



## ***Field mill* elektrivälja mõõteseadme ehitamine rakendades PSoC mikrokontrollerit**

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Henrik Hinn

Üliõpilaskood: 223158YAFB

Juhendaja: Lembit Kurik, Küberneetika instituut, insener

Kaasjuhendaja: Indrek Luberg, Küberneetika instituut, insener

Õppekava: Rakendusfüüsika

## Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Henrik Hinn

[allkiri ja kuupäev]

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Lembit Kurik

[allkiri ja kuupäev]

Kaasjuhendaja: Indrek Luberg

[allkiri ja kuupäev]

Töö on lubatud kaitsmisele.

Kaitsmiskomisjoni esimees: [nimi]

[allkiri ja kuupäev]

# Sisukord

|  |    |
|--|----|
| Sisukord .....   | 3  |
| 1 Sissejuhatus .....   | 4  |
| 2 Teoreetilised alused .....                                 | 5  |
| 2.1 Elektriväli atmosfääris .....                            | 5  |
| 2.2 Elektrivälja mõõtmise meetodid .....                     | 6  |
| 2.2.1 <i>Field mill</i> meetod .....                         | 6  |
| 2.2.2 Katselaengu meetod .....                               | 6  |
| 2.2.3 Elektrooptiline meetod .....                           | 7  |
| 2.2.4 Induktsiooni meetod .....                              | 7  |
| 2.3 <i>Field mill</i> teoreetilised alused .....             | 7  |
| 3 Anduri prototüüp .....                                     | 10 |
| 3.1 Anduri prototüübi ehitamine .....                        | 10 |
| 3.2 Anduri prototüübi testimine .....                        | 11 |
| 4 <i>Field mill</i> mõõteseade .....                         | 13 |
| 4.1 <i>PSoC</i> mikrokontroller ja <i>PSoC Creator</i> ..... | 13 |
| 4.2 Signaali töötlemine .....                                | 14 |
| 4.3 Suuremate komponentide valmistamine ja testimine .....   | 16 |
| 4.3.1 Signaalivõimendi .....                                 | 16 |
| 4.3.2 Optopaar .....   | 16 |
| 4.4 <i>Field mill</i> mõõteseadme ehitamine .....            | 17 |
| 4.5 <i>PSoC Creator</i> -is programmeerimine .....           | 18 |
| 4.6 <i>Field mill</i> testimine .....                        | 20 |
| 4.7 <i>Field mill</i> mõõteseadme kalibreerimine .....       | 21 |
| 5 Tulemused ja arutelu .....                                 | 23 |
| 6 Annotatsioon .....   | 25 |
| 7 Abstract .....   | 26 |
| 8 Tänuavaldused .....  | 27 |
| 9 Kasutatud kirjandus .....                                  | 28 |
| 10 Lisad .....   | 30 |
| Lisa 1 fail <i>main.c</i> .....                              | 30 |
| Lisa 2 .....   | 36 |

# 1 Sissejuhatus

Elektrostaatilised nähtused jäävad meie igapäeva elus sageli nähtamatuks, kuid nende mõju on kaugeleulatav – alates looduslikest protsessidest, nagu äike, kuni tööstuslike protsesside ja elektroonikaseadmete töökindluseni. Elektriväljade mõõtmine on sageli oluline nii teadusuuringutes, ilmaprognoosides kui ka elektrostaatilise ohutuse seisukohalt. Üheks laialt levinud elektrivälja mõõteseadmeks on *field mill* tüüpi mõõtesead, mis on spetsialiseerunud eelkõige atmosfääri elektriväljade määramiseks. Selle tööpõhimõte põhineb pöörleval elektroodil, mis perioodiliselt varjestab elektrivälja poolt laetavad elektroodid. Antud meetod võimaldab mõõta väga nõrku staatilisi elektrivälju, mis ümbritsevad meid igapäevaselt, kuid mis ei ole enamasti tajutavad.

Tänapäeva mõõteseadmete turg pakub mitmeid lahendusi elektrivälja mõõtmiseks, kuid sageli on need seadmed kallid ning keeruka ülesehitusega, mis piirab nende kasutamist. Paljud neist mõõteseadmetest ei ole kaasaskantavad ning on suure energiatarbega. Seetõttu on oluline arendada alternatiivne mõõtesead, mille maksumus oleks kordades väiksem, mida oleks võimalik kohandada vastavalt vajadusele ning mida saaks lihtsalt kaasas kanda.

Antud lõputöö käigus valmib *field mill* mõõtesead, mille ehitamine täidab eelpool kirjeldatud nõudmised. Mõõteseadme koostamise eesmärgiks oli valmistada soodsalt käepärastest materjalidest seade, mille universaalsus võimaldaks seda kasutada erinevates rakendustes. Antud mõõteseadme koostamine oli projekt, kus ühildati elektroonika, mehaanika, andmetöötlus ja programmeerimine üheks terviklikuks süsteemiks. Sellise seadme arendamine andis laiapõhjalise kogemuse erinevates füüsika- ja insenerivaldkondades, luues praktilise rakenduse hariduslikel eesmärkidel.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk oli projekteerida, ehitada ning kalibreerida *field mill* elektrivälja mõõtesead, mille mõõtetäpsus ja tundlikkus oleks piisav, et seda usaldusväärselt kasutada elektrivälja mõõtmiseks.

## 2 Teoreetilised alused

Atmosfääri elektriväli on oluline komponent Maa atmosfääri elektriliste ja elektromagnetiliste protsesside mõistmisel. Selle uurimine aitab paremini mõista ilmaprotsesse ning ennustada täpsemalt ilma. Samuti annab atmosfääri elektrivälja mõõtmine teadmisi äikesetormide tekkemehhanismidest ning elektrilistest käitumistest äikesepilve sees. Äikesetormide hoiatussüsteemid on eriti kriitilised lennunduses ning energiasektoris, kus varajane teavitatus võib hoida ära katastroofilise olukorra.

Elektriväljade mõõtmiseks on leitud mitmeid meetodeid, millel on omad tugevused ja nõrkused. Käesolevas peatükis antakse esmalt ülevaade atmosfääri elektrivälja olemusest, seejärel tutvustatakse elektrivälja mõõtmise erinevaid meetodeid ning lõpetuseks keskendutakse *field mill* mõõteseadme teoreetilistele aspektidele.

### 2.1 Elektriväli atmosfääris

Maa atmosfääris esineb pidev elektriväli, mis on tingitud laengute jaotumisest atmosfääri erinevates kihtides. Ilusa ilma ja tasase maastiku tingimustes muutub elektriline potentsiaal atmosfääris keskmiselt umbes 100 V iga meetri kohta, mis vastab elektrivälja tugevusele 100 V/m maapinna lähedal [1]. Sellistes rahulikes oludes on atmosfääri elektrivälja peamine allikas Maa ionosfäär [2].

Ionosfäär on atmosfääri kõrgeim kiht, mis ulatub 50 kilomeetrist kuni 400 kilomeetritni maapinnast. Selles piirkonnas põhjustab päikesekiirguse ioniseeritud mõjud elektronide ja ionide tekke, mistõttu on sealsete laetud osakeste kontsentratsioon oluliselt kõrgem kui atmosfääri alumistes kihtides [3]. Ioniseeritud osakeste rohkus muudab ionosfääri positiivselt laetud kihiks. Ionosfääri võib ette kujutada nagu positiivselt laetud sfäärilist elektroodi, mis on vastukaaluks negatiivselt laetud maapinnale. Tekib püsiv elektriväli, mida tuntakse kui ilusa ilma elektriväli. Antud elektriväli on siiski väga tundlik ja seda mõjutavad mitmesugused atmosfääris levivad laengukandjad, näiteks tolmu või suits [2].

Atmosfääri elektrivälja tugevus suureneb oluliselt, kui tekivad äikesepilved. Sellisel juhul koonduvad negatiivsed laengud pilve alumistesse kihtidesse, sama ajal, kui pilve ülaosad võivad olla positiivselt laetud. Laengu kasvamisel tekib niinimetatud halva ilma elektriväli, mille tugevus võib olla mitmetes kordades suurem kui ilusa ilma elektriväli. Selline halva ilma elektriväli tekitab olukorra, millal atmosfääris ei suudeta enam positiivseid ja negatiivseid laenguid üksteisest eemal hoida. Erimärgilised laengud tõmbuvad kiiresti kokku ja toimub energia vabanemine ehk välg. Maapinna lähedal võib halva ilma korral elektrivälja tugevus olla suurem kui 10 000 V/m. [2]

On määratud, et kui elektrivälja tugevus atmosfääris ületab kriitilise piiri, hinnangulisel umbes 2000 V/m, suureneb oluliselt välgunoole tekkimise tõenäosus. Siiski ei garanteeri suur elektrivälja tugevus välgunoole tekkimist, vaid viitab üksnes sellele, et tingimused välgunoole kujunemiseks on soodsad. [2]

## 2.2 Elektrivälja mõõtmise meetodid

Elektriväljade mõistmine ja täpne mõõtmine on oluline erinevates teaduse ja tehnika valdkondades. Elektrivälja mõõtmised annavad olulist informatsiooni laengujaotuse analüüsimiseks, väljade muutuste tuvastamiseks ning elektrisüsteemide ohutuse ja tõhususe tagamiseks. Leidub erinevaid elektrivälja tugevuse mõõtmise meetodeid ning igal ühel neist on omad füüsilised põhimõtted ja sobivus konkreetse rakendusega. Antud alapeatükis antakse ülevaade neljast enimlevinud meetodist, analüüsides nende tööpõhimõtteid, eeliseid ja puudusi ning sobituvust erinevate mõõtmiste teostamiseks.

### 2.2.1 *Field mill* meetod

*Field mill* mõõteseade on kasutuses staatilise elektrivälja mõõteseadmena ja seda on enamasti rakendatud äikesetormidega seotud atmosfääri elektriväljade mõõtmiseks. Antud mõõteseade on kasutusel nii äikesepilve laengute uurimiseks kui ka ohuhoiatussüsteemides, mis teavitaks potentsiaalse äikesetormi tekkimisest.

