



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

# **MIKROKONTROLLERIL PÕHINEVA KAASASKANTAVA OSTSILOSKOABI ARENDUS**

## **THE DEVELOPMENT OF A PORTABLE MICROCONTROLLER-BASED OSCILLOSCOPE**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Christian Roos

Üliõpilaskood: 206579EAAB

Juhendaja: Martin Sarap, doktorant-  
nooremteadur

Tallinn 2023

# AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." ..... 20.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 20.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....20.....

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Christian Roos

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Mikrokontrolleril põhineva kaasaskantava ostsilloskoobi arendus, mille juhendaja on Martin Sarap,
  - 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
  - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

17.05.2023

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Christian Roos

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Mikrokontrolleril põhineva kaasaskantava ostsilloskoobi arendus

*Kuupäev:*  
17.05.2023

*54 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)*

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* doktorant-nooremteadur Martin Sarap

*Töö konsultant (konsultandid):* -

*Sisu kirjeldus:*

Bakalaureusetöö eemärgiks on disainida mikrokontrolleril põhinev kaasaskantav ostsilloskoop, et seda õppetöös kasutada.

Töö teooria osas uuriti ostsilloskoopide tööpõhimõtteid ning turul olemasolevaid lahendusi. Komponentide valikul pöörati suuremat tähelepanu mikrokontrolleri valikule, selleks võrreldi erinevate tootjate poolt valmistatavaid kontrollereid tehniliste andmete, maksumuse ja tehnilise toe põhjal.

Ostsilloskoobi disain jagunes elektroonika disainiks (sealhulgas elektriskeemi loomine ja trükkplaadi disain), tarkvara kirjutamiseks ja kasutajaliidese loomiseks. Töö tulemusena valmis akutoitega juhtmevaba ostsilloskoop, mis saadab mõõtetulemused telefonirakendusele, mis võimaldab tulemuste analüüsimist ja ostsilloskoobi seadistamist.

Peale ostsilloskoobi valmimist sooritati mõõtmiskatsed, et hinnata ostsilloskoobi mõõtetäpsust ning kasutamise praktilisust.

*Märksõnad:* ostsilloskoop, mikrokontroller, ADC, Bluetooth, signaalitöötlus

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Christian Roos	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> The development of a portable microcontroller-based oscilloscope	
<i>Date:</i> 17.05.2023	<i>54 pages (the number of thesis pages including appendices)</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Martin Sarap, Early Stage Researcher	
<i>Consultant(s):</i> -	
<i>Abstract:</i>  The aim of the thesis was to develop a portable microcontroller-based oscilloscope for educational purposes.  The theory part of the thesis examines the working principles of an oscilloscope and gives an overview of the currently available solutions on the market. During the component selection, emphasis was placed on the selection of the microcontroller based on the technical specifications, cost and technical support of microcontrollers produced by different manufacturers.  The design of the oscilloscope consisted of electronics design (including electronic schematic and printed circuit board design), firmware development and graphical user interface design. The designed oscilloscope sends measurement results to a mobile application, that enables the analysis of results and the configuration of the oscilloscope. To determine the precision and practicality of the oscilloscope, test measurements were conducted.	
<i>Keywords:</i> oscilloscope, microcontroller, ADC, Bluetooth, signal processing	

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	<b>Mikrokontrolleril põhineva kaasaskantava ostsilloskoobi arendus.</b>
Lõputöö teema inglise keeles:	<b>The development of a portable microcontroller-based oscilloscope.</b>
Üliõpilane:	<b>Christian Roos, 206579EAAB</b>
Eriala:	<b>Elektroenergeetika ja mehhatroonika</b>
Lõputöö liik:	<b>bakalaureusetöö</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Martin Sarap</b>
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt)	
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	<b>kehtivusaja annab juhendaja</b> 2022/2023      2022/2023 Kevad
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>18.05.2023 kell 15:00</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

---

Kaasjuhendaja (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Ostsilloskoop on elektroonika õpetamisel multimeetri kõrval kõige kasulikum mõõtevahend, kuid keskmine ostsilloskoop on liiga kulukas, et seda efektiivselt õppetöös kasutada. Selle lahendamiseks on küll välja töötatud odavamad kaasaskantavad ostsilloskoobid, kuid needki on praeguse seisuga suhteliselt kõrge maksumusega. Antud töö käigus proovitaksegi välja töötada ostsilloskoop, mis oleks ühest küljest piisavalt odav, et seda oleks võimalik kasutada õppetöös, kuid teisest küljest piisavalt suure mõõtmiskiiruse ja täpsusega, et sellega oleks võimalik efektiivsemalt õppetöö käigus koostatud elektroonikaskeemidest vigu leida.

## **2. Töö eesmärk**

Töö eesmärgiks on valmistada mikrokontrolleril Raspberry Pico põhinev kaasaskantav ostsilloskoop ning luua sellele kasutajaliides telefonirakenduse näol. Seadme valmimisel uuritakse seadme mõõtetäpsust ning kasutamise võimalikkust lihtsamate mõõtmiste tegemisel.

## **3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

1. Välja töötada mikrokontrolleril põhineva ostsilloskoobi füüsiline prototüüp.
2. Arendada ostsilloskoobile tarkvara, mis võimaldaks piisavalt suurel mõõtesagedusel mõõtmisi sooritada.
3. Luua kasutajaliides (mobiilirakendus), mille abil oleks võimalik kasutajale esitada ostsilloskoobi poolt mõõdetud tulemused ning neid töödelda ja salvestada.
4. Uurida välja töötatud seadme mõõtetäpsust erinevates mõõtepiirkondades.

## **4. Lähteandmed**

Püstitatud eesmärkide lahendamiseks saadakse andmed eelkõige elektriliste mõõtmistega seotud teostest ning veebist, sh komponentide andmelehtedest ja artiklitest.

## **5. Uurimismeetodid**

Töö läbi viimiseks kasutatakse mitmeid erinevaid meetodeid. Esiteks tuleb mikrokontrolleri ja muude komponentide andmelehtede ja tarkvara arendamise dokumentatsiooni põhjal luua ostsilloskoobi elektriskeem, mille põhjal disainida trükkplaat. Teiseks tuleb dokumentatsiooni ja muude allikate toel mikrokontrollerile arendada programmikood, mis võimaldaks mõõtmiste sooritamist nii ühe kui ka mitme kanali korral võimalikult suurel kiirusel, andmete edastamist kasutajaliidesele ning mõõtmisseadete muutmist kasutajaliidese poolt. Kolmandaks tuleb disainida kasutajaliides, millelt oleks võimalik välja lugeda ostsilloskoobi poolt mõõdetud andmed ja mille kaudu oleks võimalik ostsilloskoopi seadistada. Lõpuks tuleks seadme disaini

analüüsida, võrrelda seda olemasolevate lahendustega ning leida võimalusi ostsilloskoobi edasi arendamiseks.

## **6. Graafiline osa**

Töö graafilise osa hulka kuuluksid järgmised joonised, tabelid ja skeemid:

- tähtsamate kasutatud komponentide (mikrokontroller, andmesidemoodul) elektriskeemid viikude tähistega
- välja töötatud ostsilloskoobi elektriskeem
- joonis kasutajaliidese kujundusest
- plokk skeem ostsilloskoobi poolt mõõdetud andmete töötlemise algoritmist
- graafikud mõõtetulemuste illustreerimiseks
- tabel(id) välja töötatud ostsilloskoobi mõõtetäpsusest

Töö graafiline osa paikneks peamiselt töö põhiosas, kuid joonised, tabelid või skeemid, mis võtavad üle poole lehekülje ruumi, paigutatakse lisadesse.

## **7. Töö struktuur**

1. Sissejuhatus
2. Taustainfo
  - 2.1. Ostsilloskoobid
  - 2.2. Turul olemas olevad lahendused
3. Kasutatavad komponendid
  - 3.1. Raspberry Pico
  - 3.2. Andmesidemoodul HC-06
4. Ostsilloskoobi välja töötamine
  - 4.1. Elektriskeem
  - 4.2. Programmikood
  - 4.3. Kasutajaliides



5. Välja töötatud seadme analüüs
  - 5.1. Esmased mõõtmised
  - 5.2. Mõõtetulemuste ülevaade
  - 5.3. Mõõtetäpsuse leidmine
6. Kokkuvõte
7. Kasutatud materjalid
8. Lisad

## **8. Kasutatud kirjanduse allikad**

Töö peamiste kirjanduse allikate hulka kuuluvad:

- Raspberry Pico ja sellele vastavate tarkvarateekide dokumentatsioon:  
<https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/raspberry-pi-pico.html>
- Bluetooth mooduli HC-06 andmeleht:  
<https://www.olimex.com/Products/Components/RF/BLUETOOTH-SERIAL-HC-06/resources/hc06.pdf>
- Olemasolevate lahenduste kodulehed. Näiteks kaasaskantava ostsilloskoobi Pokit Meter koduleht: <https://www.pokitinnovations.com>

## **9. Lõputöö konsultandid**

-

## **10. Töö etapid ja ajakava**

- Lõputöö ülesande esitamine (01.11.2022)
- Esialgse elektriskeemi ja programmikoodi loomine, eesmärgiks lugeda analoogsignaali väärtust ja edastada see Bluetooth'i abil välisele seadmele (06.11.2022)
- Esialgse kasutajaliidese loomine Bluetooth'i kaudu saadud andmete kuvamiseks (31.11.2022)

- Prototüübi kokku panemine ja katsetamine, eesmärgiks mõõta alalis- ja vahelduvpinget ning edastada näidud kasutajaliidesele (31.12.2022)
- Ostsilloskoobi jaoks PCB koostamine (31.01.2023)
- Kasutajaliidesele graafikute kujutamise lisamine (31.02.2023)
- Lõputöö teooria osa kirjutamine (31.02.2023)
- Lõputöö praktilise ja arvutusliku osa kirjutamine, töö esimene versioon valmis (31.03.2023)
- Tööle paranduste sisse viimine (16.04.2023)
- Eelkaitsmiseks esitluse koostamine (23.04.2023)
- Eelkaitsmine (25.04.2023)
- Kaitsmistaotluse esitamine (08.05.2023)
- Lõputöö esitamine (18.05.2023)
- Kaitsmise esitluse faili esitamine (03.06.2023)
- Lõputöö kaitsmine (06.06.2023)

# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....	4
ABSTRACT .....	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	6
EESSÕNA .....	9
Lühendite ja tähiste loetelu .....	10
SISSEJUHATUS .....	11
1 OSTSILLOSKOABI TÖÖPÕHIMÕTE.....	12
1.1 Ostsilloskoop.....	12
1.2 Analoog-digitaalmuundur (ADC) .....	13
1.3 Olemasolevad lahendused.....	15
2 OSTSILLOSKOABI DISAIN .....	18
2.1 Nõuded lahendusele.....	18
2.2 Komponentide valik .....	19
2.2.1 Mikrokontroller.....	21
2.2.2 Andmesideliides .....	23
2.2.3 Muud komponendid .....	23
2.3 Elektroonika.....	26
2.4 Tarkvara.....	31
2.5 Kasutajaliides.....	36
3 MÕÕTMISED .....	38
3.1 Mõõtmiste järelused .....	40
3.2 Vastavus seatud nõuetele .....	41
KOKKUVÕTE .....	42
SUMMARY.....	43
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	44
LISAD .....	49

## **EESSÕNA**

Lõputöö teema kujunes välja soovist luua hariduslikeks eesmärkideks kasutatav ostsilloskoop, mida suudaksid õpilased ja tudengid ise kokku panna ja konfigurierida. Teema valiku pakkus välja juhendaja Martin Sarap. Juhendaja andis nõu töö teoreetilise osa ülesehitamise, komponentide valimise ja trükkplaadi valmistamise kohta. Samuti osutas juhendaja abi trükkplaadi ja komponentide tellimisel. Mõõtmised sooritati Tallinna Tehnikaülikooli laborites.

Autor soovib tänada oma juhendajat Martin Sarapit, kes aitas kaasa töö valmimisele.

## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

ADC – *Analog-to-Digital Converter*, analoog-digitaalmuundur

ENOB – *Effective Number of Bits*, efektiivne bittide arv (ADC resolutsioon, kui arvesse võtta mõõtevigu)

CRT – *Cathode Ray Tube*, katoodkiiretoru

DAC – *Digital-to-Analog Converter*, digitaal-analoogmuundur

DSO – *Digital Storage Oscilloscope*, digitaalne ostsilloskoop (üldjuhul lainekuju salvestamise võimalusega)

GPIO – *General Purpose Input-Output*, üldotstarbeline sisend/väljund

LSB – *Least Significant Bit*, vähima arvvaartusega bitt

PCB – *Printed Circuit Board*, trükkplaat

PIO – *Programmable Input-Output*, Raspberry Pico sisseehitatud programmeeritavad olekumasinad, mis võimaldavad lihtsamate sisendi-väljundiga seotud ülesannete põhikoodiga samaaegset täitmist

PSRAM – *Pseudostatic Random-Access Memory*, dünaamiline muutmälu sisseehitatud värskendamise ja adresseerimise süsteemiga

RTC – *Real-Time Clock*, reaalajakella moodul

SNR – *Signal-to-Noise Ratio*, signaali ja müra suhe

SRAM – *Static Random-Access Memory*, staatiline muutmälu, mis ei vaja pidevat värskendamist

## SISSEJUHATUS

Elektroonika õppimisel ja õpetamisel esineb sageli olukordi, kus koostatud elektriskeem ei tööta ning vea leidmiseks on vaja kasutada elektrilisi mõõtevahendeid. Paljud vead on tuvastatavad multimeetriga, kuid ajas muutuvate signaalide, näiteks andmesideprotokollide, analüüsimiseks on vaja ostsilloskoopi. Kahjuks pole ostsilloskoobid alati kõigile kättesaadavad nende kõrge maksumuse ja madala transporditavuse tõttu. Antud probleemi lahendamiseks ongi seatud eesmärgiks luua mikrokontrolleril põhinev kaasaskantav ostsilloskoop, mis oleks tavalisest ostsilloskoobist kättesaadavam ning kasutaja enda poolt kokkupandav ja konfigureeritav.

Enne töö praktilise osa alustamist tutvuti ostsilloskoobi tööpõhimõtete ja ülesehituse ning turul olevate lahendustega. Seejärel pandi paika nõuded, millele loodud seade peaks vastama, ning valiti komponendid. Ostsilloskoobi disain jagunes kolmeks osaks: elektroonika, tarkvara ja kasutajaliides. Elektroonika, sealhulgas üldiste elektriskeemide ja trükkplaadi disainimiseks kasutati vabavara elektroonika disaini tarkvara KiCad. Mikrokontrolleri programmeerimiseks kasutati tarkvaraarenduskeskkonda Visual Studio Code, kus seati üles koodi kompileerimiseks vajalik tööriistaahel vastavalt mikrokontrolleri tootja (Raspberry Pi) juhistele. Mikrokontrolleri programmikood kirjutati C keeles, kasutades tootja väljastatud teeki. Kasutajaliidese disainimiseks kasutati keskkonda MIT App Inventor. Voodiagrammide loomisel kasutati keskkonda draw.io ja mõõtetulemuste analüüsimiseks programmi Microsoft Excel.

