, ilgesnio matavimo metu pagal pikų skaičių buvo įvertintas žmogaus pulsas, kuris buvo apie 70 dūžių per minutę ir atitinka matavimo rezultatus.



27 pav. Žmogaus kūno EKG signalas po filtravimo. Skaičiais pažymėtos pagrindinės EKG signalo dalys.

Šis rezultatas pasiektas naudojant:

- Didžiausią stiprinimą – 12.
- Nuskaitymo dažnį – 250 SPS.
- Įjungtas RLD.
- Aukštų dažnių filtras – 100 Hz.
- Žemų dažnių filtras – 0,5 Hz.
- Juostinis filtras – 50 Hz.
- Slenkančio vidurkio filtras – 10 verčių.

Be šių filtrų, vizualiai išskirti EKG signalo neįmanoma.

Paveiksle skaičiais pažymėtos pagrindinės EKG signalo dalys: 1 ir 3 yra neigiami pikai, o 2 bei 4 yra teigiami pikai. Šių pikų tendencijos yra teisingos lyginant su tipiniais EKG matavimais, o tikslesnę jų formą (jei to reikia) galima bandyti išgauti naudojant kitokius filtrų parametrus ar filtrų kombinacijas.

## Išvados

Sukurtas prietaisas, naudojantis *ADS1292* analoginį-skaitmeninį keitiklį, geba registruoti įtampos signalus 24 bitų raiška dviem kanalais. Duomenų registravimo sparta siekia 1 kHz, o tai leidžia išskirti iki 500 Hz dažnio signalus. Šie prietaiso parametrai yra pakankami registruoti EKG bei EEG biopotensinius signalus. Prietaisas taip pat geba perduoti išmatuotus duomenis WiFi tinklu į kitus įrenginius.

Sukurta kompiuterinė (Windows ir Linux operacinėms sistemoms) duomenų registravimo ir prietaiso valdymo programa. Ji su prietaisu komunikuoja WiFi tinklu (būtina būti prisijungus prie to paties tinklo), o tai reiškia nuotolinį valdymą. Programoje galimas duomenų atvaizdavimas laikinėje bei dažninėje erdvėje (signalų reali ir menama dalys bei galios spektras). Taip pat galima nustatyti duomenų filtravimo tipus bei jų parametrus.

Prietaisas geba tiksliai matuoti signalus iki  $10\mu\text{V}$ . Sėkmingai registruoja EKG signalus bei filtruoja triukšmus ar kitus nepageidaujamus signalus.

Energijos suvartojimas prietaiso veikimo metu leidžia jį pritaikyti laboratoriniams tyrimams su gyvūnais. Laboratorinės žiurkytės sugeba panešti 2000 mAh bateriją, o tai atitinka apie 20 valandų prietaiso veikimą.