*Field mill* mõõteseade koosneb paigal olevast elektroodist, mis on avatud langevale elektriväljale, ning mida varjestab ja paljastab perioodiliselt pöörlev maandatud elektrood. Paigal olev elektrood omandab laengu, kui see on avatud langevale elektriväljale, ning kaotab laengu, kui see on varjestatud. Elektroodilt saadud signaal muudetakse sinusoidaalseks ning sellise signaali amplituudi saab kasutada elektrivälja arvutamiseks. [4]

Antud meetod võimaldab mõõta staatilist ja aeglaselt muutuvat elektrivälja ning saada reaaliajase mõõtmistulemusi. Seega suudab mõõteseade usaldusväärselt mõõta atmosfääri elektrivälja ning on kasutatav ka kõrgepingelaborites pidevate või aeglaselt muutuvate elektriväljade mõõtmisel. Siiski ei ole *field mill* kontseptsioon hea olukorras, kus on kiiresti muutuvad elektriväljad. Samuti teevad mõõteseadme ehitamise keeruliseks pöörlevad mehhanismid ning üldine mehaaniline keerukus.

### 2.2.2 Katselaengu meetod

Katselaengu meetod on kontseptuaalne lähenemine, mille käigus sisestatakse elektrivälja teadaolev väike katselaeng ning mõõdetakse sellele mõjuvat jõudu. Seejärel määratakse valemi

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (1)$$

abil elektrivälja tugevus  $E$ . [5]

Teoreetiliselt on selline mõõtmine võimalik, kuid praktikas kasutatakse sellist mõõtmist harva. Katselaengu olemasolu võib häirida algvälja ning mikromõõtmeliste laengutele mõjuva jõu täpne mõõtmine osutub keerukaks protsessiks.

Seda meetodi kasutatakse siiski haridusasutustes ja praktikalaborites, et visualiseerida laengute ja elektrivälja vastastikmõjusid.

### 2.2.3 Elektrooptiline meetod

Elektrooptiline meetod põhineb Pockelsi efektil, kus teatud mittetsentrosümmeetrilistel kristallidel, nagu liitiumniobaat või kaaliumdivesinikfosfaat, toimub murdumisnäitaja muutus, mis on võrdeline neile rakendatud elektrivälja tugevusega. Polariseeritud valgus läbib elektriväljas oleva kristalli ning indutseeritud kaksikmurdumine muudab valguse polarisatsiooni. Eelmainitud muutuseid analüüsides saab kindaks määrata elektrivälja suuruse ja suuna. [6]

Antud meetod pakub kõrget tundlikust ja kiiret reageerimist, mis sobib hästi kõrgsageduslike elektriväljade ja siirdeprotsesside mõõtmiseks. Elektrooptiline meetod on hea lahendus tugevate elektromagnetiliste häiretega keskkonnas.

Samas nõuab elektrooptiline meetod täpset seadistamist ja kalibreerimist. Samuti on eelnevalt mainitud kristallid ja nende optilised komponendid üpriski kallid.

### 2.2.4 Induktsiooni meetod

Induktsiooni meetodi kasutatakse ajas muutuvate elektriväljade mõõtmiseks, eriti rakendustes, mis hõlmavad elektromagnetlaineid või impulssenergiüsteeme. Antud meetod põhineb Faraday elektromagnetilise induktsiooni seadusel, mis väidab, et muutuv magnetvoog läbi juhtiva ahela indutseerib ahelas elektromotoorjõu. Praktikas asetatakse juhtiv ahel või mähis muutuva magnetvälja lähedusse ja mõõdetakse indutseeritud pinget. [7]

Induktsiooni meetod on eriti kasulik siirdeprotsesside, näiteks äikese välkude, raadiolainekiirguste või elektromagnetiliste impulsside, jäädvustamiseks. Antud meetod töötab laia sagedusvahemiku ulatuses ning võimaldab teostada kontaktivaba mõõtmist.

Siiski suudab induktsiooni meetod mõõta ainult dünaamilisi elektrivälju ning staatilise elektrivälja mõõtmiseks seda kasutada ei saa. Lisaks nõuab antud meetod elektroonika varjestamist ja hoolikat kalibreerimist. [8]

## 2.3 *Field mill* teoreetilised alused

Gaussi seadus sätestab, et elektrivälja voog läbi suletud pinna on võrdne selle pinna sees oleva kogulaengu ja elektrilise konstandi jagatisega, st

$$\oint_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}. \quad (2)$$

Oletame nüüd, et maandatud, elektrit juhtiv andurplaat pindalaga  $A$  puutub kokku ajas muutuva ühtlase elektriväljaga  $E$ . Kasutades valemit (2), saab plaadile indutseeritud laengu  $q$  väljendada kui [9]

$$q = \epsilon_0 EA. \quad (3)$$

Seega saab elektrivälja tugevust määrata otse, mõõtes andurplaadile indutseeritud laengut. Selline mõõtmine ei anna kõige täpsemat tulemust, sest plaadi kokkupuude teiste elektrit juhtivate esemetega võib põhjustada indutseeritud laengu kadu [10]. Täpsemate mõõtmiste teostamiseks on seetõttu vaja kasutada muud mõõtemetodit.

Eelnevas peatükis sai mainitud *field mill* kontseptsioon, kus andurplaati varjab ja paljastab perioodiliselt pöörlev maandatud tiivik. See tähendab, et vastavalt tiiviku labade arvule on andurplaat ühe pöörde jooksul täielikult kaetud sama arv kordi.

Tiiviku perioodiline pöörlemine tekitab olukorra, kus nii anduri pindala  $A(t)$ , millele indutseeritakse laeng  $q$ , kui ka andurplaadile indutseeritud laeng  $q(t)$  ise muutuvad ajas lineaarselt. Seega hakkab andurplaatidega ühendatud takistusest  $R$  voolama ruutlaineline vool. [9]

Kui elektriväli  $E$  on konstantne, siis voolutugevus  $i(t)$  on määratud kui [9]

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = \varepsilon_0 E \frac{dA(t)}{dt}. \quad (4)$$

Oletame, et kahe labaga tiivik teeb ühe pöörde perioodiga  $T$  ning perioodi alguses on andurplaadid täielikult kaetud. See tähendab, et ajahetkel  $T/4$  on andurplaadid täielikult avatud ehk indutseeritud pindala  $A$  on maksimaalne. Seega saab ajas muutuva pindala  $A(t)$  kirjutada kui

$$A(t) = \frac{4A}{T} \cdot t, \quad (5)$$

kus  $0 \leq t \leq T/4$ . Integreerides valemit (4) eelmainitud vahemikus, on tulemuseks

$$I = \frac{4}{T} \varepsilon_0 A E. \quad (6)$$

Teades, et nurksagedus  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  ja asendades see valemisse (6), saame [9]

$$I = \frac{2\omega}{\pi} \varepsilon_0 A E. \quad (7)$$

Saadud tulemus näitab, et voolutugevus ja takisti pinge muutuvad proportsionaalselt elektrivälja tugevusega. Samas oleneb voolutugevus ja pinge amplituud ka nurksagedusest ning muutused tiiviku pöörlemiskiiruses toovad kaasa erineva amplituudi. Et muuta eelnevalt mainitud amplituudid sõltumatuks nurksagedusest saab takistuse  $R$  asendada RC ahelaga. Sellisel juhul tekitab voolutugevus  $i(t)$  sinusoidaalse pinge  $V_{RC}(t)$  takistusel  $R$ . [9]

Lahendades esimese järgu RC ahela diferentsiaalvõrrandi

$$i(t) = C \frac{dv_c(t)}{dt} + \frac{v_c(t)}{R}, \quad (8)$$

kus  $0 \leq t \leq T/4$ , on tulemuseks sinusoidaalne pinge  $V_{RC}(t)$ , mille amplituudi  $V_{RC}$  saab kätte arvutades  $V_{RC}(t)$  kohal  $t = T/4$ , kui [9]

$$V_{RC} = \frac{2\omega}{\pi} \varepsilon_0 A E R \cdot \tanh\left(\frac{\pi}{2\omega RC}\right). \quad (9)$$

Kui  $\omega RC \gg 1$ , siis

$$\tanh\left(\frac{\pi}{2\omega RC}\right) \approx \frac{\pi}{2\omega RC}. \quad (10)$$

Seega saab lihtsustada valemi (9) kujule, kus pinge amplituud muutub nurksagedusest sõltumatuks [9]

$$V_{RC} \cong \frac{\varepsilon_0 A E}{C}. \quad (11)$$

Tulemuseks on avaldis signaali amplituudi  $V_{RC}$  jaoks, mis on proportsionaalne elektrivälja tugevusega.

### 3 Anduri prototüüp

Anduri prototüübi valmistamine oli hea võimalus katsetada projekti kontseptsiooni ja leida kitsaskohad, mida saaks lõplikus versioonis vältida. Antud projektis oli prototüübi eesmärgiks tõestada, et seade suudab mõõta elektrivälja ning anda välja signaali, mida oleks võimalik kasutada elektrivälja umbkaudseks arvutamiseks.

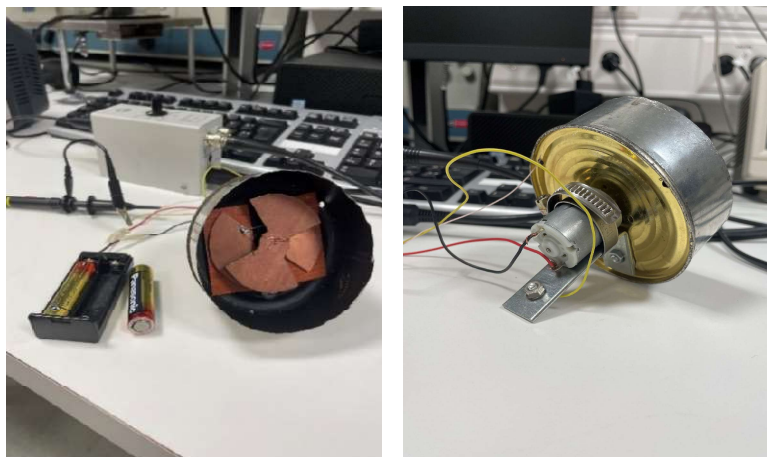
#### 3.1 Anduri prototüübi ehitamine

Käesolevas töös oli prototüübi disain minimaalne ja sisaldas ainult hädavajalikke komponente, millega oli võimalik mõõta umbkaudne elektriväli. Prototüübi ehitamisel oli oluline saada prototüüp võimalikult lihtsalt ja kiiresti valmis. Ehituskvaliteedile ei pööratud liiga palju rõhku ning mitmed saagimised ja lõikamised sooritati üsna ebatäpselt. Eesmärgiks oli tõestada, et *field mill* mõõteseadme kontseptsioon töötaks.