Lõputöö koosneb kolmest peatükist. Esimene peatükk kirjeldab ostsilloskoobi tööpõhimõtteid ja üldist ülesehitust ning analoog-digitaalmuunduri tööpõhimõtet ja kasutust. Samuti antakse esimeses peatükis ülevaade hetkel turul olevatest kaasaskantavatest ostsilloskoopidest. Teises peatükis on välja toodud ostsilloskoobi disaini protsess. Peatüki alguses seatakse nõuded, millele disainitav ostsilloskoop peaks vastama. Seejärel tuuakse välja ostsilloskoobi tarbeks valitud komponendid, suuremat tähelepanu pööratakse mikrokontrolleri valikule. Ostsilloskoobi disain ise on jagatud kolmeks osaks: elektroonika, tarkvara ja kasutajaliides. Esimene osa keskendub ostsilloskoobi elektroonika disainimisele, teine mikrokontrolleri juhtloogika kirjeldamisele ja programmeerimisele ning kolmas kasutajaliidese disainimisele ning katsetamisele. Kolmandas peatükis on välja toodud ostsilloskoobiga sooritatud mõõtmiste tulemused ning hinnatakse ostsilloskoobi vastavus seatud nõuetele. Samuti kirjeldatakse mooduseid ostsilloskoobi edasi arendamiseks.

# 1 OSTSILOSKOABI TÖÖPÕHIMÕTE

## 1.1 Ostsilloskoop

Ostsilloskoop on elektrooniline mõõtevahend, mis esitab graafiliselt selle sisendterminalidel oleva pinge (signaali) aja funktsioonina. See võimaldab kirjeldada lainekujusid, mida pole analüütiliste meetodite abil lihtne kujutada. Ostsilloskoop on multimeetri kõrval üks peamisi pinge mõõtmiseks kasutatavatest vahenditest. Ostsilloskoop on kõrgesageduslik mõõtevahend, mis tähendab, et signaali korrektseks kuvamiseks peab see olema suuteline mõõtma ka signaali kõrgemaid harmoonikuid. [1]

Ostsilloskoobid jagunevad analoog- ja digitaalostsilloskoopideks. Esimesed ostsilloskoobid olid analoogostsilloskoobid ja kasutasid signaali kuvamiseks katoodkiiretorusid (*cathode ray tube* e CRT) [1]. CRT-ekraan koosneb elektronkahurist ja -kiirendist, mis tekitavad elektronkiire. Elektronkiire suunamiseks ekraani eri osadesse on CRT-s horisontaalne ja vertikaalne juhtimissüsteem. Punkt ekraanil, kuhu elektronkiir suunatakse, eraldab lühikese aja jooksul valgust. Mida tihedamini elektronkiir kindlat punkti läbib, seda eredam ekraan antud punktis on. Analoogostsilloskoobi puhul tähendab see seda, et tihedamini esinevad signaali osad paistavad ekraanil eredamana [1]. Kuna lainekuju ekraanil säilitamiseks tuleb lainekuju korduvalt uuesti „joonistada“, pole ekraanil kuvatud pildi salvestamine võimalik. Samuti tähendab see, et madalasageduslikke või ühekordseid signaale on raske mõõta. [2]

Ostsilloskoobi võib lihtsustatult jagada neljaks osaks – vertikaalsüsteem, horisontaalsüsteem, triger ja kuvar. Vertikaalsüsteem töötleb sisendsignaali selliselt, et seda oleks võimalik kuvaril kujutada. Selleks vähendatakse sisendsignaali amplituudi, filtreeritakse välja kõrgesageduslikud komponendid, muudetakse signaali alaliskomponenti ja lisatakse väike ajaline viivitus, et trigeri aktiveerumisel kuvataks ka signaali algust. Analoogostsilloskoobis vastutab vertikaalsüsteem otseselt elektronkiire vertikaalse juhtimise eest. Mitme kanali samaaegsel kasutamisel vastutab vertikaalsüsteem signaalide samaaegse kujutamise eest. [1] [2]

Horisontaalsüsteem ehk ajabaas vastutab kuvari horisontaalse telje, milleks on üldjuhul aeg, loomise eest. Horisontaalsüsteem võimaldab erineva sagedusega signaalide mõõtmist ja horisontaalse telje jaotisväärtuse muutmist. Analoogostsilloskoobis vastutab horisontaalsüsteem otseselt elektronkiire horisontaalse juhtimise eest. [2]

Trigeri aktiveerumisel alustatakse signaali kuvamist kuvarile, aktiveerumistingimuseks on üldjuhul sisendpinge tõusmine/langemine etteantud tasemest

kõrgemale/madalamale. Kõrgesageduslike signaalide paremaks kujutamiseks on trigeri kahe aktiveerumise vahel lühike ajaline viivitus (*trigger holdoff*), mille vältel triger ei aktiveeru. [1]

Analoogostilloskoobis on triger oluline, et alustada signaali kuvamist alati samast punktist. Püsiva pildi kuvamiseks on vajalik piisava kestusega viivituse valik, vastasel juhul ei pruugi signaali esitus ekraanil korrektne olla. [2]

Digitaalne ostilloskoop (*digital storage oscilloscope* e DSO) erineb analoogostilloskoobist selle poolest, et esmalt teisendatakse signaal digitaalkujule ja seejärel kuvatakse saadud tulemus ekraanile. Kuna andmed on digitaalsel kujul, võib kogu protsessi hallata mikroprotsessor. Mõõdetud signaalikuju on võimalik korrigeerida, sealhulgas eemaldada eksed ja muuta vertikaalse telje valikut. Digitaalostilloskoobi eelisteks on veel suurem ajaline täpsus, lainekuju salvestamise ja arvutisse edastamise võimalus ning ühekordsete ja madala sagedusega signaalide mõõtmise võimekus. [1]

## 1.2 Analoog-digitaalmuundur (ADC)

Suurem osa tänapäevastest mõõtesüsteemidest sisaldab analoog-digitaalmuundurit (*analog-to-digital converter* e ADC). ADC teisendab sellele antud sisendsignaali fikseeritud täpsusega digitaalseks väärtuseks. ADC kaheks peamiseks funktsiooniks on diskreetimine (ik *sampling*) ja kvantimine (ik *quantization*). Diskreetimise käigus asendatakse pidevsignaali järjestikuste hetkväärtuste seeriaga, üldjuhul on hetkväärtused võetud perioodiliselt. Seejuures peab diskreetimissagedus olema vähemalt kaks korda kõrgem signaali Nyquisti sagedusest, mis on mõõdetava signaali kõrgeima sagedusega komponendi sagedus. Kui diskreetimissagedus pole piisavalt kõrge, tekivad väljundis sageduskomponendid, mida esialgses signaalis ei eksisteerinud. [3]

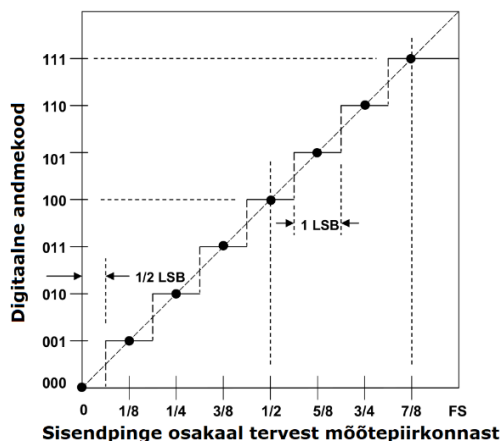
ADC mõõtepiirkond on jagatud  $2^n - 1$  piirkonnaks, kus  $n$  on ADC resolutsioon bittides. ADC vähim jaotisväärtus ehk vähima biti väärtus (LSB e *least significant bit*)  $V_{LSB}$  on arvutatav valemiga 1.1, kus  $V_{REF}$  on ADC mõõtepiirkonna laius. [4]



$$V_{LSB} = \frac{V_{REF}}{2^n - 1} \quad (1.1) [4]$$

Igale piirkonnale vastab unikaalne andmekood (kahendsüsteemi arv), mis antud piirkonda kuuluvale analoogväärtusele kvantimise käigus omistatakse. Kindla piirkonna suurima ja vähima väärtuse vahet nimetatakse ka koodilaiuseks. Ideaalses ADC-s on koodilaiused identsed vähima jaotisväärtusega  $V_{LSB}$ , kuid reaalses ADC-s võivad koodilaiused olla erinevad ja mõned koodid puududa. [3]

Joonis 1.1 kirjeldab ideaalse 3-bitise ADC ülekandefunktsiooni ehk analoogse sisendväärtuse ja digitaalse väljundväärtuse suhet. Funktsiooni punktidega tähistatud kohtades on ADC tulemus täpne, ülejäänud piirkondades esineb kuni poole vähima jaotisväärtuse (*least significant bit* e LSB) ulatuses mõõteviga. [5]



**Joonis 1.1.** Ideaalse 3-bitise ADC ülekandefunktsioon. [5]

ADC-ga pinge mõõtmisel esineb mitmeid veallikaid, sealhulgas vähimast jaotisväärtusest tingitud määramatus, ülekandefunktsiooni lineaarsed vead (terve ülekandefunktsioon või selle tuletis on konstandi võrra vertikaalsel teljel nihutatud), ülekandefunktsiooni mittelineaarsed vead (andmekoodile vastava mõõtepiirkonna laiuse varieerumine, andmekoodide puudumine), hetkväärtuste lugemise perioodi varieeruvus ja müra. [3] [4]

Kõikide mõõteviga arvesse võtmiseks arvutatakse ADC efektiivne resolutsioon (*efficient number of bits* e ENOB). Selleks leitakse Fourier' analüüsi kaudu ADC mõõdetava signaali ja müra suhe SNR (*signal-to-noise ratio*). Ideaalse  $n$ -bitise ADC puhul, kus ainsaks veallikaks on kvantimisel tekkivad vead, on signaali ja müra suhe arvutatav valemiga 1.2. [3] [4]

$$SNR = 6.0206n + 1.7609 [dB] \quad (1.2) [3]$$

Signaali ja müra suhte põhjal arvutatakse ENOB valemiga 1.3. [3]

$$ENOB = \frac{SNR - 1.7609}{6.0206} \quad (1.3) [3]$$

## 1.3 Olemasolevad lahendused

Hetkel on turul olemas mitmeid erinevaid kaasaskantavaid ostsilloskoope, siinkohal on välja toodud vaid need seadmed, mille kohta on vastavate tootjate kodulehtedelt võimalik infot leida. Lisas 1 on välja toodud võrreldud ostsilloskoopide tehniliste andmete kokkuvõte.

Hantek2000 seeria seadmed (kujutatud joonisel 1.2 ) on kaasaskantavad ostsilloskoobid, mida saab kasutada ka multimeetri ja signaaligeneraatorina. Ostsilloskoobil on kaks kanalit, mille mõõtetulemused väljastatakse värvilisele LCD ekraanile. Seade on kasutatav läbi füüsilise liidese, mille kaudu on võimalik vahetada seadme erinevate režiimide (multimeeter, signaaligeneraator, ostsilloskoop) vahel ja teha muid seadistusi. Seade saab toidet kahest 18650 akust, laadimiseks ja andmevahetuseks on võimalik kasutada USB-C liidest. Tootja andmete kohaselt on ostsilloskoobi diskreetimissageduseks on 250 või 125 miljonit hetkväärtust sekundis, olenevalt sellest, kas kasutusel on üks või kaks kanalit; mõõtmiste täpsuseks on 8 bitti. Ostsilloskoobi maksimaalne sisendpinge on 150 volti, kuid multimeeter suudab mõõta kuni 600 voldi suurust alalis- ja vahelduvpinget. [6]



**Joonis 1.2.** Hantek2000 seeria ostsilloskoop. [6]

uScope (välja toodud joonisel 1.3 ) on mootorsõidukite diagnostikaks ettenähtud ühekanaline ostsilloskoop, mille peamiseks otstarbeks on välja selgitada probleem ning suuremate ja täpsemate mõõtevahendite kasutamise vajadus. Ostsilloskoopi on võimalik kasutada peaaegu kõikide sõiduki pingete mõõtmiseks, suuremate pingete korral tuleb kasutada x10 proovikut. Samuti on see ettenähtud olukordadeks, kus täpsemat ostsilloskoopi pole võimalik või praktiline kasutada. uScope'i diskreetimissageduseks on üks miljon hetkväärtust sekundis 12-bitise täpsuse juures. Ostsilloskoobil on 2 GB suurune mälukaart, mis hoiustab mõõtmiskonfiguratsioone ja salvestatud mõõteandmeid. Seade sisaldab ka signaaligeneraatorit. [7] [8] [9]



**Joonis 1.3.** uScope kaasaskantav ostsilloskoop. [7]

DSO Nano v3 on väike ühekanaline diferentsiaalne ostsilloskoop, mille eelisteks on väikesed mõõtmed ja lihtne kasutus. Numbriliste näitajate poolest on DSO Nano v3 ja uScope peaaegu identsed, kuid DSO Nano v3 ei sisalda SD-kaarti ning andmeid ei saa arvutisse edastada. DSO Nano v3 on välja toodud joonisel 1.4 . [10]



**Joonis 1.4.** DSO Nano v3. [10]

DSO112A on puutetundliku ekraaniga ostsilloskoop, mis sisaldab jadaliidest, mis võimaldab arvutile mõõdetud andmete saatmist ning sellelt saadetud käskude vastu võtmist. DSO112A on välja toodud joonisel 1.5 . [11]



**Joonis 1.5.** DSO112A puuetundliku ekraaniga ostsiloskoop.

Pokit Meter (välja toodud joonisel 1.6 ) on juhtmevaba multimeeter, ostsiloskoop ja andmekoguja. Mõõtmete poolest on tegu käekellasuuruse seadmega, mis edastab andmed Bluetooth'i vahendusel telefoni, kus andmed töödeldakse ja esitatakse graafilise kasutajaliidese kaudu. Pokit Meter'i funktsioonide hulka kuulub lisaks pingemõõtmisele ka voolu (kuni kaks amprit), takistuse (kuni miljon oomi) ja temperatuuri mõõtmine, diodide testimine, andmete pikaajaline (kuni kuus kuud) logimine ja nutikellal näitude kuvamine. Kuna ostsiloskoobi näidud kuvatakse telefoni ekraanil, on neid võimalik lihtsamini manipuleerida ja salvestada. Samuti võimaldab suurem arvutuslik võimsus andmete analüüsimisel ka näiteks Fourier' analüüsi ja uurida ostsiloskoobi poolt mõõdetud signaali sageduslikke karakteristikuid. Pokit Meter sobib ka pikaajalisemateks mõõtmisteks – seade võib mõõta temperatuuri, voolu või pinget kuni kuus kuud, võttes ühe näidu iga 45 minuti tagant, seda ilma telefoniühendusest. Ostsiloskoobi maksimaalseks mõõdetavaks alalispingeks on 60V ja vahelduvpingeks 42 V, mõõtetäpsuseks on 12 bitti ja diskreetimissageduseks miljon hetkväärtust sekundis. [12]

Pokit Pro (välja toodud joonisel 1.6 ) on Pokit Meter'i edasiarendus, sellega on võimalik mõõta kuni 600-voldist alalis- ja vahelduvpinget ning 10-amprist vahelduvvoolu ja mahtuvust. Ühendades mitu Pokit Pro'd ühe telefoniga, on võimalik sooritada kuni 4 kanaliga mõõtmisi. Lisaks sellele on Pokit Pro'l laetav aku, rohkem mälu ja uuem Bluetooth versioon. [13]



**Joonis 1.6.** Pokit Meter ja Pokit Pro. [12] [13]

## 2 OSTSILOSKOABI DISAIN

Enne kaasaskantava ostsilloskoobi disainimist pandi paika kindlad nõuded, millele lõplik disain vastama peaks.

Ostsilloskoobi disain algas mikrokontrolleri ja andmesideliidese valikust, ülejäänud komponendid valiti elektroonika disainimise käigus.