## Literatūra

- [1] M. N. David Prutchi, *Design and Development of Medical Electronic Instrumentation: A Practical Perspective of the Design, Construction, and Test of Medical Devices*, 1st ed. Wiley-Interscience, 2004.
- [2] E. Sazonov, *Wearable Sensors: Fundamentals, Implementation and Applications*, 2nd ed. Academic Press, 2020.
- [3] B. Lizon and Texas Instruments Incorporated, “Fundamentals of precision ADC noise analysis,” Sep 2020. [Online]. Available: [https://www.ti.com/lit/eb/slyy192/slyy192.pdf?ts=1684235974615&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/eb/slyy192/slyy192.pdf?ts=1684235974615&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)
- [4] Texas Instruments, “Ads129x low-power, 2-channel, 24-bit analog front-end for biopotential measurements datasheet (rev. c).” [Online]. Available: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1292.pdf?ts=1655728151045&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FADS1292](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1292.pdf?ts=1655728151045&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FADS1292)
- [5] J. G. Webster, “Encyclopedia of medical devices and instrumentation || bioelectrodes,” apr 2006.
- [6] S. Chatterjee, R. S. Thakur, R. N. Yadav, L. Gupta, and D. Kumar, “Review of noise removal techniques in ecg signals,” *IET Signal Processing*, vol. 15, no. 1, pp. 1–14, 2021.
- [7] Espressif. [Online]. Available: <https://www.espressif.com/>
- [8] “FreeRTOS - market leading RTOS (Real Time Operating System) for embedded systems,” Nov 2018. [Online]. Available: <https://www.freertos.org/>
- [9] E. Systems, “ESP32-WROOM-32 datasheet.” [Online]. Available: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf)
- [10] B. Baker and Texas Instruments Incorporated, “How delta-sigma ADCs work, part 1 (rev. a),” 2011. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/an/slyt423a/slyt423a.pdf?ts=1655308282226>
- [11] B. Baker and Texas Instruments Incorporated., “How delta-sigma ADCs work, part 2,” 2011. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/an/slyt438/slyt438.pdf?ts=1655369671827>
- [12] B. Pisani and Texas Instruments Incorporated, “Digital filter types in delta-sigma ADCs,” May 2017. [Online]. Available: [https://www.ti.com/lit/an/sbaa230/sbaa230.pdf?ts=1655728221340&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/an/sbaa230/sbaa230.pdf?ts=1655728221340&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)
- [13] Wikimedia Foundation, “Serial peripheral interface,” Jun 2022. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Serial\\_Peripheral\\_Interface](https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface)
- [14] “Introduction to SPI interface,” 2018. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/introduction-to-spi-interface.html>

- [15] M. Hughes, “Back to basics: SPI (serial peripheral interface),” 2017. [Online]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/spi-serial-peripheral-interface/>
- [16] APS Group, “Annual statistics of scientific procedures on living animals great britain 2018,” 2019. [Online]. Available: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/835935/annual-statistics-scientific-procedures-living-animals-2018.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/835935/annual-statistics-scientific-procedures-living-animals-2018.pdf)
- [17] Janvier Labs, “Wistar rat.” [Online]. Available: [https://janvier-labs.com/en/fiche\\_produit/wistar\\_rat/#onglet\\_\\_4](https://janvier-labs.com/en/fiche_produit/wistar_rat/#onglet__4)
- [18] P. Kumar, P. Srivastava, A. Gupta, and M. Bajpai, “Noninvasive recording of electrocardiogram in conscious rat: A new device,” *Indian Journal of Pharmacology*, vol. 49, no. 1, pp. 116–118, Jan–Feb 2017.
- [19] Microchip Technology Incorporated, “MCP1703 data sheet.” [Online]. Available: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/OTH/ProductDocuments/DataSheets/22049f.pdf>
- [20] PlatformIO Labs. [Online]. Available: <https://platformio.org/>
- [21] Arduino Team. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/reference/en/>
- [22] Microsoft. [Online]. Available: <https://code.visualstudio.com/>
- [23] Espressif, “Esp-idf.” [Online]. Available: <https://github.com/espressif/esp-idf>
- [24] “espressif/arduino-esp32.” [Online]. Available: <https://github.com/espressif/arduino-esp32>
- [25] QT Group, “Qt creator.” [Online]. Available: <https://www.qt.io/product/development-tools>
- [26] R. Computing, “Pyqt6 – riverbank computing.” [Online]. Available: <https://www.riverbankcomputing.com/software/pyqt/>
- [27] “Scipy.” [Online]. Available: <https://pypi.org/project/scipy/>
- [28] “Asyncudp.” [Online]. Available: <https://github.com/espressif/arduino-esp32/tree/master/libraries/AsyncUDP>
- [29] “Wifi esp32.” [Online]. Available: <https://github.com/espressif/arduino-esp32/tree/master/libraries/WiFi>
- [30] “Spi esp32.” [Online]. Available: <https://github.com/espressif/arduino-esp32/tree/master/libraries/SPI>
- [31] “Pyqt6.” [Online]. Available: <https://pypi.org/project/PyQt6/>
- [32] “Numpy.” [Online]. Available: <https://pypi.org/project/numpy/>