Prototüübi ehitamine algas kõrgest plekkpurgist läbimõõduga 8 cm, mille sügavust vähendati 3,5 cm peale. Plekkpurgi põhja kinnitati vasest andurplaadid, mis asetati sümmeetriliselt keskpunkti suhtes (Joonis 1). Andurplaatide kogupindala oli 10,7 cm<sup>2</sup>. Andurplaatide ja plekkpurgi vahele liimiti vineerid, mis toimisid kui isolaatorid. Viimaks paigaldati andurplaatide kohale vasest propeller, umbes 1 cm kaugusele, ning see oli piisavalt suur, et katta mõlemad andurplaadid korraga.

Propeller kinnitus alalisvoolu mikromootori võlli külge. Mootori võll oli pronksist pukside peal ning mootori korpuse ja võlli vahel tekkis elektriline kontakt. Eelmainitud asjaolu oli vägagi kasulik antud projektis, sest maandatud propelleri saamiseks tuli maandada ainult mootori korpus. Hiljem selgus, et mootori ja propelleri vahel ei tekkinud korralikku kontakti ning propelleri maandamiseks seoti propelleri ja mootori võlli ümber vasktraat. Kasutatud mikromootori toitepinge vahemik oli 2,4 V kuni 6 V ning seda toideti kahe 1,5 V patareiga. Sellise pingega korral saadi andurplaatidelt signaal sagedusega 180 Hz, mis oli sobiv *field mill* seadmele.

Teisele poole plekkpurki kruviti metallist täisnurkne kronstein, mille külge kinnitati mootor. Kronstein oli elektrilises ühenduses nii mootori korpuse kui ka plekkpurgiga ning sinna külge oli hea kinnitada maandusjuhe. Allpool on näha prototüüpi eest- ja tagantvaates (Joonis 1).



Joonis 1. Prototüüp eest- ja tagantvaates.

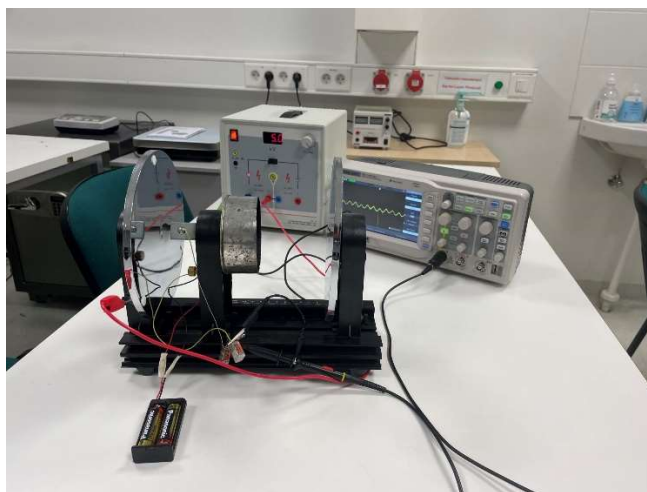
### 3.2 Anduri prototüübi testimine

Prototüübi testimisel kasutati staatilise elektrivälja tekitamiseks reguleeritava pingega pingesallikat (0 kuni 10 kV), mille väljundid ühendati kahe metallplaadiga. Antud olukord meenutab kondensaatorit ning kahe plaadi vahelist homogeenset elektrivälja oli võimalik arvutada valemiga

$$E = \frac{U}{d}, \quad (12)$$

kus  $U$  on pinge kondensaatori plaatide vahel ning  $d$  kondensaatori plaatide kaugus üksteisest [11]. Eelmainitud valemit saab kasutada homogeense elektrivälja arvutamiseks, kuid antud prototüübi katsetamisel asetati mõõteseade kondensaatorplaatide vahele ning elektrivälja metallplaatide vahel ei olnud enam homogeenne (Joonis 2). Nagu mainitud, siis prototüübi eesmärgiks oli saada ligilähedased mõõtmistulemused tegelikkusega ning eesmärgi täitmiseks kasutati siiski homogeense elektrivälja arvutamise valemit.

Prototüübilt õige signaali kättesaamiseks lisati andurplaatidelt pärineva juhtme ja maanduse vahele RC ahel. Kuna signaali mõõtmiseks kasutati ostsiloskoopi, mille sisendtakistus oli  $1 \text{ M}\Omega$ , siis oli vajalik lisada ainult  $11 \text{ nF}$  mahtuvusega kondensaator. Ostsiloskoobi otsad ühendati enne ja peale kondensaatori ja kätte saadud signaali amplituudi kasutati valemis (11), et arvutada elektrivälja tugevus. Joonis 2 illustreerib prototüübi katsetamise ülesehitust.

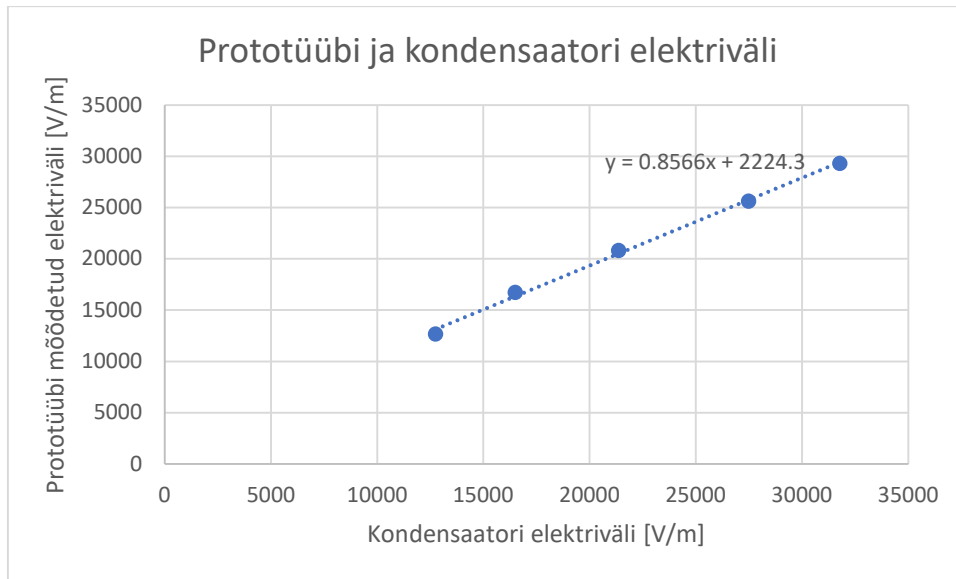


Joonis 2. Prototüübi katsetamine kondensaatori vahelises elektriväljas. Taustal on kõrgepinge allikas ja ostsiloskoop.

Teostati viis mõõtmist erinevate elektriväljade korral. Kasutades valemit (11) on elektrilise konstandi väärtuseks  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ A}\cdot\text{s} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ , pindala  $A = 1,068 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$  ja kondensaatori mahtuvus  $C = 11 \cdot 10^{-9} \text{ F}$ . Valemi (11) teisendamisel kujule

$$E = \frac{V_{RC}C}{\epsilon_0 A} \quad (13)$$

oli võimalik arvutada elektrivälja tugevus. Allpool on näha graafik (Joonis 3), mis näitab nii prototüübi mõõdetud elektrivälja kui ka teoreetilist kondensaatori elektrivälja.



Joonis 3. Prototüübi mõõtetulemuste võrdlus kondensaatori elektrivälja tugevusega.

Mõõtmistest (Joonis 3) saab järeldada, et prototüüp täitis oma eesmärgi ning see oli suuteline mõõtma ligikaudset elektrivälja tugevust. Graafikul märgitud lineaarse regressioonisirge tõus näitab, et prototüübi mõõtetulemused olid väiksemad kui teoreetiliselt arvatatud elektriväljad. Prototüüp mõõtis siiski elektrivälja tugevust edukalt, sest mõõdetud elektrivälja saamiseks kasutati ligikaudseid suuruseid ning signaali amplituudi mõõtmine toimus umbkaudselt ostsiloskoobi ekraanilt. Samuti ei olnud kondensaatori elektriväli homogeenne ja reaalsuses oli tegelik elektriväli nõrgem. Prototüüp täitis oma eesmärgi ning suutis umbkaudselt mõõta elektrivälja tugevust.