Ostsilloskoobi disain jagunes kolmeks osaks:

- elektroonikaskeemi koostamine ja trükkplaadi disainimine
- mikrokontrolleri programmeerimine
- kasutajaliidese disainimine

Antud töö käigus pöörati rohkem tähelepanu esimesele kahele punktile, kasutajaliidese disainimisel piirduti tähtsamate funktsioonide, sealhulgas ostsilloskoobi mõõtmisteks seadistamise ja tulemuste lugemise, loomisega.

### 2.1 Nõuded lahendusele

Lõpplahendus peaks olema selline, et õpilane või tudeng suudaks selle iseseisvalt kokku panna ning selle komponente välja vahetada. Samuti lihtsustaks see ostsilloskoobi parandamist.

Lõpplahenduse rakendamine õppetegevuses ja prototüüpimisel peaks olema võimalikult hõlbus ja antud tegevusi soodustama, mitte takistama.

Lõpplahendus võiks olla täielikult või suuremas osas juhtmevaba (kui mõõtmiseks kasutatavad juhtmed välja arvata), et ostsilloskoobi kasutamine ei sõltuks toiteallika olemasolust ega füüsilisest ühendusest väliste seadmetega.

Eelmise tingimuse rahuldamiseks peaks ostsilloskoop võimaldama vähemalt ühe juhtmevaba andmeside protokoll (Wi-Fi, Bluetooth) kasutamist mõõtetulemuste edastamiseks.

Kolmanda tingimuse rahuldamiseks peaks ostsilloskoop sisaldama ka sisemist toiteallikat aku või taaslaetava patarei näol, mille mahtuvus oleks piisav ostsilloskoobi kasutamiseks vähemalt ühe täispikkuses akadeemilise tunni (1,5 h) vältel. Võimalusel võiks ostsilloskoop sisaldada ka laadimismoodulit, et kasutamisaega veelgi pikendada.

Ostsilloskoop peaks suutma mõõta nii alalis- kui ka vahelduvpinget, kusjuures maksimaalne mõõdetav pinge võiks olla vähemalt 24 volti. Selleks, et tagada ostsilloskoobi kasutamisel ohutus, peaks maksimaalne talutav pinge olema vähemalt 30 volti.

Ostsilloskoobi kasutamiseks loodud kasutajaliidese kaudu peaks olema võimalik näha mõõdetavaid signaale ja analüüsida nende muutumist ajas. Samuti peaks kasutajaliides võimaldama ostsilloskoobi seadistamist, sealhulgas diskreetimissageduse määramist, kasutatavate kanalite muutmist ja trigeri seadmist.

## 2.2 Komponentide valik

Ostsilloskoobi disainimist alustati komponentide valikust. Selleks, et komponente oleks lihtsam vahetada, kui need ostsilloskoobi kasutamise käigus kahjustada peaksid saama, piirduti läbi plaadi joodetavate (*through hole*) komponentidega. Seejärel lähtuti komponentide saadavusest, maksumusest ja kvaliteedist, antud tähtsuse järjekorras.

Disainitud ostsilloskoop koosneb mitmest osast:

- signaali töötlus
- signaali mõõtmine/salvestamine
- mõõtetulemuste edastamine
- toide

Ostsilloskoobi osa, mis tegeleb signaali töötlemisega, peaks suutma ostsilloskoobi sisendpinge muundama ADC jaoks mõõdetavaks pingeks. Ostsilloskoobi sisendpinge võib olla maksimaalselt 30 volti vahelduvpinget, samas kui tavaline ADC suudab üldjuhul mõõta kuni 3,3 või 5 voldist pinget, sõltuvalt valitud ADC ja/või mikrokontrolleri loogikapinge tasemest. Signaalitöötlemise osa peaks minimaalselt koosnema alaldist, et muuta vahelduvpinge alalispingeks, ja pingejagurist, et vähendada sisendpinget mõõdetavale tasemele. Pinge suuna määramiseks otsustati kasutada operatsioonivõimendit.

Analoogsignaali mõõtmiseks on vajalik ADC olemasolu. ADC võib olla nii eraldiseisev komponent kui ka mikrokontrollerisse sisse ehitatud. ADC valikul lähtuti selle

maksumusest, resolutsioonist ja diskreetimissagedusest. ADC resolutsioon kirjeldab, mitu erinevat digitaalset väljundväärtust on analoogsisendile mõõtepiirkonnas võimalik omistada. Näiteks 12-bitise resolutsiooniga ADC-l on  $2^{12} = 4096$  erinevat väljundväärtust. Kui mõõtepiirkonnaks on 30 volti, on kahe erineva pingega minimaalseks eristatavaks väärtuseks  $\frac{30 V}{4096} \approx 0,0073 V$ . Diskreetimissagedus näitab, mitu näitu on ADC-ga ühes sekundis võimalik võtta. Mida suurem on diskreetimissagedus, seda kõrgema sagedusega signaale on võimalik mõõta, samuti tähendab see madalama sagedusega signaalide täpsemat mõõtmist.

Signaali salvestamisel mängivad suurt rolli valitud mikrokontrolleri taktsagedus ja muutmälu hulk. Mida suurem on taktsagedus, seda vähem aega kulub ühe mõõtepunkti salvestamiseks ja seda rohkem andmeid on ühe ajaühiku kohta võimalik salvestada. Kui taktsagedus on liiga väike, pole kõiki ADC poolt mõõdetud andmeid võimalik salvestada. Mida suurem on mikrokontrolleri muutmälu hulk, seda rohkem andmeid on võimalik salvestada.

Mõõtetulemuste edastamiseks peaks ostsiloskoop sisaldama juhtmevaba andmesideliidest (Wi-Fi, Bluetooth). Kuna Wi-Fi kasutamine nõuab ruuteri levipiirkonnas olemist, aga Bluetooth on peaaegu igas telefonis olemas ega nõua väliseid seadmeid, otsustati Bluetoothi kasutamise kasuks. Andmesideliidese valikul tuleks arvestada nii maksimaalset andmete edastamise kui ka vastuvõtmise kiirust. Ideaalses olukorras võiks ostsiloskoop mõõtetulemusi edastada täpselt nii kiiresti, kui kasutajaliides (telefon) neid vastu võtta suudab.

Ostsiloskoobi toiteahela valimisel tuleks ennekõike arvesse võtta mikrokontrolleri (ja teiste vajalike komponentide) toitepinget. Toiteahel peaks endas sisaldama akut, vajadusel ka toiteregulaatorit ja võimalusel laadimismoodulit. Valitava aku või laetava patarei mahtuvus võiks olla piisavalt suur, et ostsiloskoopi oleks võimalik ilma laadimata kasutada vähemalt 90 minutit järjest, mis on ülikoolis keskmise praktikumi ettenähtud kestus. Toiteregulaatori olemasolu aitab parandada mõõtetulemuste täpsust ning vähendada mõõtetulemuste sõltuvust aku laetuvuse tasemest. Ostsiloskoop peaks võimaldama ka USB kaudu toitmist ja aku laadimist. Sel juhul tuleks aku ülejäänud skeemist näiteks P-tüüpi MOSFETi abil lahti ühendada ja ostsiloskoopi vaid USB kaudu toita.

### 2.2.1 Mikrokontroller

Komponentide valikut alustati mikrokontrolleri valikust. Mikrokontrolleri valimisel lähtuti järgmistest nõuetest:

- mikrokontroller peaks olema usaldusväärsetelt edasimüüjatelt lihtsasti kättesaadav
- mikrokontrolleril peaks olema piisav tehniline tugi dokumentatsiooni ja ametlike teekide näol, et arendust lihtsustada
- mikrokontrolleri maksumus võiks olla piisavalt madal, et ostsilloskoobi lõppmaksumust madalal hoiada
- mikrokontrolleri taktsagedus võiks olla piisavalt kõrge, et see suudaks tegeleda nii andmete lugemise ja salvestamise kui ka nende edastamisega

Mikrokontrolleri valimiseks leiti neli erinevat mikrokontrollerit, igaüks erineva tootja poolt ja võrreldi nende hinna, kvaliteedi ja nõuetele vastavuse suhet. Võrreldavateks mikrokontrolleriteks olid:

- Arduino Nano 33 IoT (SAM D21G18A)
- ESP32-S3-WROOM-1
- STM32G431KB
- Raspberry Pi Pico (RP2040)

Kõikide vaadeldud mikrokontrollerite tehnilised andmed, mis on ostsilloskoobi disaini jaoks olulised, on välja toodud lisas 1.

Arduino Nano 33 IoT on peamiselt asjade interneti (*Internet of Things*) lahendustele suunatud arendusplaat, mis sisaldab endas Arm® Cortex®-M0 32-bitist mikrokontrollerit SAM D21, 2,4GHz Wi-Fi ja Bluetooth moodulit, krüpteerimismoodulit ja 6-teljelist inertsiaalmõõtmismoodulit liikumise ja pööramise mõõtmiseks. Protsessori taktsageduseks on 48 MHz, programmimälu (Flash) suuruseks on 1 MB, muutmälu (*static random-access-memory* e SRAM) suuruseks 256 kB. Mikrokontrolleri sisse ehitatud ADC on kuni 12-bitise resolutsiooniga, kuid riistvaraliselt on korduvate mõõtmiste kaudu täpsust 16 bitini suurendada. ADC diskreetimissageduseks on 350 tuhat hetkväärtust sekundis. Lisaks sisaldab mikrokontroller 10-bitist digitaal-analoogmuundurit (DAC). Antud mikrokontroller on teistest üle kahe korra kallim, kuid sel on väga suur tugi väliste teekide, juhendite ja dokumentatsiooni näol. [14] [15] [16]



ESP32-S3 on Espressif Systems'i poolt toodetav mikrokontroller, kuhu on Wi-Fi ja Bluetoothi andmesideliidesed juba sisse ehitatud. ESP32-S3 sisaldab endas kahte Xtensa® LX7 tuuma, mõlema tuuma taktsageduseks on 240 MHz. Protsessor sisaldab endas 8 MB programmimälu, 384 kB püsिमälu (ROM), 512 kB muutmälu ja 8 MB pseudomuutmälu (*pseudostatic random-access-memory* e PSRAM). ESP32-S3 sisaldab ka kahte 12-bitist ADC-moodulit, kuid ühte neist pole Wi-Fi mooduliga samal ajal võimalik kasutada. Mõlemal ADC moodulil on 10 kanalit, diskreetimissageduseks on kuni 100 tuhat hetkväärtust sekundis. ESP32-S3-l on ka sissehitatud reaalajakella (RTC) moodul, samuti ka moodulid andmeside ja programmimälu krüpteerimiseks. [17] [18]

STM32G431KB on STMicroelectronics'i poolt toodetav kõrge jõudlusega mikrokontroller, mille Arm® Cortex®-M4 protsessori taktsagedus on 170 MHz. Kontroller sisaldab endas kahte 12-bitist ADC-d, diskreetimissagedusega neli miljonit hetkväärtust sekundis; nelja komparaatorit, kolme operatsioonivõimendit, nelja DAC kanalit, RTC moodulit. Analookkomponentide jaoks on eraldi toiteahel. Riistvaraliselt on võimalik korduvate mõõtmiste kaudu suurendada ADC täpsust 16 bitini. STM32G431KB'l on teistest võrdluses olnud mikrokontrolleritest tunduvalt vähem programmi- ja muutmälu: 128 kB ja 32 kB vastavalt. Samuti erinevad STM32 mikrokontrollerid teistest selle poolest, et nende arendusplaate on keelatud kasutada millekski muuks kui arendustegevuseks ja mikrokontrolleri testimiseks. [19] [20]

Raspberry Pi Pico on Raspberry Pi poolt disainitud RP2040 mikrokontrolleri kiipi kasutatav arendusplaat, mis on disainitud madalat hinda ja kõrget kättesaadavust silmas pidades. RP2040 on esimene ja töö kirjutamise hetkel ainus Raspberry Pi poolt disainitud mikrokontroller, mis sisaldab endas kahte ARM® Cortex®-M0+ tuuma, mõlema tuuma taktsagedust on võimalik suurendada kuni 133 MHz-ini. Mikrokontroller kasutab välist programmimälu, mille maht võib olla kuni 16 MB (Pico puhul on mahuks 2 MB), muutmälu suuruseks on 264 kB. Pi Pico mudel W sisaldab ka juhtmevaba andmesideliidest CYW43439, kuid ostsilloskoobi disainimise perioodil puudus tarkvaraline tugi Bluetooth'i kasutamiseks. RP2040 sisaldab endas ühte viiekanalist ADC-d, millest üks kanal on kasutuses sisemise temperatuurianduri poolt ja teist kanalit kasutatakse Pico toitepinge mõõtmiseks, ülejäänud kolm kanalit on arendusplaadi poolt kasutatavad. RP2040 sisaldab ka kaheksat programmeeritavat sisendi-väljundi olekumasinat (*Programmable Input/Output* e PIO), mis võimaldavad järjestikuste GPIO klemmide juhtimist, seda kahe tuumaga paralleelselt ilma nende arvutustsükleid kasutamata. [21] [22] [23]

Mikrokontrollerite tehnilisi andmeid, maksumust ja tehnilist tuge arvesse võttes osutus valituks Raspberry Pi Pico, kuna selle ADC diskreetimissagedus on piisavalt kõrge

lihtsamate mõõtmiste tegemiseks ning see on madala hinna eest usaldusväärsete edasimüüjate käest kättesaadav.

### **2.2.2 Andmesideliides**

Kuna Raspberry Pi Pico tavamudel ei sisalda endas juhtmevaba andmesideliidest, oli kasutajaliidesega andmeside loomiseks vajalik välise andmesideliidese valimine. Selleks, et ostsilloskoopi kasutamine ei sõltuks kohtvõrgu olemasolust ning et ostsilloskoobi kasutamine kohalikku Wi-Fi võrku ei aeglustaks, otsustati Bluetooth mooduli kasuks. Disaini lihtsustamiseks ja kulude kokku hoidmiseks otsustati kasutada HC-06 Bluetooth moodulit.

HC-06 moodul võimaldab lühikestel distantidel kahe seadme vahel Bluetooth 2.0 kaudu juhtmevaba andmeside loomist. Moodul töötab sagedustel 2,402 kuni 2,480 GHz, andmesidekiiruseks on kuni 2,1 MB/s. Suhtlus mikrokontrolleri ja mooduli vahel käib läbi UART-protokolli. [24]

Töö kirjutamise hetkel on HC-06 mooduli maksumuseks ligikaudu 2€, kuid erinevatest asjaoludest tingituna võib hind pisut varieeruda. [25]

### **2.2.3 Muud komponendid**

Ostsilloskoobi signaalitöötamise osa koosneb täissildalaldist ja pingejagurist, et muuta ostsilloskoobi sisendpinge ADC jaoks mõõdetavaks pingeks. Samuti on sisendpinge polaarsuse määramiseks kasutatud operatsioonivõimendit.

Täissildalaldiks valiti Multicomp Pro W01MG, kuna selle maksimaalne talutav pinge (100 V) on kõrgem eesmärgiks seatud ostsilloskoobi sisendpingest ja sellel esinev pingelang (1,1 V) on piisavalt väike, et mitte ostsilloskoobi täpsust liialt vähendada. Samuti oli tegu kõige madalama maksumusega (0,55 €) alaldiga, mida oli töö kirjutamise hetkel võimalik kätte saada. [26]

Operatsioonivõimendiks valiti Texas Instruments'i poolt toodetav LM224N, seda piisavalt madala toitepinge (3 V) ja piisavalt kõrge tundlikkuse tõttu [27]. Töö kirjutamise hetkel oli ühe LM224 operatsioonivõimendi maksumuseks 0,53 € [28].