- [33] “Pandas.” [Online]. Available: <https://pypi.org/project/pandas/>
- [34] “Pyqtgraph.” [Online]. Available: <https://pypi.org/project/pyqtgraph/>
- [35] Freepik, “Free vector hand drawn human body outline illustration.” [Online]. Available: [https://www.freepik.com/free-vector/hand-drawn-human-body-outline-illustration\\_49545871.htm#query=human%20body%20outline%20drawing&position=5&from\\_view=keyword&track=ais\\_user&uuid=97d94e87-4124-4905-8167-9e529cb28f81](https://www.freepik.com/free-vector/hand-drawn-human-body-outline-illustration_49545871.htm#query=human%20body%20outline%20drawing&position=5&from_view=keyword&track=ais_user&uuid=97d94e87-4124-4905-8167-9e529cb28f81)

# Santrauka

## EKG IR EEG BIOPOTENCIALŲ REGISTRAVIMAS IR PERDAVIMAS BEVIELIU RYŠIU

Domantas Čiapas

Prieinamas, bevielis ir konfigūruojamas pagal poreikius biopotencialų matavimo prietaisas yra pageidaujamas įrankis biologinių signalų laboratoriniams tyrimams su gyvūnais. Šiame darbe kuriamas prietaisas, kuris skirtas EKG bei EEG signalų matavimui. Prietaisas turi būti pakankamai didelės spartos bei jautrumo, tačiau taip pat lengvas ir taupus energijos sąnaudomis, kad atitiktų reikiamas sąlygas.

Pagamintas prietaisas naudoja *ADS1292* analoginį-skaitmeninį keitiklį biopotencialų nuskaitymui. Šis modulis turi du nuskaitymo kanalus su 24 bitų raiška bei kairės kojos elektrodo (RLD) funkcionalumą. Pasiektas stabilus veikimas iki 1 kHz nuskaitymo dažnio. Šio modulio valdymas bei bevielis duomenų perdavimas Wi-Fi ryšiu yra vykdomas naudojant *ESP32* mikrovaldiklį. Perduotus duomenis nuskaityto sukurta kompiuterinė programa. Biopotenciniai signalai yra paveikti dideliu triukšmų kiekiu, todėl programoje yra įdiegti signalo filtravimo įrankiai. Taip pat programoje įdiegta galimybė konfigūruoti gaminį bei atvaizduoti duomenis laikinėje ir dažninėje erdvėje.

Pagamintas prietaisas yra pakankamai tikslus matuoti biopotencinius signalus ir buvo išbandytas matuoti žmogaus EKG signalą. Prietaisas yra pakankamai mažas ir lengvas, kad būtų galima jį naudoti su mažais laboratoriniais gyvūnais (pvz. žiurkėmis) iki dešimties valandų.

## Summary

### ECG AND EEG BIOPOTENTIAL SIGNAL MEASUREMENT AND TRANSMISSION VIA WIRELESS CONNECTION

Domantas Čiapas

A wireless and customizable biopotential measurement device is a desired tool for laboratory research on biological signals with animals. In this work, a device is being developed for measuring ECG and EEG signals. The device needs to be sufficiently high-speed and sensitive, but also lightweight and energy-efficient to meet the required conditions.

The manufactured device uses the *ADS1292* analog-to-digital converter for biopotential readings. This module has two reading channels, 24-bit resolution, and right leg drive (RLD) functionality. Stable operation is achieved up to a sampling rate of 1 kHz. The control of this module and wireless data transmission via Wi-Fi is handled by the *ESP32* microcontroller. The transmitted data is read by a custom created computer program. Biopotential signals are affected by a significant amount of noise, so the program includes signal filtering tools. Additionally, the program features product configuration and the ability to display data in both time and frequency domains.

The manufactured device is sufficiently accurate for measuring biopotential signals and has been successful in measuring human ECG signals. The device is small and lightweight enough to be used with small laboratory animals (e.g., rats) for up to ten hours.