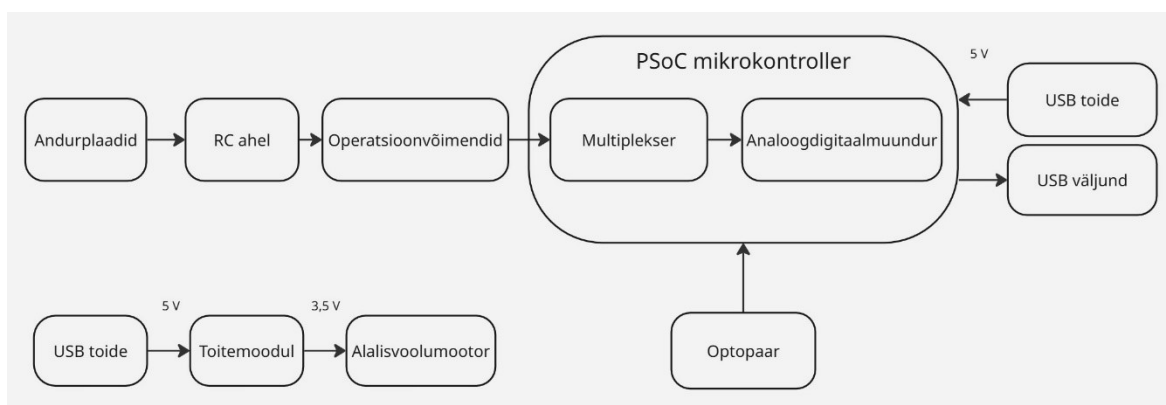
## 4 *Field mill* mõõteseade

*Field mill* mõõteseade töötab andurplaatide vahelduval varjestamisel, saades perioodilist signaali vastavalt elektrivälja tugevusele. Nimetatud signaal läbib esmalt RC ahela, mis muudab elektrivälja tugevuse sõltumatuks pöörleva tiiviku nurksagedusest. Seejärel suunatakse signaal operatsioonvõimenditesse, kus kolme jadamisi võimendusastmega võimendatakse madala amplituudiga signaal. Iga võimendi väljund on ühendatud *PSoC* mikrokontrolleri sisendiga. Töödeldud analoogsignaali suunatakse multiplekserisse, kust signaalid sisestatakse vaheldumisi analoog-digitaalmuundurisse. *PSoC* mikrokontroller loeb analoog-digitaalmuunduri mõõteväärtused ja arvutab algselt mõõdetud signaali amplituudi väärtuse. Arvutatud elektrivälja tugevuse väljastab mikrokontroller USB juhtme abil arvuti ekraanile. Antud lõputöö raames kasutati *PuTTY* terminalirakendust, et visualiseerida *PSoC* mikrokontrolleri andmesidepordi edastatud andmed.

Andurplaatide perioodilise varjestamise tagab alalisvoolu mikromootor, mis paneb pöörlema maandatud propelleri. Mootor saab toite eraldiseisvast toitemoodulist väljundpingega 3,5 V.

Elektrivälja polaarsuse määramiseks ja mõõtmiste ajastamiseks on kasutusel optopaar. Optopaar väljastab digitaalset signaali, mille tugevus sõltub propelleri asukohast. Digitaalne signaal jõuab *PSoC* mikrokontrolleri sisendisse.

Allpool olev plokkskeem (Joonis 4) illustreerib antud bakalaureuse lõputöös valminud *field mill* mõõteseadme ülesehitust.



Joonis 4. *Field mill* mõõteseadme plokkskeem.

### 4.1 *PSoC* mikrokontroller ja *PSoC Creator*

Antud töös oli kasutusel *Cypress Semiconductor* poolt välja töötatud *CY8CKIT-059 PSoC 5LP Prototyping Kit* arendusplaat. *PSoC 5LP* on tööstusharu kõige integreeritud *SoC (System-on-Chip)*, mis ühendab ühes kiibis ülitäpseid ja programmeeritavaid analoog- ja digitaalmoduleid *ARM Cortex-M3* protsessoriga [12].

Mikrokontrolleriga kaasneb allalaetav arenduskeskkond *PSoC Creator*, mis on mõeldud *PSoC* mikrokontrollerite programmeerimiseks. Programmis saab visuaalselt luua projekte, lohistades ja

paigutades komponente arvuti ekraanile vastavalt vajadusele. Süsteemi loomiseks on võimalik konfigurereida komponendid omal äranägemisel. Iga komponendi kohta on olemas andmeleht, mis kirjeldab komponendi eripärasid. Samuti pakub *PSoC Creator* mitmeid näidisprogramme, mis on kasuks alustavale kasutajale.

Programmeerimine *PSoC Creator* tarkvaras toimub C-programmeerimiskeeles. *PSoC Creator* pakub võimalust automaatseks koodigeneratsiooniks vastavalt valitud komponentidele ja nende seadistusele. Koodigeneratsioon kiirendab arenduse protsessi ning arendaja ei pea keskenduma lihtkaskluste otsimisele. Antud töös kasutati koodigeneratsiooni *PSoC Creator*-i käskluste õppimiseks ning lihtsamate programmijuppide testimiseks.

## 4.2 Signaali töötlemine

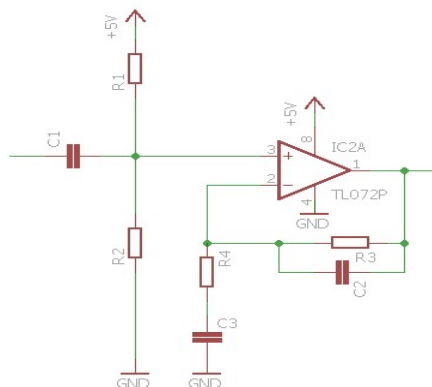
Töös kasutatav mikrokontroller *PSoC 5LP* sisaldab kahte analoog-digitaalmuundurit (*ADC*), mis suudavad lugeda 12-bitise resolutsiooniga signaali mõõtepiirkonnas 0 V kuni 5 V. See tähendab, et hüpe ühelt mõõtenivoolt teisele on umbes 1,2 mV. Kasutades valemit (11) on võimalik arvutada teoreetiline pinge amplituud erinevate elektriväljade korral. Arvutades pinge amplituud 100 V/m elektrivälja korral, mis peaks ilmema ilusa ilmaga, siis saame amplituudiks umbes 0,1 mV. On näha, et mõõtmine ei tuleks täpne ning täpsuse suurendamiseks oleks vaja võimendada signaali.

Signaali võimendamiseks koostati kolmeastmeline võimendus. Võimenditeks valiti kaks operatsioonvõimendit *TL072IP*, mis sisaldasid ühes mikroskeemis kahte operatsioonvõimendit. Võimendid said ühepoolarse positiivse 4,7 V toite, mis oli *PSoC* mikrokontrolleri toite väljundi pinge. Need võimendid olid kasutusel mitteinverteerivas olekus, mis tähendas, et väljundsignaal oli samas faasis sisendsignaaliga.

Võttes fookusesse ühe võimendusastme (Joonis 5), saab võimendi võimendusteguri arvutada valemiga

$$A = 1 + \frac{R_f}{R}, \quad (14)$$

kus  $A$  on võimendustegur,  $R_f$  on tagasisideahela takistus ning  $R$  on võimendi negatiivsele terminali ja maanduse vahele ühendatud takistus [13]. Antud töös valiti võimendi teoreetiliseks võimendusteguriks kümme ning  $R_f$  ja  $R$  takistused on joonisel 5 vastavalt  $R_3$  ja  $R_4$ .



Joonis 5. Ühe võimendusastme ülesehitus.

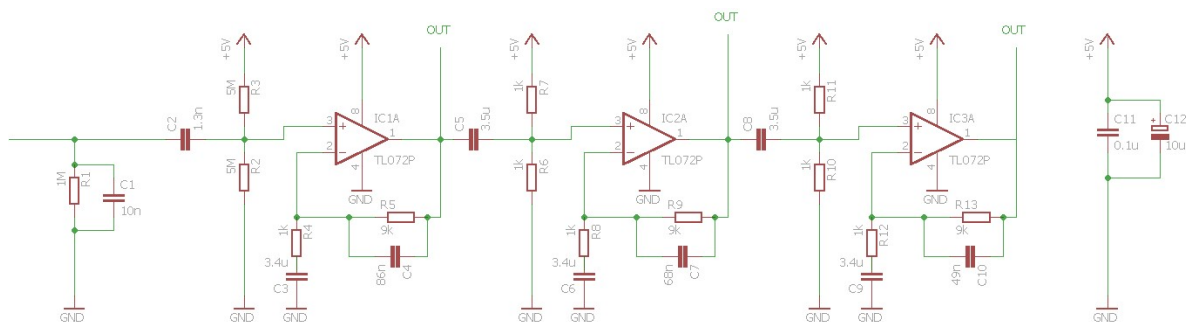
Käesolevas töös oli algsignaalsiks väikese amplituudiga signaal, mis enamasti jäi alla millivoldi. Sellise nõrga signaali võimendamisel olid olulisel kohal mürad, mida tekitasid nii madal- kui kõrgsagedusallikad. Kohati võis müra olla isegi suurem kui signaal ise. Seepärast olid selles projektis kasutusel passiivsed madal- ja kõrgpääsfiltrid, mis surusid maha võimalikult palju madal- ja kõrgsageduslikku müra. Filtrite piirsageduste arvutamiseks kasutati valemit

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (15)$$

kus  $f_c$  on piirsageduspunkt, millal signaali on võimendatud 70,7 % ehk -3 dB [14]. Antud töös oli kasuliku signaali sageduseks 200 Hz ning piirsagedused valiti sellest lähtuvalt. Kõrgpääsfiltrite piirsageduseks valiti 50 Hz, mis saadi kondensaatori C3 lisamisega (Joonis 5). Madalpääsfiltrite piirsagedused jäid 250 Hz juurde, kuid filtrite piirsagedused varieerusid olenevalt võimendusastmest. Madalpääsfiltri rakendamiseks lisati võimendi tagasiside takistusele C2 kondensaator (Joonis 5).

Signaalitöötlemise etapil kasutati ka nullnivoo tõstmist poole toitepinge peale takistustega R1 ja R2. See oli oluline samm, sest algse signaali võimendamisel oleks võimendatud ka negatiivset pinget. PSoc mikrokontrollerile ei ole soovituslik anda sisendisse suuremat negatiivset pinget kui -0,5 V. Pinged selle väärtuse juures võivad hakata kahjustama arendusplaati. Viimaks loodi takistuste R1 ja R2 ning kondensaatori C1 abil kõrgpääsfilter (Joonis 5), mis ühtlasi sidus ka järgneva võimendusastme töörežiimi lahti eelmiselt astmest.

Võttes kokku kogu elektriskeemi (Joonis 6) siis andurplaatidelt tulev signaal läbis kõigepealt RC ahela. Seejärel läbis signaal kolm sarnast võimendusastet, mille väljundid olid ühendatud PSoc mikrokontrolleri sisenditesse. Eelnevalt kirjeldatud võimendusastme skeem oli kasutusel kõigil kolmel võimendusastmel, kuid komponentide väärtused võisid võimendusastmetel erineda. Lisaks olid signaalitöötlusahela toitepingele rööbiti ühendatud keraamiline ja elektrolüüt-kondensaator, mis vähendasid toiteallikast pärinevat müra.