Ostsilloskoobi toitmiseks otsustati kasutada laetavat patareid 18650. Tähis „18650“ näitab patarei mõõtmeid – 18 \* 65 millimeetrit. 18650 patarei nimipingeks on 3,7 volti, aga selle väljundpinge või varieeruda 2,5 ja 4,2 voldi vahel, patarei mahutavus on 1800 kuni 3500 mAh. Teatud 18650 patareid sisaldavad ka sisseehitatud kaitset ülelaadimise vastu. [29]

Kindla patarei valikul lähtuti selle mahtuvusest ja maksumusest, valituks osutus LG poolt toodetav INR18650-MH1, mille mahtuvuseks on 3200 mAh ja hinnaks 6 € [30].

Patareihoidikuks valiti Keystone Electronics 1043, mille tükihinnaks on 2,62 € [31].

Patarei laadimiseks otsustati kasutada Okystar'i poolt toodetavat USB-C laadimismoodulit OKY3404-1. Antud moodulil on sisseehitatud kaitseahelad patarei ülelaadimise ja liigtühjenemise vastu kaitsmiseks. Mooduli sisendpingeks on 5 V ja maksimaalseks laadimisvooluks 1 A. Laadimismooduli maksumuseks oli töö kirjutamise hetkel 2,5 €. [32] [33]

Selleks, et ostsilloskoopi oleks võimalik toita nii USB kui ka patarei kaudu, otsustati kasutada P-tüüpi MOSFETi, et USB ühenduse olemasolul patarei ülejäänud ahelast lahti ühendada. MOSFETi valimisel lähtuti minimaalsest paisule antavast pingest, mille korral transistor sulgeb, mis peaks jääma alla 5 voldi, kuna see on USB poolt kasutatav pingetase. Odavaim MOSFET, mis antud tingimusele vastas, oli Infineon'i poolt toodetav IRFU5410PbF, mille tükihinnaks oli 0,978 €. [34]

Seadme sisse ja välja lülitamiseks otsustada kasutada lihtsat kahe olekuga mittelühistuvat lüliti, odavaimaks sobivaks variandiks osutus lüliti tootekoodiga 1825232-1, tükihinnaks 0,405 €. [35]

Kuna ülikoolis kasutatakse elektriahelate õpetamiseks praktikumides „banaan“-otsikuga juhtmeid ja pesasid, otsustati ostsilloskoobi hõlpsamaks kasutamiseks lisada ka paar sobivat pesa banaaniotsikuga juhtmete ühendamiseks. Selleks otsustati kasutada Multicomp'i poolt toodetavat pesa koodiga 24.243, tükihinnaks 0,765 €. [36]

Ülejäänud komponentide, peamiselt diodide ja takistite, kogumaksumus jäi ühe ostsilloskoobi eksemplari kohta all 0,25 €.

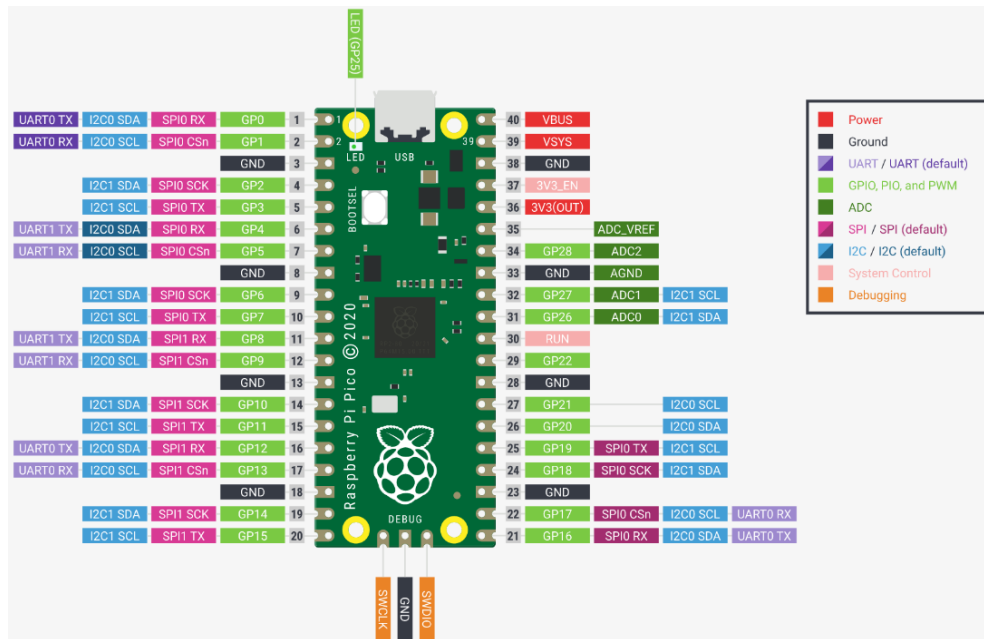
**Tabel 2.1. Valitud komponentide kogumaksumus ühe ostsilloskoobi valmistamiseks.**

Nr	Komponent	Kogus	Maksumus (1)
1	Raspberry Pi Pico	1	3,68 € [37]
2	HC-06	1	~2 € [25]
3	W01MG	3	1,64 € [26]
4	LM224N	1	0,53 € [28]
5	Takistid, diodid		< 0,25 €
Ostsilloskoobi põhimooduli hind:			~8,1 €
6	INR18650-MH1	1	6 € [30]
7	Keystone Electronics 1043	1	2,62 € [31]
8	OKY3404-1	1	2,5 € [33]
9	IRFU5410PbF	1	0,98 € [34]
10	Lüliti 1825232-1	1	0,41 € [35]
Patareitoite- ja laadimismooduli hind:			~12,5 €
Patareitoitel ostsilloskoobi hind:			~20,6 €
11	Multicomp 24.243	6	4,59 € [36]

Kõikide ostsilloskoobi jaoks valitud juppide maksumus on välja toodud tabelis 2.1. Komponentid 1-5 on ostsilloskoobi ehitamiseks hädavajalikud; kui patareitoidet pole vaja, oleks ostsilloskoobi maksumuseks umbes 8,1 eurot. Kui lisada ostsilloskoobile patareitoide ning patarei laadimisvõimalus, tõuseb hind 12,5 euro võrra 20,6 euroni. Kui lisada veel banaanikonektorid, tõuseb hind umbes 4,6 euro võrra. Tabelis ei ole välja toodud mikrokontrolleri, Bluetooth mooduli ja operatsioonivõimendi plaadile ühendamiseks kasutatavaid konnektoreid, kuna nende maksumus on suuremate koguste tellimisel piisavalt väike. Samuti tõstavad ostsilloskoobi hinda selle trükkplaadi ehk PCB (*printed circuit board*) valmistamine ja transpordikulud.

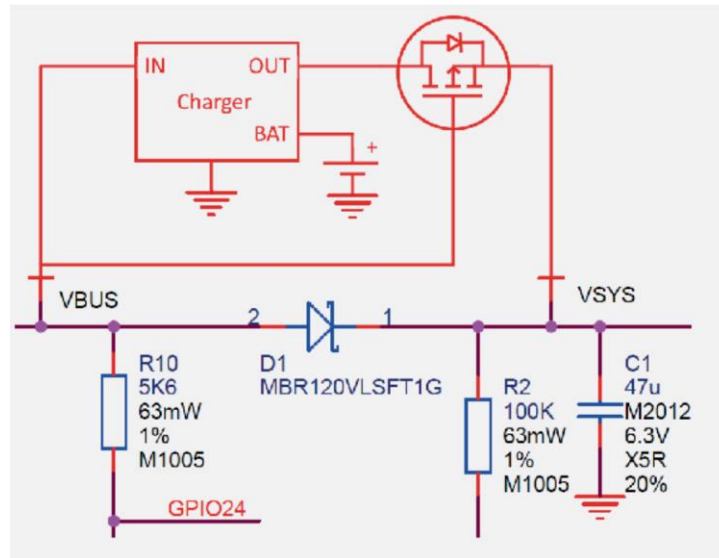
## 2.3 Elektroonika

Elektroonika disainimist alustati valitud mikrokontrolleri (Raspberry Pi Pico) uurimisega. Pico elektriskeem koos selle klemmide funktsioonidega on välja toodud joonisel 2.1.



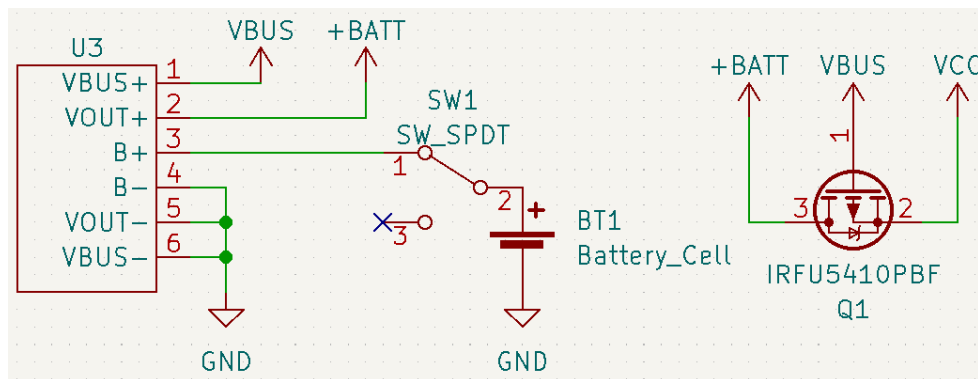
**Joonis 2.1.** Raspberry Pi Pico elektriskeem ja klemmide funktsioonid. [22]

Kõik Pico klemmid peale klemmide 39 (VSYS) ja 40 (VBUS), mis on kontrolleri toiteklemmid, töötavad 3,3-voldisel pingetasemel, kuid taluvad kuni 3,6-voldist pinget. VBUS klemm on ühendatud otse USB-pesaga, VSYS klemm on sellest diodi kaudu eraldatud. Kontrolleri toitmiseks tuleb anda VSYS klemmile toitepinge vahemikus 1,8...5,5 volti. USB-toite olemasolu on võimalik kontrollida klemmi GPIO24 ning toitepinget mõõta klemmi GPIO29 (ADC kanal 3) kaudu, kumbagi klemmi ei saa muudeks otstarveteks kasutada. Kui kasutada Pico toitmiseks akut või patareid, tuleks USB-toite olemasolu korral patarei Picost lahti ühendada, seda näiteks P-tüüpi MOSFETi abil, nagu on näidatud joonisel 2.2. [22] [23]



**Joonis 2.2.** Raspberry Pi Pico toitmine laadimismooduli kaudu. [22]

Joonisel 2.3 on välja toodud ostsilloskoobi toiteahel. 18650 patarei (BT1) on ühendatud läbi lüliti (SW1) laadimismooduliga (U3), mis vastutab nii patarei laadimise kui ka stabiilse toitepinge andmise eest. Laadimismooduli väljastatav toitepinge (+BATT) on eraldatud VSYS klemmist (joonisel tähistatud tähisega VCC) MOSFETi (Q1) kaudu. Laadimismooduli USB-toite klemm on ühendatud mikrokontrolleri vastava klemmiga. USB-toite puudumisel saab ostsilloskoop toidet patareist, vastasel juhul saadakse toide USB kaudu ning patareid laetakse.



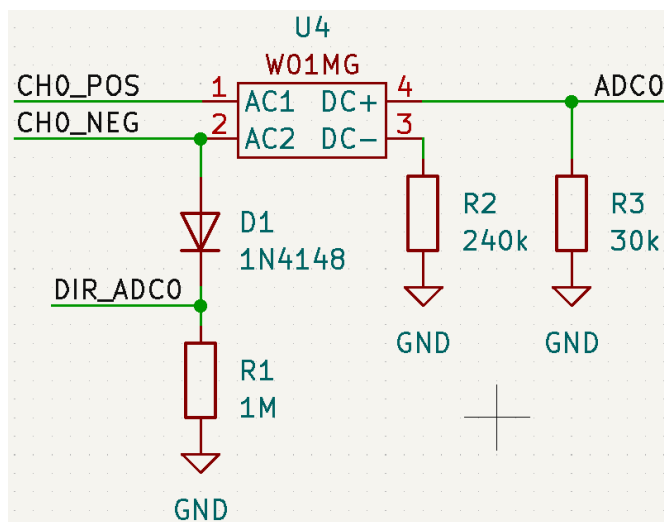
**Joonis 2.3.** Ostsilloskoobi toiteahel.

Analoogsignaali mõõtmise seisukohalt on olulised Pico klemmid 31-35 – neist klemmid 31, 32 ja 34 on mikrokontrolleri ADC kanalite 0-2 kasutamiseks ettenähtud; klemm 33 (AGND) määrab ADC mõõtepiirkonna alumise piiri ning klemm 35 (ADC\_VREF) ülemise piiri. Vaikimisi on ADC\_VREF ühendatud sisemise 3,3-voldise allikaga läbi RC-filtri, mis tähendab, et kontrolleri volutarve muutumise korral muutub ka ADC tugipinge.

Toitepinge tugipingena kasutamine tähendab ka suuremat voolutarvet, mis nihutab ADC mõõtetulemusi umbes 30 mV võrra (tegelik nihe sõltub diskreetimissagedusest ja temperatuurist). [22] [23]

Ostilloskoobi sisendpinge muutmist ADC jaoks mõõdetavaks pingeks kirjeldab joonis 2.4 . Iga kanaliga on võimalik mõõta diferentsiaalset sisendpinget, mis tähendab, et mõõtmine ei toimu kanaliteülese ühise maanduse suhtes, vaid iga kanali puhul on eraldi võimalik valida, millise punkti suhtes pinget mõõta. Esmalt muudetakse ostilloskoobi sisendpinge alaldi W01MG (U4) abil vahelduvvoolust alalisvooluks või muudetakse alalisvoolu polaarsust, et seda oleks võimalik mõõta. Seejärel kasutatakse pingejagurit (R2 ja R3), et saadud alalisvool madalamale tasemele teisendada. Pingejaguri jaoks valiti takistid selliselt, et ostilloskoobi sisendtakistus oleks võimalikult kõrge ning et ostilloskoobiga oleks võimalik mõõta vähemalt kuni 30-voldist pinget. Kui ADC kanali 0 sisendpinge (joonisel ADC0) on maksimaalselt 3,3 volti, siis peaks 30-voldist sisendpinget umbes 9 korda vähendama, ehk takistite R2 ja R3 suhe peaks olema 1:8. 30-voldise sisendpinge korral on ostilloskoobi ühe kanali poolt tarbitav vool

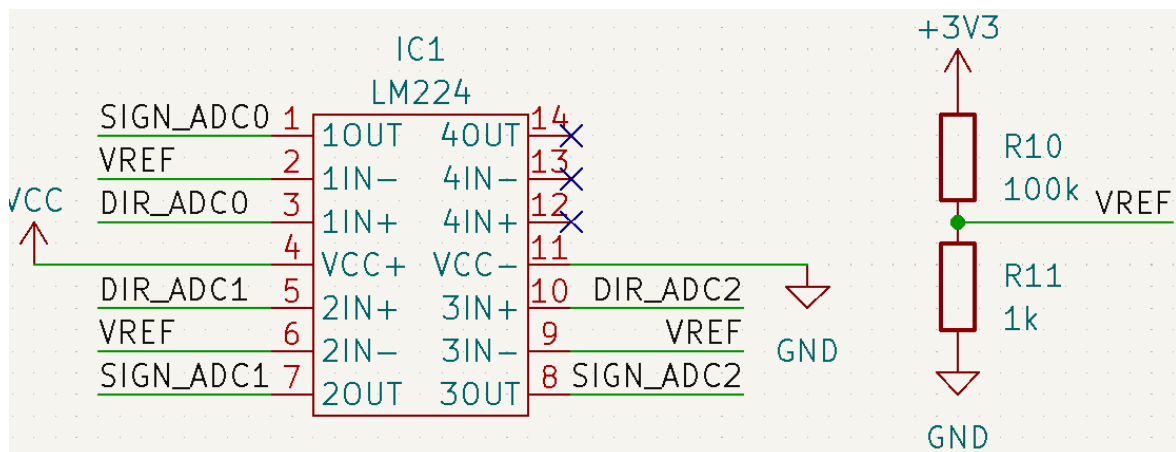
$$I = \frac{30 \text{ V}}{270\,000 \Omega} \approx 111 \mu\text{A}.$$