Joonis 6. Signaalitöötlus elektroonikapladi skeem.

## 4.3 Suuremate komponentide valmistamine ja testimine

### 4.3.1 Signaalivõimendi

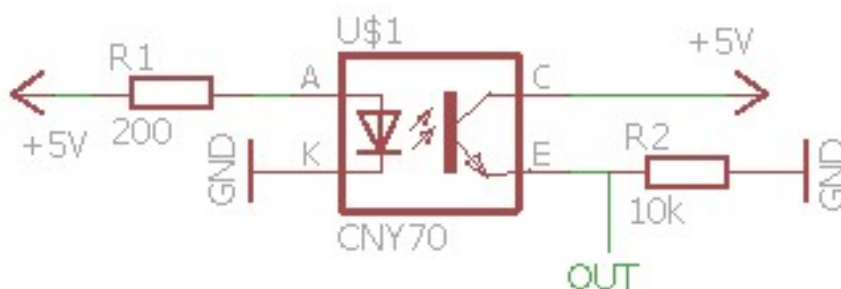
Suuremahuliseks projektiks kujunes signaalivõimendi valmistamine ja testimine. Palju aega kulus trükkplaadi valmistamiseks, jootes seda mitmeid kordi ümber. Eelnevalt kirjeldatud signaalitöötluse skeem oli lõplikult kokku joodetud versioon.

Elektroonikaplaadi korrektses töötamises sai kindel olla ainult läbi testimise. Võimendite testimiseks kasutati signaaligeneraatorit, mis andis signaali esimese võimendi sisendisse. Ostsiloskoobiga jälgiti kõiki kolme võimendit ning mõõtmistulemused jäädvustati suures mõõtevahemikus.

### 4.3.2 Optopaar

Antud töö raames oli optopaari ülesandeks määrata elektrivälja polaarsus ning ajastada mõõtmiste teostamine. Nimetatud funktsioonide teostamiseks rakendati CNY70 peegeldusega optopaari, mis andis kõrgendatud digitaalse signaali ajahetkel, kui propeller paiknes anduri kohal. Selle signaali järgi oli võimalik kindlaks teha propelleri asukoht.

Optopaarile joodeti valmis eraldi elektriskeem (Joonis 7), mis kinnitati mõõteseadme korpuse külge. Kasutatud optopaar koosnes infrapuna kiirgajast ning fototransistorist [15]. Infrapuna kiirgaja sai 4,7 V toite mikrokontrollerilt, mis läbis veel enne optopaarini jõudmist jadamisi paigutatud 200  $\Omega$  takistuse. Fototransistor sai ka 4,7 V toite mikrokontrolleri toiteväljundist, kuid enne fototransistori maandust paigutati 10 k $\Omega$  takistus. Väljundsignaal võeti enne takistust ning see viidi PSoC mikrokontrolleri sisendisse.



Joonis 7. Optopaari elektriskeem.

Optopaari väljundsignaali tugevus sõltus märkimisväärselt peegeldava pinna omadustest, eelkõige selle võimest infrapunakiirgust tagasi peegeldada. Samuti oli oluline peegeldava materjali kaugus andurist. Seega oli edasise süsteemi arendamiseks vajalik määrata optopaari väljundsignaali tugevus tingimustes, kus oli teada propelleri materjal ning selle kaugus andurist.

Testides väljundsignaali tugevust vasest propelleri korral, mis oli optopaarist kaugusel 1,5 cm, saadi signaali tugevuseks 0,6 V kuni 0,7 V. Samuti selgus, et optopaar ei tohi olla otsese päikesevalguse käes.

#### 4.4 *Field mill* mõõteseadme ehitamine

Käesolevas töös valmistatud *field mill* elektrivälja mõõteseadme kasutas kogemusi prototüübi ehitamisest, millele lisandus täpsus ja korrektsus. Kõik puurimised, liimimised, lõikamised ja muud tegevused olid eelnevalt läbimõeldud ja täpselt mõõdetud. Samuti omas mõõteseadme lisa komponente, mis olid vajalikud korraliku mõõteseadme valmimiseks. Komponendid, mis mängisid suuremat rolli ja olid keerukamad, näiteks signaalitöötluuse elektroonikaplaat ning optopaar, said ka eelnevalt läbi katsetatud, et veenduda nende töökindluses. Hilisemates etappides oleks nende korrastamine olnud ajakulukas ja parandustööde teostamine oleks toimunud raskesti ligipääsetavates kohtades.

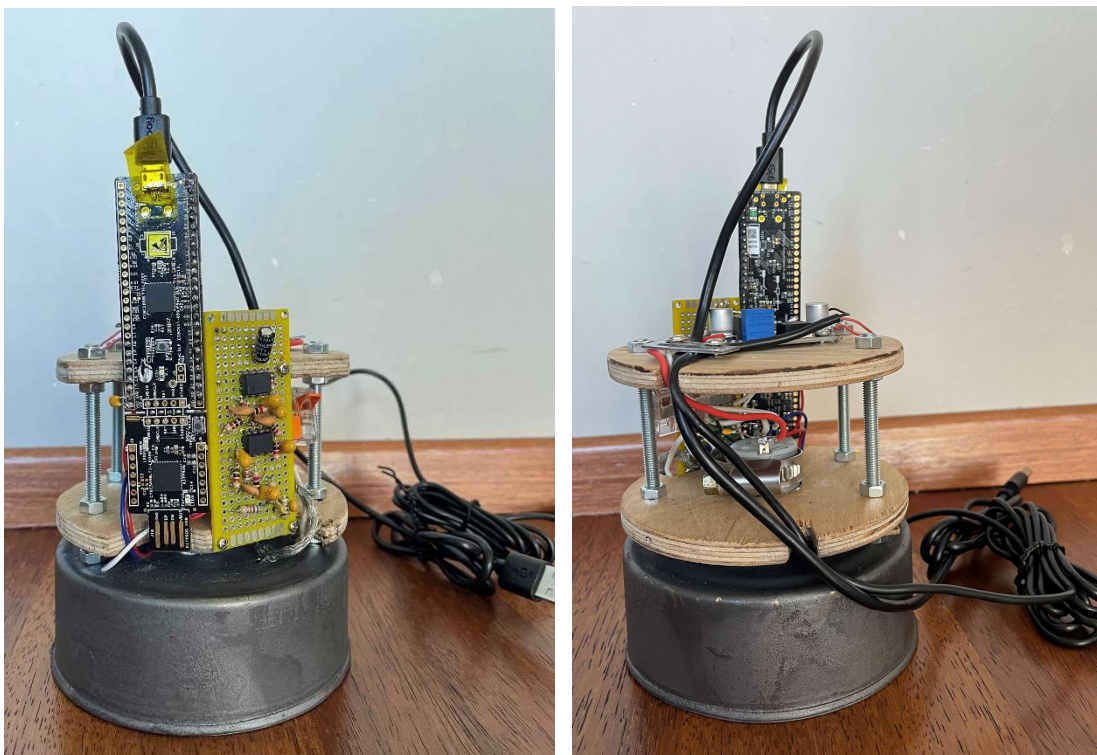
*Field mill* mõõteseadme ehitamist alustati anduri poolt (Joonis 8), kus paikneksid andurplaadid ja propeller. Võrreldes prototüübiga valiti korpuseks suurema läbimõõduga plekist konservikarp, mille läbimõõt oli 10 cm. Valem (11) näitab, et mida suurema pindalaga andurplaadid on, seda suurem tuleb ka signaali amplituud. Suuremat signaali amplituudi oli kergem töödelda ning selle põhjuse pärast valiti nii suurem korpus kui ka suuremad andurplaadid. Vasest andurplaadid kogupindalaga 23,7 cm<sup>2</sup> asetati sarnaselt prototüübiga sümmeetriliselt keskpunkti suhtes. Plaatide ja korpuse vahele liimiti jällegi isoleerplaadid. Kahe andurplaadi vahele lisandus optopaar, mis kinnitati koos elektriskeemiga korpuse külge.



Joonis 8. *Field mill* mõõteseadme anduriosa põhikomponendid: andurplaadid, propeller ja optopaar.

Andurplaate hakkas perioodiliselt katma maandatud sümmeetriline propeller, mis oli kinnitatud alalisvoolu mikromootori võlli külge. Lõplikus mõõteseadmes kasutati samasugust alalisvoolu mootorit nagu prototüübis. Mootor liimiti plekkpurgi põhja külge. Toite sai mootor alalisvoolu toitemoodulist, mis muutis USB 5 V toite 3,5 V pingeks. Mootori toide eraldati teiste süsteemide toitest, sest mõõteseadme teised süsteemid said voolu *PSoC 5LP* mikrokontrollerilt ning see ei suuda välja anda piisavalt voolu mootori töötamiseks. Mootori toiteahela maandus ühendati siiski *PSoC* mikrokontrolleri maandusega. Selle lükke teostamisel vähenes oluliselt mõõtesignaalis esinev müra.

Komponentide kinnitamiseks toodi läbi plekkpurgi kolm pikka polti, mille abil loodi vineerplaatidest kaks eri tasandit (Joonis 9). Mainitud tasandite külge kinnitati mootori toitemoodul, signaalitöötlus elektroonikaplaat ning *PSoC 5LP* mikrokontroller. Viimased kaks ühendati ka omavahel. Seejärel joodeti mikrokontrolleri külge kõigi kolme võimendusastme väljundid ning ka optopaari väljund. Kogu mõõteseadme ühtseks maandamiseks ühendati erinevate komponentide maandused kokku.



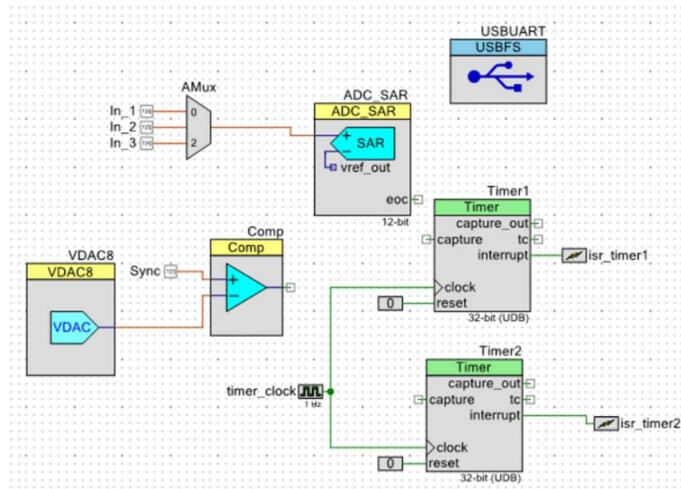
Joonis 9. Field mill mõõteseadme elektrooniline osa, mis hõlmab signaalitöötluse elektroonikaplaati, *PSoC* mikrokontrollerit, mikromootorit ja toitemoodulit.

Mõõteseadme varjestamiseks ümbritseti kogu seade plasttoruga, mis oli seestpoolt fooliumteibiga kaetud ning mille ühte otsa oli surutud plekkpurk. Plekkpurgi põhja kinnitati maandusjuhe, mis maandas kogu mõõteseadme ümber oleva korpuse. Mõõteseadme külje pealt ulatusid välja kaks juhet, üks oli mootori toitejuhe ning teine *PSoC* mikrokontrollerist pärinev toite ja andmeside juhe.

#### 4.5 *PSoC Creator*-is programmeerimine

*PSoC Creator*-is kirjutati valmis programm, mis võttis sisse nii signaalitöötlusplaadi kui ka optopaari signaali ning andis väljundiks *field mill* mõõteseadme mõõdetud elektrivälja tugevuse. *PSoC Creator*-is loodi eraldi projekt ning kogu riistvaralist loogikat kui ka programmeerimist alustati tühjalt lehelt.

Aken *TopDesign* oli mõeldud kogu süsteemi riistvara loogika graafiliseks ülesehitamiseks. Antud aknas sai komponente lisada, neid omavahel ühendada ja kalibreerida. Käesoleva projekti raames lisati sinna kolm erinevat ahelat ning USB moodul, mille kaudu oli võimalik väljundeid kuvada arvuti ekraanile (Joonis 10).



Joonis 10. TopDesign aken PSoC Creator programmis.

Esimeseks ahelaks oli optopaari signaali töötlemine. Digitaal-analoogmuundur (VDAC) andis välja signaali, mida võrreldi komparaatoris optopaarist tuleva signaaliga. Komparaatori olekut kasutati hiljem mõõtmiste ajastamiseks ja elektrivälja polaarsuse määramiseks. Teine ahel võttis sisse kolme võimendusastme signaalid ning teostas analoog-digitaalmuunduriga (ADC\_SAR) mõõtmised. Antud mikrokontroller sisaldas endas kahte analoog-digitaalmuundurit, mis ei olnud piisav kolme signaali töötlemiseks. Seega võeti kasutusel analoogmultiplekser (AMux), mis valis kordamööda analoog-digitaalmuundurisse minevate sisendsignaalide vahel. Kolmas ahel oli mõeldud mõõtmiste ajastamiseks ning selleks kasutati kahte taimerit. Üks nendest oli mõõtmise kestvust piirav taimer ning teine mõõtmiste vahelist ooteaega reguleeriv taimer. Neid sai kalibreerida vastavalt olukorrale.

Programmeerimine toimus PSoC Creator-i main.c failis ning kogu mõõtmeseadme programm oli koostatud ühe skriptina C-programmeerimiskeeles (Lisa 1). Skripti alguses seadistati kasutuses olevad riistvarakomponendid, sellele järgnes skripti peamine tööloogika ning kõige lõpus olid kasutatud abifunktsioonid.

Esimeses tööloogika astmes kontrollitakse, kas eelmainitud kolmanda ahela taimerid annavad õiguse mõõtmiste toimumiseks. Mõõtmiseks soodsal tingimusel käivitatakse analoog-digitaalmuundur ning programm jääb ootama hetke, millal propeller ei ole enam optopaari kohal. Antud hetke saabudes on andurplaatidelt tulev signaal lähenemas ühele ekstreemumile, mis positiivse elektrivälja korral on miinimumpunkt. Iga võimendi kohta tehakse seejärel ligikaudu 50 mõõtmist, mille tulemused salvestatakse kolme eraldi andmemassiivi. Kui propeller on liikunud optopaari kohale, ehk eelneva loogika järgi mõõtmisi enam toimuda ei tohi, mõõdetakse siiski veel järgnevad 15 tulemust. Nende viieteistkümne mõõtmise jooksul jäädvustatakse ka teine ekstreemumpunkt. Siiani on programm salvestanud kolmelt võimendilt saadud väärtused, mis sisaldavad endas kahte järjestikust ekstreemumi. Vaadates ühe võimendi andmemassiivi, võtab programm andmemassiivist kolm järjestikust mõõtetulemust ning arvutab nende keskmise. Sedasi kogu andmemassiivi ulatuses, saades umbkaudselt kakskümmend keskmist väärtust. Seejärel leitakse keskmiste väärtuste hulgast nii miinimum kui ka maksimum, mille abil arvutatakse signaali amplituud. Elektrivälja polaarsus pannakse paika amplituudi leidmise etapis, kus võrreldakse

mõõtetulemuste esimest ja viimast keskmist väärtust. Eelnevalt mainitud keskmistamine aitab paremini leida siinuslaine ekstreemumpunktid elimineerides samal ajal ka kõrgsagedusliku müra mõju.

Sedasi salvestatakse iga võimendi kohta viissada amplituudi väärtust ja mõõtmise lõppedes võetakse iga võimendi kohta viiesaja amplituudi keskmine. Antud keskmistamine peaks kompenseerima madalsagedusliku müra mõju. Nüüd on programmil olemas kolme võimendusastme keskmised signaali amplituudid mõõteperioodi jooksul ning need teisendatakse võimendustegurite abil algseteks signaali amplituudideks. Programm arvutab seejärel elektrivälja tugevused ning valib sobiva võimendusastme tulemuse, mis väljastatakse mikrokontrolleri väljundist. Kogu *main.c* fail on paigutatud töö lõppu (Lisa 1).

#### **4.6 *Field mill* testimine**

Uute tehnoloogiliste lahenduste ehitamisel ja väljatöötamisel ei piisa ainult teoreetilisest korrektsusest, et seade tööle hakkaks. Iga uus seade toob kaasa võimalikke tehnilisi ja keskkonnast tulenevaid probleeme, mida on võimalik avastada ainult süsteemi testimise käigus. Sarnane olukord oli käsil ka käesoleva lõputöö raames. *Field mill* mõõteseadme testimine oli üks olulisemaid protsesse antud projektis ning selle käigus tekkis mitmeid probleeme, millega ei oleks osatud arvestadagi.

Testimise käigus osutus suureks murekohaks liigne müra. Esimesel võimendusastmel ei olnud sellega probleeme, kuna juba algne kasutatav signaal oli piisvalt tugev, et müra tagaplaanile jätta. Probleemid tekkisid teise ja kolmanda võimendusastmega. Nendel astmetel oli kõrgsageduslik müra palju rohkem võimendatud ja kohati muutus tegelik signaal nähtamatuks. Lahenduseks oli kõigi kolme võimendusastme tagasisideahelasse paigaldada suuremad kondensaatorid, mis piiraks kõrgemaid sagedusi. See muutis ka suurel määral võimendustegureid, mis algselt pidid jääma kümne juurde, kuid muudatusi teostades langesid need seitsme- kuni kaheksakordse võimenduse lähedale. Samuti paigaldati nii mootori kui ka signaalitöötuse elektroonikaplaadi toite- ja maandusklemmide vahele 0.1  $\mu$ F keraamiline kondensaator, mis vähendaks toitest tingitud müra. Suur muudatus kõrgsagedusliku müra vähendamiseks oli ka mootori maanduse ühendamine ülejäänud süsteemiga.

Elektroonikaseadmete töökindluses esinesid samuti probleemid, mis olid eelkõige tingitud nõrga jootmiskvaliteedi tulemusel. Mõned ühendused oli halvas kontaktis ning propelleri pöörlemisest tingitud vibratsioonid tekitasid häireid või elektriühenduste katkemise. Selle tulemusena vaadati kõik jooted hoolikalt üle ning tehti vajaliku korrektureid.

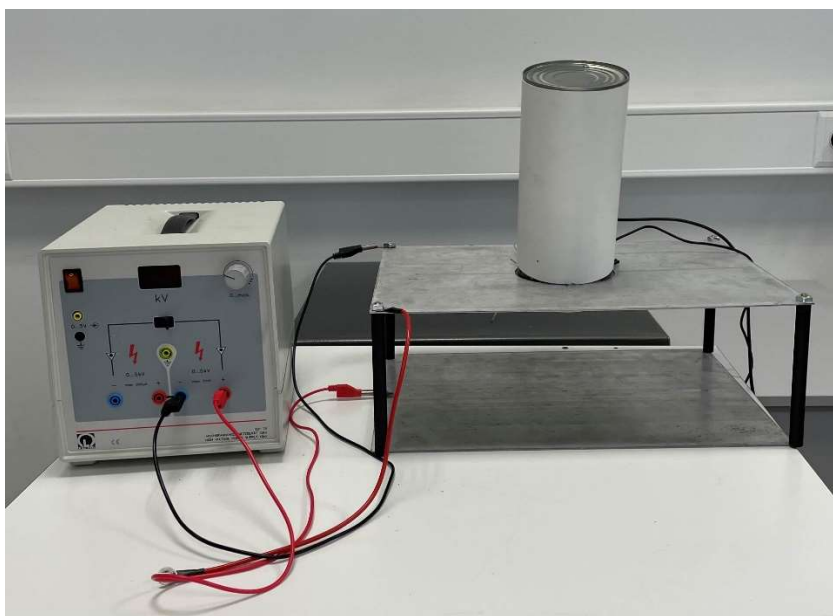
Mitmeid tõrkeid esines ka programmi kirjutamisel. Esialgselt sai valmis kirjutatud programm, mis tundus loogiline, kuid mõõteseadme tööle panemisel esinesid vead peaaegu igas programmi faasis. Probleeme hakati süsteemselt lahendama, analüüsides iga väikese programmijupi saadud tulemust. See aeganõudev protsess oli vägagi kasulik, sest ilmnisid ootamatud probleemid, millest üks nõudis kogu programmi loogika muutmist.