**Joonis 2.4.** Ostilloskoobi sisendpinge töötlemine.

Joonisel 2.4 on ostilloskoobi kanali üks sisendklemm ühendatud läbi diodi ja suure takisti maaga. Kui antud kanalil on parasjagu positiivse polaarsusega pinge (pinge punktis CHO\_POS on kõrgem kui punktis CHO\_NEG), ei ole kanali sisendpinge piisav, et diod (D1) juhiks voolu ning suuna määramiseks kasutatav punkt (DIR\_ADC0) on ühendatud maaga. Kui aga antud kanalil on negatiivse polaarsusega pinge (pinge punktis CHO\_NEG on kõrgem kui punktis CHO\_POS), läbib vool diodi D1 ja punktis

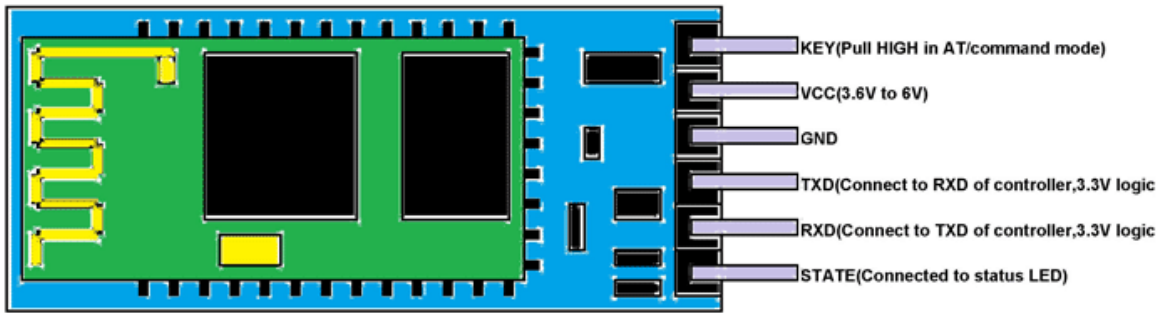
DIR\_ADC0 on positiivne pinge. Kui kasutada operatsioonivõimendit, et võrrelda antud pinget piisavalt väikese tugipingega, nagu on tehtud joonisel 2.5 on, võimalik kindlaks teha, kas antud kanalil mõõdetud pinge on positiivse või negatiivse polaarsusega. Antud joonisel on tugipingeks  $V_{REF} = 3,3 V * \frac{1 k\Omega}{1 k\Omega + 100 k\Omega} \approx 33 mV$ , mis tähendab umbes 0,3-voldist sisendpinget, see tähendab, et antud skeemi puhul ei ole alla 0,3-voldise pinge korral võimalik suunda määrata, samas on võimalik asendada takisti R10 suurema väärtusega, et madalamat tugipinget saavutada. Igal ADC mõõtmisel mõõdetakse ka vastava kanali pinge suunda määrava sõlme (kanali 0 puhul SIGN\_ADC0) digitaalset pinget. Programmeerimise lihtsustamiseks tähistab kõrgele loogikatasemele vastav pinge, et antud kanali sisendpinge on negatiivse polaarsusega. Kõigi 3 kasutatava kanali jaoks on skeemid ühesugused.



**Joonis 2.5.** Ostsilloskoobi sisendpinge suuna määramine.

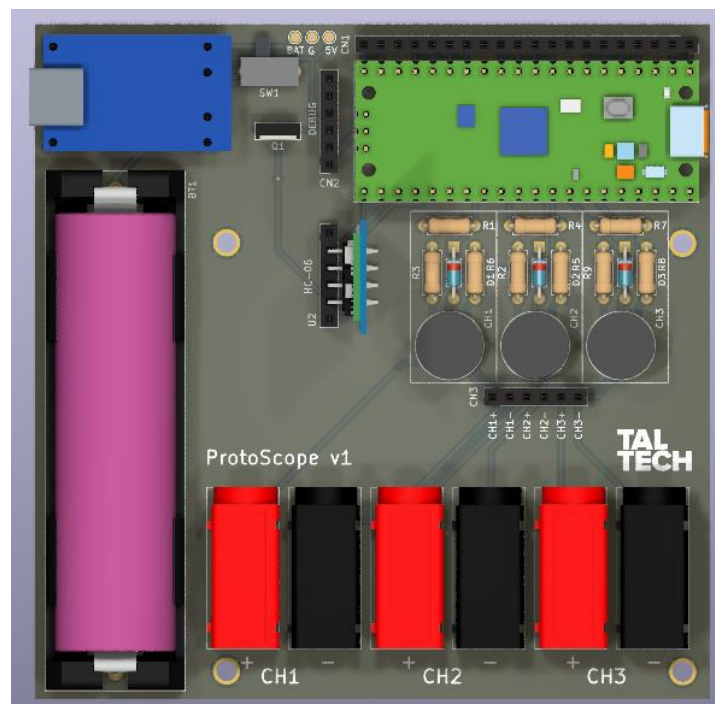
Bluetooth moodul HC-06, mille skeem on välja toodud joonisel 2.6, kasutab mikrokontrolleriga suhtlemiseks UART liidest (klemmid TXD ja RXD) ning nõuab toitepinget vahemikus 3,6...6 volti. Jooniselt 2.1 on näha, et Raspberry Pico'l on kaks UART liidest, kumbagi neist on võimalik mitme klemmi kaudu kasutada. Trükkplaadi disainimise ja tulevikus ostsilloskoobile funktsioonide lisamise lihtsustamiseks otsustati HC-06 ühendamiseks kasutada Pico klemme GP16 (UART0 TX) ja GP17 (UART0 RX). [22] [24]





**Joonis 2.6.** Bluetooth mooduli HC-06 elektriskeem. [24]

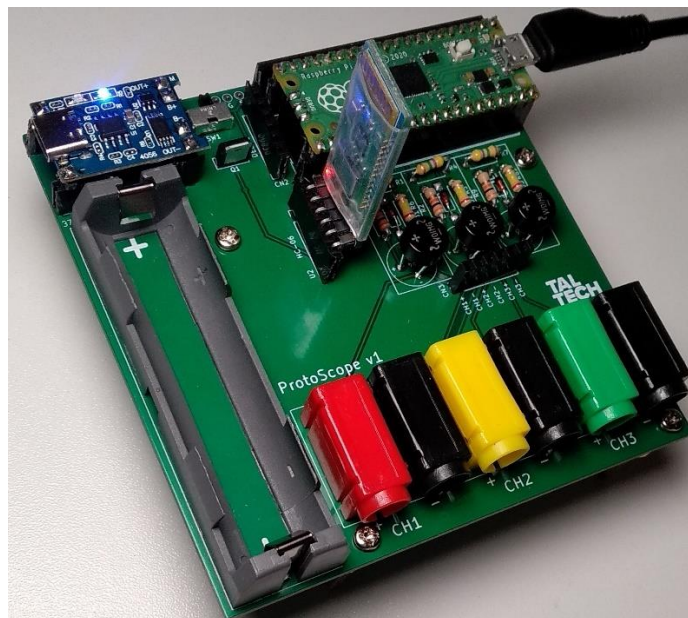
Trükkplaadi disainimisel võeti plaadi suuruseks 100 mm \* 100 mm. Peamine põhjuse sellise plaadi suuruse valikuks oli asjaolu, et kõik kasutatavad komponendid on läbi plaadi (*through-hole*) joodetavad, mis tähendab, et suuremad komponendid (patareihooldik, konnektorid) piiravad plaadi tagumise külje kasutamist. Plaadi suuruse vähendamiseks oleks võimalik asendada osa komponentidest plaadile joodetavate (*surface-mount*) komponentidega asendada, kuid ostsilloskoobi kokku panemise ja hooldamise lihtsustamiseks on seda välditud.



**Joonis 2.7.** Ostsilloskoobi trükkplaadi pealtvaade.

Joonisel 2.7 on välja toodud disainitud ostsilloskoobi trükkplaadi pealtvaade. Plaadi vasakus servas on näha patareihooldikut koos laadimismooduliga, laadimismooduli kõrval on lüliti ja MOSFET toite juhtimiseks. Plaadi alumises servas on konnektorid

ostilloskoobi sisendsignaali jaoks. Plaadi keskel on näha Bluetooth moodulit ning sellest paremal signaalitöötlusosa. Plaadi üleval paremas nurgas on mikrokontroller ning selle alla on paigutatud operatsioonivõimendi koos sellele tugipinge andmiseks vajalike takistitega. Plaadile on lisatud ka mõned konnektorid mõõtmiste lihtsustamiseks ning veaotsinguks, samuti ka augud, et plaati oleks võimalik kinnitada alusele või korpusesse. Ostsilloskoobi kokku pandud näidet on võimalik näha joonisel 2.8 .



**Joonis 2.8.** Kokku pandud ostilloskoop.

## 2.4 Tarkvara

Raspberry Pi Picot on võimalik programmeerida nii MicroPython'i kui ka C keele abil. Antud töö käigus kirjutati ostilloskoobi mikrokontrolleri tarkvara C keeles kasutades Raspberry Pi poolt loodud tarkvaraarenduskomplekti (*software development kit* e SDK). SDK koosneb erinevatest teekidest, mis kiirendavad kontrollerile tarkvara arendamise protsessi, näiteks teek *pico\_multicore* sisaldab funktsioone teise tuuma ja teek *hardware\_adc* funktsioone ADC kasutamiseks. [38]

Raspberry Pi Picol on kaks tuuma, mis võivad samaaegselt erinevaid ülesandeid täita. Ostsilloskoopi programmeerides otsustati kasutada ühte tuuma (tuum 0) mõõtmiste sooritamiseks ja teist tuuma (tuum 1) andmesideks kasutajaliidesega.

Tuumadevaheliseks turvaliseks andmesideks võib kasutada kontrolleri sisseehitatud FIFOsid (*first-in-first-out*; andmestruktuur, kus varem salvestatud infot töödeldakse esimesena), kuid kuna need on kasutuses ka mõne teise teegi poolt, soovitatakse tootja poolt kasutada andmetüüpi *queue*, mis võimaldab FIFO-tüüpi andmestruktuure juurde luua.

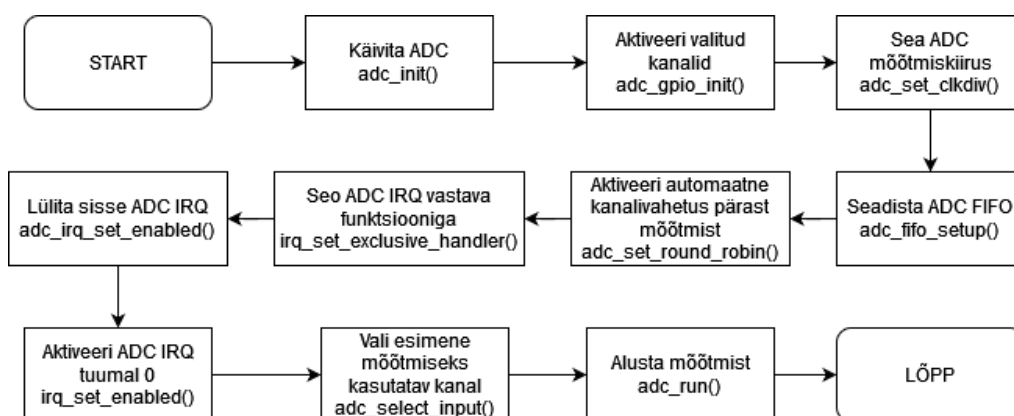
```

typedef struct          typedef union
{
    void *func;         {
                        int8_t byte[2];
                        data16_t data;
                        int16_t integer;
    } queue_entry_t;   } data16_t;

```

**Joonis 2.9.** Tuumadevaheliseks andmesideks loodud andmetüübid.

Ostsiloskoobi töötamiseks peab andmeside tuumade vahel olema mõlemasuunaline, kuna tuum 0 peab saatma mõõdetud ja töödeldud andmed tuumale 1, et need edastataks kasutajaliidesele, ja tuum 1 peab kasutajaliidesele saadud käsud ja seadistusparameetrid (sealhulgas mõõtmiste sagedus ja hulk, kasutatavad kanalid) edastama tuumale 0. Käskude ja andmete vahetamiseks tuumade vahel loodi joonisel 2.9 välja toodud andmetüübid. Andmetüüp *data16\_t* hoiustab mõõdetud andmeid või käskudega seotud informatsiooni, *func* näitab, mida antud andmetega ette tuleks võtta.

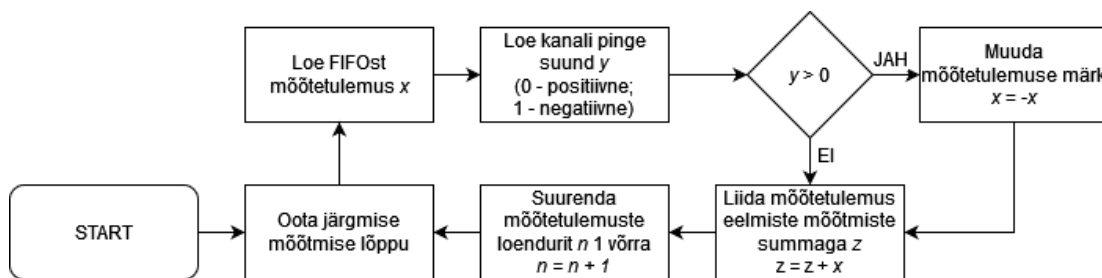


**Joonis 2.10.** ADC seadistamine ja käivitamine

Mõõtmiste teostamiseks on vajalik esmalt ADC käivitada ja seadistada. Täpne käskude jada, mida on vaja selleks kasutada, on välja toodud joonisel 2.10. Esmalt tuleb käivitada ADC riistvaraline moodul käsklusega *adc\_init()* ja seadistada kasutatavad

klemmid analoogmõõtmiste tegemiseks *adc\_gpio\_init()*. Käsklusega *adc\_set\_clkdiv()* on võimalik muuta üheks mõõtmiseks kuluvat perioodi kellatsükklites. Vaikimisi on ADC taktisageduseks 48 MHz ning üheks mõõtmiseks kulub 96 tsüklit ehk maksimaalselt on võimalik teha 500 000 mõõtmist sekundis. Selleks, et sooritada mõõtmisi mitmel kanalil korraga, tuleb kasutada *adc\_set\_round\_robin()*, mis aktiveerib automaatse kanali vahetamise peale igat mõõtmist.