Nimelt oli programmi esimene versioon sisaldanud loogikat, mis alustas mõõtmist siis, kui propeller oli optopaari kohal. Optopaari ja propelleri asetust vaadates pidi süsteem korrektselt mõõtma siinuslaine harja, kuid testimise käigus selgus, et mõõtetulemused algavad peale ekstreemumi. Tegu oli positiivse faasinihkega, mis tähendas, et laine hari saabus enne mõõtmiste alustamist ning sedasi ei olnud võimalik kindlaks määrata ekstreemumpunkti. Tõenäoliselt tekitasid faasinihet võimendite tagasisides paiknevad kõrgsagedusfiltrid. Programmi loogika sai koostatud nagu eelnevas peatükis kirjeldatud ning sellise lahendusega oli võimalik kätte saada nii miinimum- kui ka maksimumpunkt, millest oli omakorda lihtne arvutada signaali amplituud.

#### 4.7 *Field mill* mõõteseadme kalibreerimine

*Field mill* mõõteseadme usaldusväärsete mõõtetulemuste tagamiseks viidi läbi kalibreerimine. Täpne kalibreerimine oli oluline mõõteseadme tundlikkuse määramiseks kui ka staatilise elektrivälja usaldusväärseks mõõtmiseks. Kalibreerimise eesmärk oli seada mõõteriist vastavusse teadaolevate referentsväärtustega.

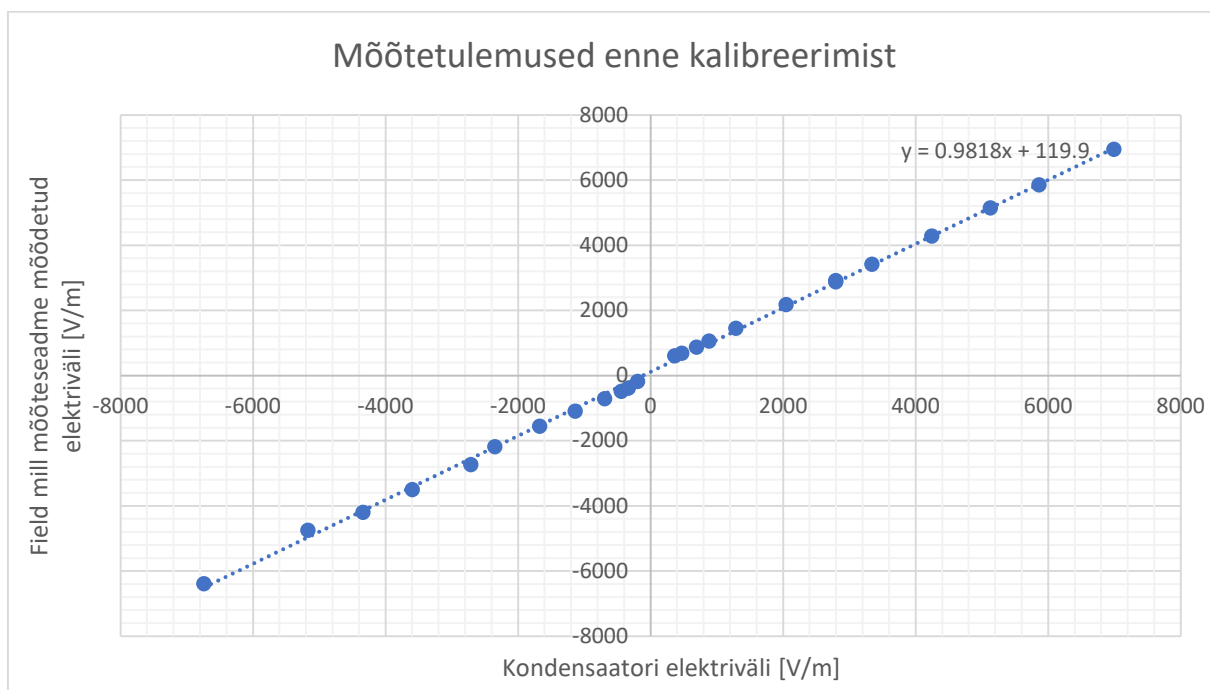
*Field mill* mõõteseadme kalibreerimiseks loodi kahe alumiiniumplaadi abil kondensaator sarnaselt prototüübi testimisega (Joonis 11). Antud olukorras ei paiknenud mõõteseadme kondensaatorplaatide vahel. Selle asemel lõigati ühe alumiiniumplaadi sisse ava ning mõõteseadme andurplaadid olid ühel joonel alumiiniumplaadiga. Muudatuse tulemusena tekkis kondensaatorplaatide vahel suures plaanis homogeenne elektriväli, mis soodustas täpset kalibreerimist.



Joonis 11. *Field mill* kalibreerimine kahe alumiiniumplaadi vahele tekitatud elektriväljaga.

Kalibreerimise alguses vaadati ostsiloskoobiga kolme võimendi väljundsignaali, hinnates nende puhtust ja amplituudi erinevate elektriväljade korral. Selgus, et kolmanda võimendi signaal sisaldas liigset müra ning seda otsustati mitte kasutada. Õnneks olid esimese kahe võimendi väljundsignaalid piisavalt puhtad ning nad suutsid kolmanda võimendi puudumist hästi kompenseerida.

Edasiselt hakati märgistama *field mill* mõõteseadme mõõtetulemusi erinevate elektriväljade korral. Alloleval graafikul (Joonis 12) on näha valminud mõõteseadme tulemuste võrdlust kondensaatori vahel tekkinud elektriväljadega. Mõõtetulemused järgisid lineaarset seost ning paiknesid tihedalt regressioonijoone ümber. Lineaarfunktsiooni tõusust oli näha, et valminud mõõteseadme mõõdab natuke väiksema elektrivälja tugevuse kui see peaks tegelikult olema. Selline asjaolu oli loogiline, sest kondensaatoriplaatide vahel olev elektriväli ei olnud täielikult homogeenne ning realsuses võis kondensaatori elektriväli olla madalam. Regressioonifunktsiooni analüüsid ilmnis ka asjaolu, et lineaarne funktsioon ei läbinud nullpunkti. Sellest saab järeldada, et lisaks kondensaatori elektriväljale oli ka taustelektriväli ligikaudse suurusega 120 V/m.



Joonis 12. Field mill mõõteseadme mõõtetulemused enne kalibreerimist võrreldes kondensaatori elektriväljaga.

Mõõteseadme kalibreerimist ei olnud võimalik teha keskkonnas, kus keskkonna parameetreid saaks väga täpselt hinnata. Samuti ei saanud kindlaks teha täpset kondensaatori elektrivälja. Seega ei lisatud mõõteseadmele korrektsioonitegurit.

## 5 Tulemused ja arutelu

Käesoleva bakalaureuse lõputöö eesmärgiks oli projekteerida ja valmistada *field mill* elektrivälja mõõteseade, millel oleks piisav tundlikkus ja mõõtetäpsus elektrivälja tugevuse määramiseks. Eesmärgiks ei olnud luua täppismõõteseade, vaid pigem lihtsasti valmistatav ning rakendatav seade, mis sobiks kasutamiseks hariduslikel või uurimuslikel eesmärkidel.

Töö tulemusena valmis käepärastest ja taskukohastest komponentidest koostatud mõõteseade. Seade on modulaarse ülesehitusega, mis võimaldab seda hõlpsasti kohandada vastavalt vajadusele. Lisaks on mõõteseade kompaktne ning vajab töötamiseks ainult kahte USB-pesa, mis muudab seadme kasutamise paindlikuks nii siseruumides kui ka välitingimustes. Siiski pole mõõteseade veekindel ja nõuab tähelepanu veekindluse saavutamiseks.

Valminud mõõteseadmega on võimalik mõõta elektrivälju, mille absoluutväärtus jääb alla 50 kV/m. Seadme võimekust piirab antud juhul esimene võimendusaste, mis hakkab teatud signaalitugevuse korral piirama väljundsignaali. Mõõtepiirkonna suurendamiseks oleks võimalik väljundsignaal võtta enne esimest võimendusastet ning ühendada see otse *PSoC* mikrokontrolleri sisendisse.

Eelnevalt mainiti, et mõõteseade suudab mõõta elektrivälju absoluutväärtusega kuni 50 kV/m. Siiski ei ole seadme mõõtmised täpsed üle kogu piirkonna. Mõõteseade suudab registreerida elektrivälju alla 100 V/m, kuid selliseid mõõtmistulemusi ei saa hinnata usaldusväärseks. Samuti esines märgatavat mõõtemääramatust tulemustes, mis jäid alla 400 V/m. Mõõtmistulemused absoluutväärtuselt alla 400 V/m varieerusid palju ning kahe järjestikuse mõõtmise tulemused võisid erineda kohati kahekordselt. Selle põhjuseks oli peamiselt müra suurem mõju madalate signaalitugevuste korral. Samuti mõjutasid tulemusi kalibreerimiskeskonna muutlikud tingimused, sealhulgas teadmatus keskkonna tegeliku elektrivälja tugevuse ja stabiilsuse osas.

Madalate elektrivälja tugevuste mõõtmiseks oli mõeldud kolmas võimendusaste. Antud lõputöö käigus otsustati seda siiski mitte kasutada, sest kolmandal võimendusastmel esines palju müra. Kolmanda võimendusastme kasutamiseks peaks mõõteseadmes tegema muudatusi müra vähendamiseks. Seadme mürakindlust oleks võimalik parandada mitmel viisil. Esiteks võiks kogu signaalitöötlusahela varjestada metallist korpusega. Samuti varjestada ka kriitilised juhtmed. Teiseks tuleks lisada täiendavad madal- ja kõrgpääsfiltrid, et kõrvaldada soovimatud sagedused. Viimase korrektuurina oleks vajalik suurendada andurplaatide pindala, mis tooks esile tugevama signaali andurplaatidelt. Antud muudatuse jõustamiseks oleks mõistlik kogu mõõteseade uuesti konstrueerida.