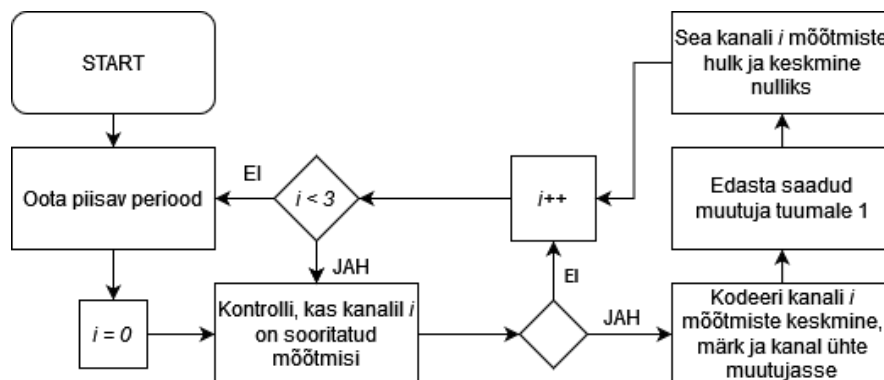
ADC tulemused salvestatakse automaatselt FIFOsse, mille seadistamine toimub funktsiooniga *adc\_fifo\_setup()*. Antud funktsioon võimaldab ka seadistada, mitu mõõtmist on võimalik sooritada enne ADC-le vastava signaali (*interrupt request* e IRQ) saatmist, mis tähistab, et mõõtmine on sooritatud ja tulemus ootab töötlemist. Järgneva kolme funktsiooniga seadistatakse ADC IRQ, mille aktiveerumisel peatab tuum kõik muud tegevused ja keskendub käsklusega *irq\_set\_exclusive\_handler()* antud funktsioonile. Käsklusega *adc\_select\_input()* valitakse esimene mõõtmisteks kasutatav kanal ja käsklusega *adc\_run()* alustatakse mõõtmisi. Kogu protsess tuleb käivitada nii esmasel käivitamisel kui ka kasutajaliidese poolt mõõtmiseks kasutatavate kanalite muutmisel.



**Joonis 2.11.** ADC poolt mõõtmiste sooritamine

Pärast joonisel 2.1 välja toodud käsku *adc\_run()* käivitub joonisel 2.11 välja toodud protsess. Iga kord, kui ADC on ühe mõõtmise lõpetanud, jäetakse tuuma 0 muud tegevused pausile, loetakse FIFOst salvestatud mõõtetulemus  $x$  ja mõõtmiseks kasutatud kanalile vastavalt klemmilt välja pinge polaarsus  $y$ . Kui pinge peaks olema negatiivse polaarsusega, muudetakse mõõtetulemuse märki, vastasel juhul jääb tulemus muutmata. Seejärel liidetakse tulemus eelmiste samalt kanalilt saadud mõõtetulemuste summaga  $z$  ning suurendatakse kanalil sooritatud mõõtmiste loendurit ühe võrra. Pärast kõiki neid tegevusi jätkab tuum 0 oma tööd sealt, kust see enne pooleli jäi, kuni järgmise mõõtmise lõpuni. Vaikimisi on ostsilloskoop seadistatud selliselt, et selle mõõtmisagedus oleks alati 500 000 mõõtmist sekundis. Madalama mõõtmisageduse saavutamiseks sooritab ostsilloskoop korduvaid mõõtmisi, arvutab nende põhjal keskmise, ja väljastab selle etteantud sagedusel. See võimaldab iga

väljastatud andmepunkti kohta teha suurel hulgal mõõtmisi ja keskmistamise teel mõõtetäpsust suurendada. Iga kanali jaoks hoitakse eraldi meeles praeguse andmepunkti jaoks sooritatud mõõtmiste hulka ja nende mõõtetulemuste summat.



**Joonis 2.12.** Mõõtetulemuste töötlemine ja edastamine tuumale 1.

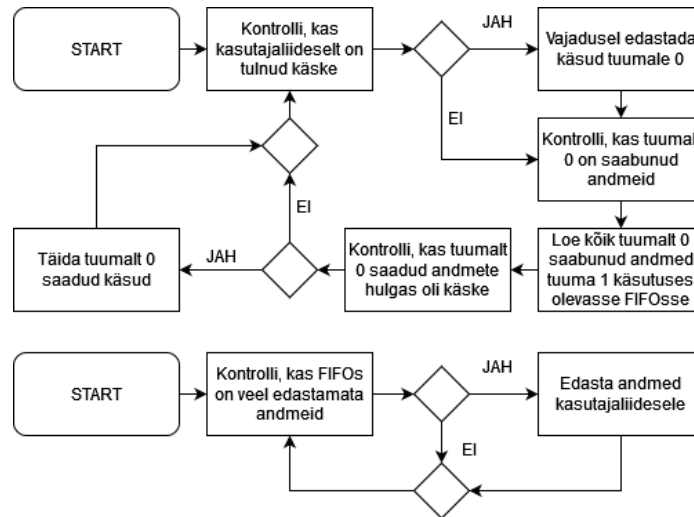
Pärast tuuma 1 ja ADC käivitamist ning erinevate seadistuste tegemist, käivitub tuumal 0 joonisel 2.12 välja toodud protsess. Esmalt ootab tuum 0 teatud perioodi, mis on seatud kasutaja poolt soovitud mõõtesagedusega. Näiteks kui kasutaja soovib sooritada mõõtmisi sagedusel 1000 Hz, on oodatavaks perioodiks (käskude täitmiseks kuluvat aega mitte arvesse võttes)  $\frac{1}{1000} = 0,001 s = 1 ms$ . Pärast antud perioodi möödumist kontrollitakse kõigi kolme kanali puhul, kas antud kanalil on ooteperioodi ajal toimunud mõõtmisi. Kui ei, siis liigutakse edasi järgmise kanali juurde, kui jah, siis kodeeritakse info mõõtetulemuse väärtuse, märgi ja kanali kohta ühte 16-bitisesse muutujasse.

Bitt	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Tähendus	0	Kanal		Märk	Mõõtetulemus											
	1	Käsk						Argument								

**Joonis 2.13.** Andmevahetuseks kasutatava muutuja bittide tähendused.

Selleks kasutatakse joonisel 2.9 näidatud andmestruktuuri (*data16\_t*), kus erinevate bittide tähendus on välja toodud joonisel 2.13. Antud muutuja suurima väärtusega bitt (15) tähistab, kas tegu on mõõtetulemuse (0) või käsuga (1). Järgmised kaks bitti (14...13) tähistavad kanalit, millel mõõtetulemus saadi, ning nendest järgmine bitt (12) näitab, kas mõõtetulemus on positiivne või negatiivne. Viimasesse 12 bitti on salvestatud mõõtetulemus ise. Andmete sedasi kodeerimine on vajalik, et suurendada

andmesidekiirust tuumade vahel ning tuuma 1 ja kasutajaliidese vahel. Peale info kodeerimist edastatakse info tuumale 1 ja liigutakse edasi järgmise kanali juurde. Kogu protsess on korraldatud selliselt, et andmete kodeerimise ja edastamise vältel ADC uusi mõõtetulemusi ei genereeri. Kui kõigi kolme kanali andmed on edastatud, oodatakse järgmise väljastamise ajahetke saabumist.

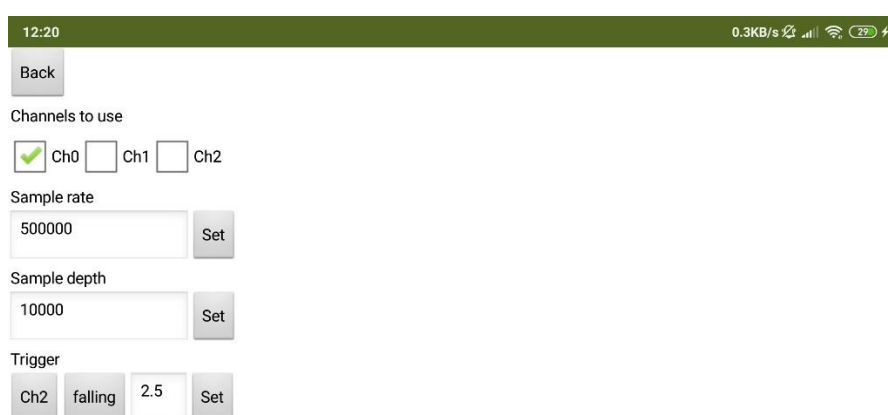


**Joonis 2.14.** Tuuma 1 tööprotsessid.

Tuuma 1 tööd kirjeldab joonis 2.14. Tuuma 1 käivitamisel käivituvad kaks erinevat protsessi sisuliselt paralleelselt. Esimene neist kontrollib kõigepealt, kas kasutajaliideseelt on saabunud ühtegi käsku. Kui jah, siis sooritab tuum 1 vajadusel saadud käsu ise või edastab selle tuumale 0. Seejärel kontrollitakse, kas tuumalt 0 on saabunud andmeid, selleks kontrollitakse tuumalt 0 tuuma 1 andmete saatmiseks kasutatava FIFO elementide arvu. Kui jah, loetakse need tuumadevahelisest FIFOst ainult tuuma 1 käsutuses olevasse FIFOsse. Kui FIFOst loetud andmete hulgas oli mõni käsk, siis täidab tuum 1 selle. Teine protsess kontrollib pidevalt, kas tuuma 1 FIFOs on veel edastamata andmeid, nende puudumisel ootab, kuni FIFOsse saabub andmeid. Andmete olemasolul edastatakse need kasutajaliidesele.

## 2.5 Kasutajaliides

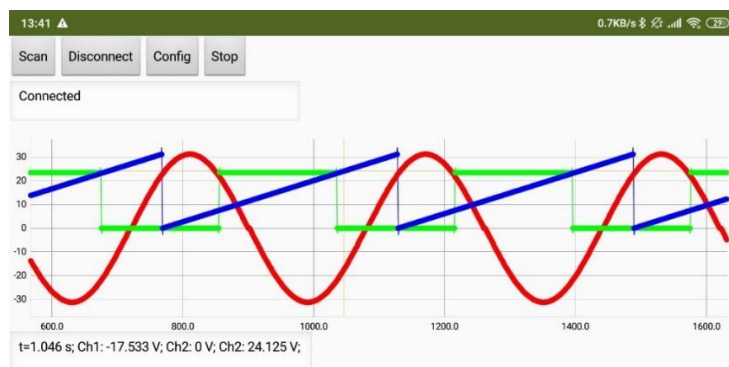
Kasutajaliidesena otsustati kasutada telefonirakendust, mille arendamisel kasutati keskkonda MIT App Inventor. Tegu on keskkonnaga, mille abil on võimalik etteantud elementidest ja kooditükkidest ilma mobiilseadmete tarkvara arendamise oskuseta luua lihtne äpp ja seda telefonis kasutada. Kasutajaliides koosneb kahest vaatest: ühte neist kasutatakse ostsilloskoobi seadistamiseks, teist ostsilloskoobiga ühendamiseks ja mõõtetulemuste näitamiseks. Ostsilloskoobi seadistamiseks kasutatav vaade on välja toodud joonisel 2.15.



**Joonis 2.15.** Ostsilloskoobi seadistamine kasutajaliideses.

Ostsilloskoobi seadistamisel on võimalik valida, millis(t)el kanali(te)l mõõtmisi sooritada. Samuti võimaldab kasutajaliides mõõtmisageduse seadmist. Kõigi kolme kanali peale kokku suudab ostsilloskoop sooritada kuni 500 000 mõõtmist sekundis, mitme kanali kasutamisel on maksimaalseks mõõtmisageduseks kanali kohta  $f = \frac{500000}{n} [Hz]$ , kus  $n$  on kasutuses olevate kanalite hulk. Mikrokontrolleri sisemälu täitumise vältimiseks on seatud minimaalseks väljastussageduseks 1000 Hz. Kuna mõõtetulemuste salvestamine toimub kiiremini, kui neid kasutajaliidese edastada võimalik on, salvestatakse tulemused FIFOsse. Kasutajaliideses on võimalik piirata FIFOsse salvestatavate tulemuste hulka, maksimaalselt on võimalik salvestada kuni 100 000 mõõtmist. Mõõtmise alustamiseks on võimalik seada ühel kanalil tingimus, mille saavutamisel mõõtmist alustada (*trigger*), selleks on mõõdetava pinge tõusmine/langemine seatud tasemest kõrgemale/madalamale. Kasutajaliideses salvestab valitud seaded ning taastab need järgmisel käivitusel.

Ostilloskoobiga ühendamiseks ja tulemuste näitamiseks kasutatav vaade on välja toodud joonisel 2.16.



**Joonis 2.16.** Kasutajaliideses tulemuste näitamine.

Vaate ülemises reas asuvad järgmised nupud:

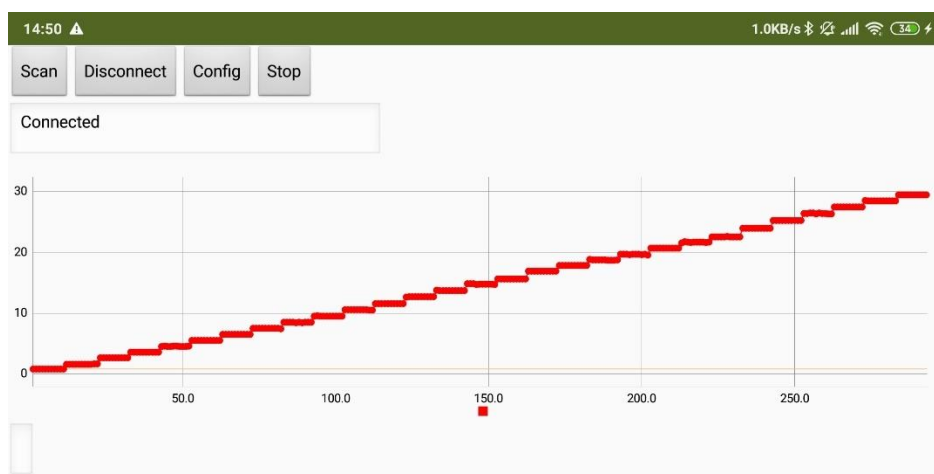
- *Scan* – ostilloskoobi leidmine ja valimine
- *Connect/Disconnect* – valitud ostilloskoobiga ühenduse loomine või selle katkestamine
- *Config* – seadistamiseks kasutatava vaate avamine (joonis 2.15)
- *Start/Stop* – mõõtmiste alustamine/lõpetamine

Nuppude all olevas reas kirjeldatakse ostilloskoobi olekut. Ekraani keskel paikneb graafik, mis näitab erinevate kanalite mõõtmistulemusi. Graafiku y-telg tähistab mõõdetud pingetaset voltides, x-teljeks on aeg. Graafikut on võimalik suurendada ja vähendada, graafikul vajutades kuvatakse alumisel real antud mõõtmise ajahetk ja kõikide kanalite pingetasemed antud hetkel. Kasutajaliidese katsetamiseks on joonisel 2.16 kuvatud mikrokontrolleri poolt saadetud näidisandmed, mis vastavad kolmele erinevale lainekujule.



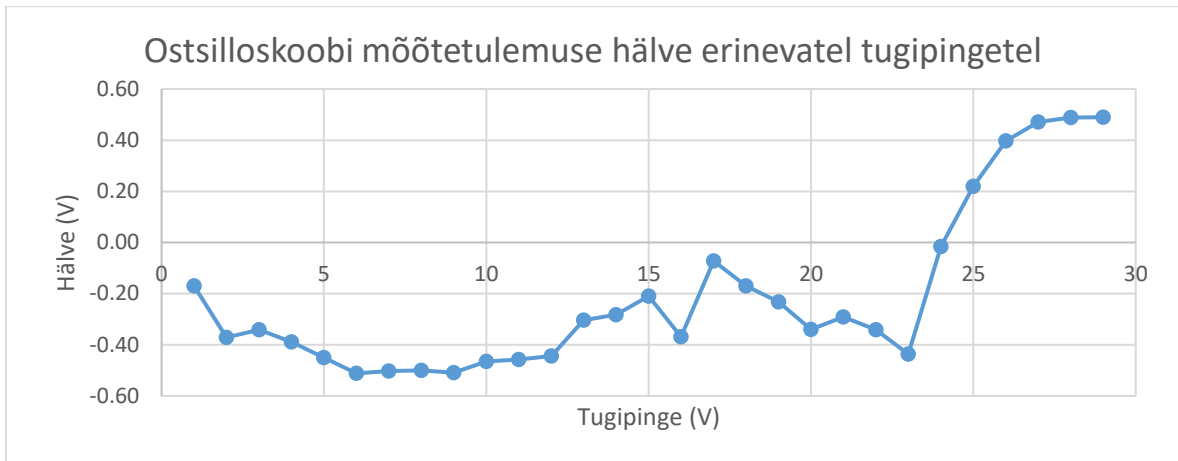
### 3 MÕÕTMISED

Ostsiloskoobi katsetamiseks sooritati mitmeid mõõtmisi. Esmalt mõõdeti alalispinge allika pinget vahemikus 1...29 volti, astmeks 1 volt, igal astmel sooritati 10 mõõtmist sagedusel 10 hertsi. Võrdluseks kasutati PeakTech 8040 digitaalset multimeetrit. Mõõtmistulemuste graafik on välja toodud joonisel 3.1 .



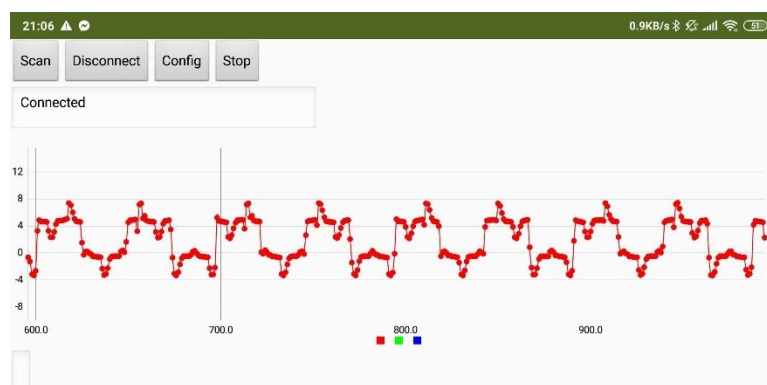
**Joonis 3.1.** Ostsiloskoobiga alalispinge mõõtmine.

Lisas 2 välja toodud tabelis on alalispinge mõõtmise katse tulemused. Tabelisse on märgitud multimeetriga mõõdetud pinge, ostsiloskoobi kümne mõõtmise keskmine ning multimeetri ja ostsiloskoobi mõõtmiste erinevus iga pingeastme kohta. Ostsiloskoobi mõõtetulemuse ja tugipinge erinevust kirjeldab joonis 3.2 . Vahemikus 1...24 volti on ostsiloskoobi mõõtetulemus kuni 0,51 voldi võrra väiksem tegelikust pingest. 24 voldise tugipinge korral on ostsiloskoobi mõõtetulemus kõige täpsem, kuid sellest kõrgema pinge korral on mõõtetulemus kuni 0,49 voldi võrra kõrgem tegelikust pingest.



**Joonis 3.2.** Ostsilloskoobi mõõtetulemuse hälve erinevatel tugipingetel.

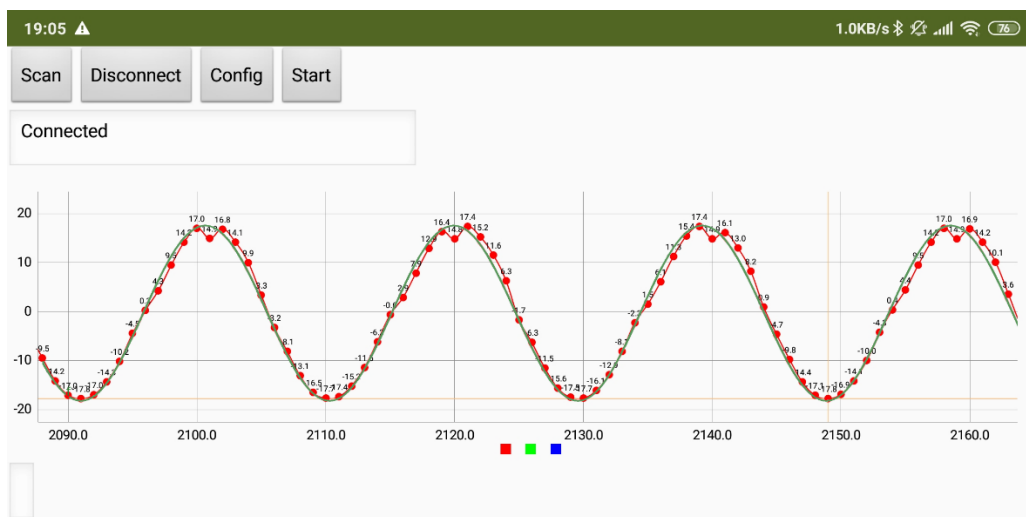
Teise katsena mõõdeti ostsilloskoobiga välise mikrokontrolleri poolt väljastatavat pulsilaiusmodulatsiooni signaali. Signaali amplituudiks oli 5 volti, sageduseks 50 hertsi ja töötüklis 50 protsenti. Mõõtmised sooritati sagedusel 2000 hertsi. Katse tulemused on välja toodud joonisel 3.3 . Jooniselt on näha, et kuigi üldjoontes järgib graafik pulsilaiusmodulatsioonile omast lainekuju, esineb mõõtmisel olulisi häireid. Antud häirete üheks põhjuseks on asjaolu, et ostsilloskoobi analoog- ja digitaalpingega tegelevad skeemiosad pole üksteisest eraldatud ning kiired ümberlülitused digitaalpinge osas võivad tekitada häireid analoogpinge osas. Graafikul esinevad negatiivsed lainetipud on tingitud pinge polaarsuse mõõtmise meetodikast, mida on kirjeldatud joonistel 2.4 , 2.5 ja 2.11 . Ostsilloskoobi digitaalosas toimuvad ümberlülitused põhjustavad häiringuid pinge polaarsuse määramisel ning mõõtetulemusele omistatakse vastupidine märk.



**Joonis 3.3.** Ostsilloskoobiga pulsilaiusmodulatsiooni mõõtmine.

Lisaks alalispinge mõõtmisele sooritati ka katse, mille käigus mõõdeti ostsilloskoobiga vahelduvpinget. Antud katse käigus mõõdeti vahelduvpingeallika väljundpinget,

Peaktech 8040 multimeetriga oli antud pinge efektiivväärtuseks 12,8 volti ja sageduseks 50 hertsi. Mõõtmised sooritati sagedusel 1000 hertsi. Katse tulemused on välja toodud joonisel 3.4. Mõõtetulemused on välja toodud punase joone ja punktidega, siinuslaine ideaalkuju on välja toodud rohelse joonega. Jooniselt on näha, et mõõdetud vahelduvpinge lainekuju on väga lähedal ideaalsele. Kui arvutuste kohaselt peaks mõõdetud vahelduvpinge amplituudiks olema  $V_{PP} = 12,8 * \sqrt{2} \approx 18,1 V$ , siis ostsilloskoobi mõõtetulemuste kohaselt on vahelduvpinge amplituudiks  $V_{PP} \approx 17,8 V$ .



**Joonis 3.4.** Ostsilloskoobiga vahelduvpinge mõõtmine.

### 3.1 Mõõtmiste järelused

Mõõtmiste tulemusena on võimalik teha ostsilloskoobi disaini kohta järelusi ja analüüsida selle kasutusvõimalusi. Disainitud ostsilloskoop võimaldab aeglaselt muutuva alalispinge või siinuselise vahelduvpinge mõõtmist, samas varieerub mõõtehälve vahemikus -0,5...0,5 volti. 50 hertsise sagedusega alalissignaali mõõtmisel esineb olulisi mõõtehäireid, kuid kui mõõdetava signaali lainekuju on teada, on ostsilloskoopi võimalik kasutada signaali olemasolu ja ligikaudse sageduse tuvastamiseks.

Töö käigus disainitud ostsilloskoobi probleemid on tingitud mitmest asjaolust, nendest on võimalik välja tuua näiteks järgmised:

- ostsilloskoobi analoog- ja digitaalsignaalidega tegelevad osad ei ole üksteisest eraldatud; ümberlülitused digitaalosas võivad tekitada häireid analoogosas
- mikrokontrolleri ADC on mõõtmiste sooritamisel madala stabiilsusega, kuna selle toitepinge sõltub mikrokontrolleri voolutarvest
- sisendsignaali mõõtmisel ei toimu müra filtreerimist
- vahelduvpinge alaldamiseks kasutatud alaldi tõttu pole võimalik ühest voldist madalamat pinget täpselt mõõta

Ostsilloskoobi disaini parandamiseks on võimalik proovida järgmiseid meetodeid:

- jagada ostsilloskoobi trükkplaat analoog- ja digitaalpingeosaks ning eraldada need üksteisest
- kasutada eraldiseisvat ADC-d, mis oleks kiirem ja täpsem mikrokontrolleri sisseehitatud ADC-st
- kasutada filtreid sisendsignaalidest müra välja filtreerimiseks
- vältida vahelduvpinge mõõtmiseks alaldite kasutamist
- kasutada mikrokontrolleri ja ADC toitmiseks stabiilset pingeregulaatorit.

### **3.2 Vastavus seatud nõuetele**

Töö käigus disainitud ostsilloskoop vastab suuremale osale peatükis 2.1 seatud nõuetele. Seadme komponendid on vajadusel lihtsasti välja vahetatavad. Ostsilloskoop on aku olemasolul täielikult juhtmevaba ning selle akumahtuvus peaks olema piisav terve akadeemilise tunni vältel kasutamiseks. Ostsilloskoop suudab mõõta nii alalis- kui ka vahelduvpinget maksimaalse hetkväärtusega kuni 30 volti. Ostsilloskoop edastab mõõtetulemused juhtmevabalt kasutajaliidesele, kust on võimalik ostsilloskoopi seadistada ja mõõtetulemusi analüüsida.

Kuigi mõõtetäpsusele ja -sagedusele nõudeid ei seatud, aitaks nende parandamine kaasa ostsilloskoobi õppetöös kasutamisele sellisel, et selle kasutamine soodustaks õppetööd, mitte ei takistaks seda.

## KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli disainida mikrokontrolleril põhinev kaasaskantav ostsilloskoop, mis oleks tavalisest ostsilloskoobist kättesaadavam ning kasutaja enda poolt kokku pandav ja konfigureeritav.

Enne ostsilloskoobi disaini alustamist uuriti turul olemasolevaid lahendusi ning pandi paika nõuded, millele disainitav seade vastama peaks. Töö käigus otsustati erinevate tootjate poolt valmistatavate mikrokontrollerite tehniliste andmete, maksumuse ja saadaoleva tehnilise toe põhjal kasutada mikrokontrollerit Raspberry Pico. Kuigi Raspberry Pico variant W omab sisseehitatud juhtmevaba andmesideliidest, puudus töö kirjutamise ajal selle kasutamiseks tarkvaraline tugi, seega otsustati kasutada HC-06 Bluetooth moodulit.

Töö praktiline osa jagunes elektroonika disainimiseks, tarkvara kirjutamiseks ja kasutajaliidese loomiseks. Elektroonika, sealhulgas elektriskeemide ja trükkplaadi, disainimiseks kasutati programmi KiCad. Tarkvara kirjutati C keeles, kasutades mikrokontrolleri tootja poolt väljastatud teeke ning soovitatud tööriistaahelat keskkonnas Visual Studio Code. Kasutajaliidese loomiseks kasutati keskkonda MIT App Inventor.

Töö tulemusena valminud ostsilloskoobiga sooritati katsemõõtmised, mille käigus mõõdeti nii alalis- kui ka vahelduvpinget. Katsetuste tulemusena selgus, et madalasaduslike signaalide mõõtmisel erineb ostsilloskoobi mõõtetulemus tegelikust pingest kuni 0,5 voldi võrra. Ostsilloskoobiga oli edukalt võimalik mõõta 50 hertsise sagedusega siinuselist vahelduvpinget, kuid pulsilaiusmodulatsiooni mõõtmisel esines olulisi häireid.

Töö käigus disainitud ostsilloskoop vastab suurele osale seatud tingimustest, kuid selle praktiliseks kasutamiseks on vaja rohkem arendustegevust. Elektroonika poole pealt tuleks eraldada ostsilloskoobi analoog- ja digitaalosa, kasutada filtreid sisendsignaalist müra välja filtreerimiseks ning parandada toitepinge stabiilsust. Samuti tuleks kaaluda välise ADC kasutamist. Andmeside parandamiseks on võimalik kasutada Raspberry Pico W-d, kuid selleks on vajalik tarkvara osaline kohandamine ja optimeerimine. Samuti on võimalik edasi arendada kasutajaliidest nii funktsionaalsest kui ka visuaalsest vaatenurgast.

## SUMMARY

The aim of the thesis was to develop a portable microcontroller based oscilloscope that would be more accessible than its available counterparts on the market. The user should be able to assemble and configure the oscilloscope independently.

Before designing the oscilloscope, available solutions on the market were researched and requirements for the design of the device were set. Based on the technical specifications, cost and available technical support of several microcontrollers manufactured by different manufacturers, Raspberry Pi Pico was chosen for use in the oscilloscope. Although Raspberry Pico model W has a built-in wireless connectivity module, adequate software support for its usage was not yet available during the writing of the thesis, therefore the HC-06 Bluetooth module was used instead.

The practical segment of the thesis focused on electronics design, firmware development and graphical user interface design. KiCad was used for the electronic schematic and printed circuit board design. The firmware for the microcontroller was written in C using the libraries published by the Raspberry Pi Foundation and the recommended toolchain in the integrated development environment Visual Studio Code. The graphical user interface was designed using MIT App Inventor.

The oscilloscope designed during the course of the thesis was used for test measurements of both direct and alternating current. When measuring low frequency signals, the measurement result of the oscilloscope deviates up to 0,5 volts from the actual voltage. Measuring alternating current at a frequency of 50 Hz was successful, but significant noise was present during the measurement of pulse width modulation.

The oscilloscope designed during the course of the thesis meets most of the requirements set, but further development is required for its practical usage. The electronics of the device could be improved by separating the analog and digital sections from each other, filtering the input signals and improving the stability of the power source of the microcontroller. The usage of an external ADC should also be considered. Data transmission speeds could be improved by using the Raspberry Pico W, which would require refactoring and optimizing a part of the software. The graphical user interface can be improved from both a functional and visual standpoint.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] J. G. Webster and J. Murphy, "Oscilloscope Voltage Measurement", *Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays*, Boca Raton, CRC Press LLC, 2004, lk 1-21 – 1-40.
- [2] N. Kularatna, *Digital and analogue instrumentation testing and measurement*, London: The Institution of Electrical Engineers, 2003.
- [3] J. G. Webster and E. B. Loewenstein, "Analog-to-Digital Converters", *Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays*, Boca Raton, CRC Press LLC, 2004, lk 25-1 – 25-21.
- [4] D. F. Hoeschele, *Analog-To-Digital and Digital-to-Analog Conversion Techniques*, New York: John Wiley & Sons Inc., 1994.
- [5] Analog Devices, Inc., *The Data Conversion Handbook*, 2005.
- [6] Qingdao Hantek Electronic Co., Ltd, "Hantek2000 Series," [Võrgumaterjal].  
Saadaval:  
<https://web.archive.org/web/20230325071453/http://hantek.com/products/detail/13174>. [Kasutatud 06. 04. 2023].
- [7] Automotive Electronics Services, Inc., "uScope - Single Channel Pocket DSO," [Võrgumaterjal]. Saadaval:  
<https://web.archive.org/web/20230406160420/https://uscope.aeswave.com/>.  
[Kasutatud 06. 04. 2023].
- [8] Automotive Electronics Services, Inc., "uScope User's Reference Guide," [Võrgumaterjal]. Saadaval:  
<https://web.archive.org/web/20230513151423/https://uscope.aeswave.com/user-manual/>. [Kasutatud 06. 04. 2023].
- [9] Automotive Electronics Services, Inc, "uScope Basic Kit," [Võrgumaterjal].  
Saadaval:  
<https://web.archive.org/web/20230406161651/https://www.aeswave.com/uScope-Basic-Kit-p9621.html>. [Kasutatud 06. 04. 2023].
- [10] Adafruit, "DSO Nano v3," [Võrgumaterjal]. Saadaval:  
<https://web.archive.org/web/20230406164900/https://www.adafruit.com/product/468>. [Kasutatud 06. 04. 2023].

- [11] AccuDIY, "DSO112A Oscilloscope with Touch Panel," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230406170755/https://accudiy.com/products/dso112a-oscilloscope-with-touch-panel>. [Kasutatud 06. 04. 2023].
- [12] Pokit Innovations Pty Ltd , "Pokit Meter," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230406201318/https://www.pokitinnovations.com/pokit-meter/>. [Kasutatud 06. 04. 2023].
- [13] Pokit Innovations Pty Ltd , "Pokit Pro," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230406210809/https://www.pokitinnovations.com/pokit-pro/>. [Kasutatud 06. 04. 2023].
- [14] Arduino, "Arduino Nano 33 IoT," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230409112031/https://store.arduino.cc/products/arduino-nano-33-iot>. [Kasutatud 09. 04. 2023].
- [15] Arduino, "Arduino Nano 33 IoT datasheet," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230409115359/https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/ABX00027-datasheet.pdf>. [Kasutatud 09. 04. 2023].
- [16] Arduino, "Arduino Documentation. Arduino Nano 33 IoT," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230409133512/https://docs.arduino.cc/hardware/nano-33-iot>. [Kasutatud 09. 04. 2023].
- [17] Espressif Systems, "ESP32-S3-WROOM-1 datasheet," [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://web.archive.org/web/20230409140626/https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3-wroom-1\\_wroom-1u\\_datasheet\\_en.pdf](https://web.archive.org/web/20230409140626/https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3-wroom-1_wroom-1u_datasheet_en.pdf). [Kasutatud 09. 04. 2024].
- [18] Espressif Systems., "ESP32-S3," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230409195634/https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32-s3>. [Kasutatud 09. 04. 2023].
- [19] STMicroelectronics, "STM32G431KB," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230410071811/https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32g431kb.html>. [Kasutatud 09. 04. 2023].
- [20] STMicroelectronics, "NUCLEO-G431KB," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230410073242/https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-g431kb.html>. [Kasutatud 10. 04. 2023].



- [21] Raspberry Pi, "Raspberry Pi Pico," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230410092919/https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-pico/>. [Kasutatud 10. 04. 2023].
- [22] Raspberry Pi, "Raspberry Pi Documentation - Raspberry Pi Pico and Pico W," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230410095545/https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/raspberry-pi-pico.html>. [Kasutatud 10. 04. 2023].
- [23] Raspberry Pi, "Raspberry Pi Documentation - RP2040," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230410101427/https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/rp2040.html>. [Kasutatud 10. 04. 2023].
- [24] Components101., "HC-06 Bluetooth Module," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230410193049/https://components101.com/wireless/hc-06-bluetooth-module-pinout-datasheet>. [Kasutatud 10. 04. 2023].
- [25] AliExpress.com, "HC-06 Wireless Bluetooth Module," [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://web.archive.org/web/20230410193746/https://www.aliexpress.us/item/2251832780932454.html?gatewayAdapt=glo2usa4itemAdapt&\\_randl\\_shipto=US](https://web.archive.org/web/20230410193746/https://www.aliexpress.us/item/2251832780932454.html?gatewayAdapt=glo2usa4itemAdapt&_randl_shipto=US). [Kasutatud 10. 04. 2023].
- [26] Premier Farnell Limited, "W01MG," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230419185050/https://ee.farnell.com/multicomp/w01mg/bridge-rectifier-100v-1-5a-wob/dp/1861435>. [Kasutatud 19. 04. 2023].
- [27] Texas Instruments Incorporated., "LM224," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230423083618/https://www.ti.com/product/LM224>. [Kasutatud 23. 04. 2023].
- [28] Premier Farnell Limited, "LM224N," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230423084840/https://ee.farnell.com/texas-instruments/lm224n/op-amp-quad-ind-spec-dip14-224/dp/3117009>. [Kasutatud 23. 04. 2023].
- [29] Common Sense Home, "Everything You Need to Know About the 18650 Battery," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230423103034/https://commonsensehome.com/18650-battery/>. [Kasutatud 23. 04. 2023].
- [30] Transfer Multisort Elektronik Sp. z o.o., "INR18650-MH1," [Võrgumaterjal]. Saadaval:

<https://web.archive.org/web/20230423104647/https://www.tme.eu/ee/en/details/accu-18650-3.2lg/rechargeable-batteries/lg-chem/inr18650-mh1/>. [Kasutatud 23. 04. 2023].

[31] Mouser Electronics, Inc., [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230423110022/https://www.mouser.ee/ProductDetail/Keystone-Electronics/1043?qsr=/7TOpeL5Mz6j/nxeOA1rsg%3D%3D>. [Kasutatud 23. 04. 2023].

[32] Shenzhen Okystar Technology Co., Ltd, "OKY3404-1," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230423110907/https://www.okystar.com/product-item/5v-1a-micro-usb-lithium-battery-charging-board-charger-module-oky3404-1/>. [Kasutatud 23. 04. 2023].

[33] Oomipood, "Laadimismoodul/Tühjenemiskaitse Li-Po/Li-Ion 5VDC 1A USB C," [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://web.archive.org/web/20230423111800/https://www.oomipood.ee/product/oky3404\\_1\\_laadimismoodul\\_tuhjenemiskaitse\\_li\\_po\\_li\\_ion\\_5vdc\\_1a\\_usb\\_c](https://web.archive.org/web/20230423111800/https://www.oomipood.ee/product/oky3404_1_laadimismoodul_tuhjenemiskaitse_li_po_li_ion_5vdc_1a_usb_c). [Kasutatud 23. 04. 2023].

[34] Premier Farnell Limited, "IRFU5410PBF," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230423113019/https://ee.farnell.com/infineon/irfu5410pbf/mosfet-p-ch-100v-13a-150deg-c/dp/3155150>. [Kasutatud 23. 04. 2023].

[35] Premier Farnell Limited, "1825232-1," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230423113946/https://ee.farnell.com/te-connectivity/1825232-1/slide-switch-spdt-0-2a-30vdc-solder/dp/3133585>. [Kasutatud 23. 04. 2023].

[36] Premier Farnell Limited., "24.243.1," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230423114843/https://ee.farnell.com/multicomp/24-243-1/banana-socket-20a-4mm-pcb-red/dp/1698982>. [Kasutatud 23. 04. 2023].

[37] Premier Farnell Limited, "RASPBerry PI PICO," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230410181236/https://ee.farnell.com/raspberry-pi/raspberry-pi-pico/raspberry-pi-32bit-arm-cortex/dp/3643332>. [Kasutatud 10. 04. 2023].

[38] Raspberry Pi Ltd, "Raspberry Pi Pico C/C++ SDK," [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://web.archive.org/web/20230424132043/https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/c\\_sdk.html](https://web.archive.org/web/20230424132043/https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/c_sdk.html). [Kasutatud 24. 04. 2023].

- [39] Pokit Innovations Pty Ltd , "Specifications," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230406205858/https://www.pokitinnovations.com/specifications/>. [Kasutatud 06. 04. 2023].
- [40] Amazon.com, Inc, "Hantek 2D72 Handheld Oscilloscope," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230406160120/https://www.amazon.com/Hantek-2D72-Oscilloscope-Generator-Multimeter-Multifunction/dp/B07PWZTNJK/>. [Kasutatud 06. 04. 2023].
- [41] Mouser Electronics, Inc., "ESP32-S3-DevKitC-1-N8R8," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230409194131/https://www.mouser.ee/ProductDetail/Espressif-Systems/ESP32-S3-DevKitC-1-N8R8?qs=7D1LtPJG0i2PiuUUKucutQ%3D%3D>. [Kasutatud 09. 04. 2023].
- [42] STMicroelectronics , "STM32 Nucleo Boards: NUCLEO-G431KB," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230410070936/https://estore.st.com/en/products/evaluation-tools/product-evaluation-tools/mcu-mpu-eval-tools/stm32-mcu-mpu-eval-tools/stm32-nucleo-boards/nucleo-g431kb.html>. [Kasutatud 10. 04. 2023].
- [43] Premier Farnell Limited, "ATSAMD21G18A-AU," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230410065105/https://ee.farnell.com/microchip/atsamd21g18a-au/mcu-32bit-cortex-m0-48mhz-tqfp/dp/2409248>. [Kasutatud 10. 04. 2023].
- [44] Mouser Electronics, Inc., "ESP32-S3-WROOM-1-N8R8," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230410065449/https://www.mouser.ee/ProductDetail/Espressif-Systems/ESP32-S3-WROOM-1-N8R8?qs=7D1LtPJG0i3%2F28hKFavOpQ%3D%3D>. [Kasutatud 10. 04. 2023].
- [45] Premier Farnell Limited., "STM32G431KBT6," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230410070452/https://ee.farnell.com/stmicroelectronics/stm32g431kbt6/mcu-32bit-170mhz-lqfp-32/dp/3132405>. [Kasutatud 10. 04. 2023].
- [46] Premier Farnell Limited., "RP2040CT," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20230410070803/https://ee.farnell.com/raspberry-pi/rp2040ct/mcu-32bit-133mhz-qfn-56/dp/3766082>. [Kasutatud 10. 04. 2023].

## LISAD

Lisa 1. Erinevate kaasaskantavate ostsiloskoopide võrdlus.

Seade	Hantek2000 [6]	uScope [9]	DSO Nano v3 [10]	DSO112A [11]	Pokit Meter [39]	Pokit Pro [39]
Mõõte- vahemik (V)	<150	<80 (DC)	<80 (DC)	<50	<60(DC) <42(AC)	<600
Mõõtesagedus (MSa/s)	250	1	1	5	1	1
Mõõtetäpsus	8 bitti	12 bitti	12 bitti	8 bitti	12 bitti	12 bitti
Salvestatud näitude hulk	6000	4096	4096	1024	6000	14000
Toide	liitium- patareid, USB-C	liitium- patarei	LiPo, USB	Li-Ion, USB	CR2032	aku, USB-C
Akumahtuvus (mAh)	5200	500	500	1200	-	-
Ekraani- resolutsioon	320x240	320x240	320x240	320x240	-	-
Väline andme- vahetus	USB-C	USB	USB	USB	Bluetooth	Blueto oth
Kanalite arv	2	1	1	1	1	1 <sup>1</sup>
Mõõtmed (mm)	199x98x40	91x62x13	91x62x13	80x70x18	ø50x18	170x3 0x23
Multimeeter	Jah	-	-	-	Jah	Jah
Signaali- generaator	Jah	Jah	Jah	Jah	Ei	Ei
Lisad		SD kaart			termo- meeter	termo- meete r
Maksumus	\$123-130 [40]	\$200	\$130	\$89	\$98	\$148

<sup>1</sup> Kuni neli erinevat Pokit Pro seadet võivad samaaegselt samale telefonile andmeid edastada.

## Lisa 2. Erinevate mikrokontrollerite võrdlus.

Mikrokontroller	Arduino Nano 33 IoT [15]	ESP32-S3-WROOM-1-N8R8 [17]	STM32G431KB [19]	Raspberry Pi Pico [21]
Protsessor(id)	ARM® Cortex®-M0+ SAMD21G18A (48 MHz)	Xtensa® LX7 (240 MHz)	Arm® Cortex®-M4 (170 MHz)	ARM® Cortex®-M0+ RP2040 (133 MHz)
Protsessori tuumade arv	1	2	1	2
Flash mälu	1 MB	8 MB (+ 384 kB ROM)	128 kB	2 MB
SRAM mälu	256 kB	512 kB (+ 8 MB PSRAM)	32 kB	264 kB
Toitepinge	< 21 V	3,0-3,6 V	1,71-3,6 V	1,8-5,5 V
Loogikapinge	3,3 V	3,3 V	3,3 V	3,3 V
GPIO viikude arv	14	45	26	26
Andmeside	1xUART, 1XSPI, 1XI2C	3xUART, 4xSPI, 2xI2C, 2xI2S + teised	3xUxART, 3xSPI, 3xI2C	2xUART, 2xSPI, 2xI2C
Wi-Fi/Bluetooth?	Jah	Jah	Ei	Ei <sup>2</sup>
ADC resolutsioon	8/10/12/(16 <sup>3</sup> ) bitti	12 bitti	12(-16 <sup>3</sup> ) bitti	12
ADC sagedus (kS/s)	350	100	4000	500
ADC-de hulk (kanalite arv)	1 (8)	2 <sup>4</sup> (20)	2 (11)	1 (5 <sup>5</sup> )
Lisad	10-bit DAC, krüpteerimis-moodul	RTC, krüpteerimis- ja turvamoodul	2x12-bit DAC (kokku 4 kanalit), RTC	PIO
Maksumus (arendusplaat)	20,8€ [14]	14,1€ [41]	12,52€ <sup>6</sup> [42]	3,68€ [37]
Maksumus (mikrokontroller)	5,2€ [43]	3,67€ [44]	7,05€ [45]	0,92€ [46]

<sup>2</sup> Raspberry Pi Pico mudelid W ja WH sisaldavad endas Wi-Fi ja Bluetooth moodulit, kuid ostsiloskoobi disainimise ja töö kirjutamise ajal puudus neil veel juhtmevaba andmeside kasutamiseks piisav tarkvaraline tugi. [18]

<sup>3</sup> Riistvaraliste korduvate mõõtmiste (*hardware oversampling*) kaudu on võimalik ADC täpsust suurendada.

<sup>4</sup> Ühte ADC moodulitest pole Wi-Fi-ga samal ajal võimalik kasutada. [25]

<sup>5</sup> Üks kanalitest on ühendatud sisemise temperatuurianduriga, ühte kanalit kasutatakse toitepinge mõõtmiseks, arendusplaadi viikudele on välja toodud kolm kanalit. [19][29]

<sup>6</sup> Arendusplaati on lubatud kasutada ainult arenduseesmärkidel, isiklikel, kommerts- ja muudel otstarvetel pole arendusplaati lubatud kasutada. [17]

**Lisa 3. Ostsilloskoobiga alalispinge mõõtmise tulemused.**

<b>Tugipinge (V)</b>	<b>Keskmine (V)</b>	<b>Erinevus (V)</b>	<b>Tugipinge (V)</b>	<b>Keskmine (V)</b>	<b>Erinevus (V)</b>
1	0,83	-0,17	16	15,63	-0,37
2	1,63	-0,37	17	16,93	-0,07
3	2,66	-0,34	18	17,83	-0,17
4	3,61	-0,39	19	18,77	-0,23
5	4,55	-0,45	20	19,66	-0,34
6	5,49	-0,51	21	20,71	-0,29
7	6,50	-0,50	22	21,66	-0,34
8	7,50	-0,50	23	22,56	-0,44
9	8,49	-0,51	24	23,98	-0,02
10	9,54	-0,46	25	25,22	0,22
11	10,54	-0,46	26	26,40	0,40
12	11,56	-0,44	27	27,47	0,47
13	12,70	-0,30	28	28,49	0,49
14	13,72	-0,28	29	29,49	0,49
15	14,79	-0,21			