Töö esialgne plaan nägi ette *PSoC* mikrokontrolleri kasutamist signaalitöötles, kuna see sisaldas sisseehitatud programmeeritavaid võimendeid. Kahjuks ei õnnestunud katsetuste käigus mikrokontrolleri võimendeid tööle saada sobiva konfiguratsiooniga ning ajaressursside piirangute tõttu otsustati see lähenemine kõrvale jätta. Selle asemel disainiti ja joodeti kokku eraldi trükkplaat. On võimalik, et *PSoC* mikrokontrolleri sisemiste võimendite kasutamine oleks vähendanud üldist

mürataset, sest komponendid asuvad samal kiibil ning on vähem vastuvõtlikumad väliste häiretele.

Valminud *field mill* mõõteseadme mõõtetäpsust on raske hinnata. Esmalt sisaldavad võimendite väljundsignaalid müra, mis muudab igat mõõtmistulemust. Teisalt on raske kalibreerida antud mõõteseadet. Mõõtmiskatsete läbiviimise keskkond peab olema ideaalselt kontrollitav. Antud mõõteseadme kalibreerimine toimus keskkonnas, kus puudus täpne informatsioon taustal olevate elektriväljade tugevuse ja stabiilsuse kohta. Täpset kalibreerimist segas ka asjaolu, et kondensaatorplaatide vahel tekkinud elektriväli ei olnud täpselt määratud ning kalibreerimise referentsväärtus oli kõigest teoreetiline suurus.

Vaatamata nimetatud tehnilistele piirangutele ületas töös valminud mõõteseadme ootusi mitmes aspektis. Mõõteseadme võime registreerida ka madalate elektriväljade tugevusi tundus konservatiivne ennustus, kui selgusid kolmanda võimendusastme probleemid. Samuti tekitas kõhklust mõõteriista täpsuses müra rohkus ka esimeses ja teises võimendusastmes. Siiski osutus mõõteseadme praktiliselt kasutuskõlblikuks ning ületas seatud ootusi nii tundlikkuse kui ka töökindluse poolest.

Käesoleva töö tulemusena valmis *field mill* mõõteseadme, mis suudab usaldusväärselt mõõta elektrivälja tugevusi alates 400 V/m. Kuigi tegemist ei ole siiski täppismõõteseadmega, on seadme mõõtmistäpsus piisavalt hea, et hinnata Maa atmosfääri elektrivälja ning visualiseerida elektrivälja tugevust erinevates keskkondades. Lisaks on valminud mõõteseadme kaasaskantav ja vajab ainult kahe USB-pesa olemasolu.

## 6 Annotatsioon

Bakalaureuse lõputöö raames töötati välja *field mill* elektrivälja mõõteseade. Töö eesmärgiks oli ehitada taskukohane ja kohaldatav mõõteriist, mis suudaks usaldusväärselt mõõta elektrivälja tugevust ning oleks sobilik erinevateks rakendusteks. Mõõteseadme keskmeks on *PSoC 5LP* mikrokontroller, mis saab sisendisse töödeldud sisendsignaali ning arvutab selle põhjal elektrivälja tugevuse.

Töö esimeses peatükis käsitletakse mõõteseadme teoreetilisi põhimõtteid ning pakutakse välja muid meetodeid elektrivälja mõõtmiseks. Samuti antakse ülevaade atmosfääri elektriväljast ja selle muutustest. Teine peatükk keskendub mõõteseadme prototüübi valmimisele ning testimisele. Prototüübi eesmärgiks oli kinnitada mõõtemetodi töökindlus ning saada teadmisi mõõteseadme ehitamise kohta. Kolmandas peatükis kirjeldatakse *field mill* mõõteseadme valmimist ning disainiaspekte. Peatükis käsitletakse ka mõõteseadme kalibreerimist ja testimist.

Töö tulemusena valmis usaldusväärselt töötav elektrivälja mõõteseade, mis on valmistatud kättesaadavatest ja lihtsatest materjalidest. Seade on kompaktnen, energiasäästlik ning sobib hästi kasutamiseks erinevates rakendustes. Need omadused võimaldavad seadet mugavalt kaasas kanda. Töö eesmärk on seega edukalt täidetud.

## **7 Abstract**

The topic of this bachelor's thesis is the design and construction of a field mill for electric field measurements using a PSoC microcontroller. The primary objective of the thesis was to design and construct a cost-effective and adaptable measurement device capable of reliably measuring electric field strength in different applications. The device is based on a PSoC 5LP microcontroller that receives a processed input signal and then calculates the electric field strength.

Chapter one of the thesis discusses the theoretical background of the field mill measurement device and other methods for measuring electric fields. It also provides an overview of the atmospheric electric field and its variations. Chapter two focuses on the construction and testing of the prototype. The purpose of the prototype was to confirm the field mill measurement method and to gain practical experience in the construction of the device. The third chapter describes the completion and design aspects of the field mill device, including calibration and testing.

As a result of this thesis, a reliable electric field measurement device was successfully built using readily available and simple materials. The device is compact and energy-efficient while making it suitable for use in various applications. The objectives of the thesis have therefore been successfully achieved.

## **8 Tänuavaldused**

Käesoleva töö autor soovib tänada oma juhendajaid, Lembit Kurikut ja Indrek Lubergi, kes aitasid kaasa mõõteseadme valmimisel ning aitasid lahti mõtestada töö tehnilisi aspekte. Samuti tänab autor oma isa, kes abistas koduselt jootmisprotsessides ning jagas nõu elektroonika probleemide korral.

## 9 Kasutatud kirjandus

- [1] R. P. Feynman, R. B. Leighton ja M. Sands, „The Feynman Lectures on Physics,“ 1964. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.ittc.ku.edu/~callen/energy\\_harvesting/Feynman1964pp9-1to9-3.pdf](https://www.ittc.ku.edu/~callen/energy_harvesting/Feynman1964pp9-1to9-3.pdf). [Kasutatud 04. 02. 2025].
- [2] Mission Instruments Corporation, „Electric Fields,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.missioninstruments.com/pages/learning/elec\\_fields.html](https://www.missioninstruments.com/pages/learning/elec_fields.html). [Kasutatud 04. 02. 2025].
- [3] Eesti lennuakadeemia, „Raadiolainete levi ionosfääris,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://sites.google.com/eava.ee/oppevara/%C3%BCIdteadmised-raadiotehnikast/raadiolained-ja-nende-omadused-ning-kasutamine/raadiolainete-levi-ionosf%C3%A4%C3%A4ris>. [Kasutatud 04. 02. 2025].
- [4] J. Montanya, P. Rodriguez, J. Bergas, A. Illa, B. Hermoso ja I. Candela, „A new electrostatic field measurement method: The coherent-notch field mill,“ *Journal of Electrostatics*, kd. 65, nr 7, pp. 431-437, 2007.
- [5] R. A. Serway ja J. W. Jewett, "Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics", Boston: Pearson, 1988.
- [6] R. Paschotta, „Pockels Effect,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.rp-photonics.com/pockels\\_effect.html](https://www.rp-photonics.com/pockels_effect.html). [Kasutatud 14. 03. 2025].
- [7] Electronics Tutorials, „Electromagnetic Induction,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/electromagnetic-induction.html>. [Kasutatud 14. 03. 2025].
- [8] Lumen Learning, „Faraday’s Law of Induction: Lenz’s Law,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://courses.lumenlearning.com/suny-physics/chapter/23-2-faradays-law-of-induction-lenzs-law/>. [Kasutatud 14. 03. 2025].
- [9] P. Tant, B. Bolsens, D. V. Dommelen, J. Driesen ja R. Belmans, „Design and Application of a Field Mill as a High-Voltage DC Meter,“ *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, nr doi: 10.1109/IMTC.2006.328282, pp. 1460-1461, 2007.
- [10] M. A. Noras, „Electric Field Measurement Techniques And Their Practical Applications,“ *Journal of Physics: Conference Series*, kd. 1, nr 2702, p. 4, 2024.
- [11] TaskuTark, „Kondensaator,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.taskutark.ee/kondensaator/>. [Kasutatud 27. 03. 2025].
- [12] Infineon Technologies, „CY8CKIT-059,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.infineon.com/cms/en/product/evaluation-boards/cy8ckit-059/>. [Kasutatud 27. 03. 2025].

- [13] Electronics Tutorials, „Non-inverting Operational Amplifier,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp\\_3.html](https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp_3.html). [Kasutatud 02. 04. 2025].
- [14] Electronics Tutorials, „Passive High Pass Filter,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp\\_3.html](https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp_3.html). [Kasutatud 02. 04. 2025].
- [15] Vishay Semiconductors, „Reflective Optical Sensor with Transistor Output,“ 30. 07. 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.vishay.com/docs/83751/cny70.pdf>. [Kasutatud 09. 04. 2025].

## 10 Lisad

### Lisa 1 fail *main.c*

```
#include "project.h"
#include <stdio.h>
volatile uint8 taskActive = 0;
CY_ISR(isr_timer1_handler)
{
    Timer1_ReadStatusRegister();
    taskActive = 1;
    Timer2_Start();
    Timer1_Stop();
}
CY_ISR(isr_timer2_handler)
{
    Timer2_ReadStatusRegister();
    taskActive = 0;
    Timer2_Stop();
    Timer1_Start();
}
void addtolist(int* list, int* length, int value, int maxlen);
float Amplitude(int* list, int length);
float Mean(int* list, int length);
#define multiplier ((10.11e-9f) / (8.854e-12f * 2.369e-3f))
int main(void)
{
    CyGlobalIntEnable;
    VDAC8_Start();
    Comp_Start();
    timer_clock_Start();
    Timer1_Start();
    isr_timer1_StartEx(isr_timer1_handler);
```

```

isr_timer2_StartEx(isr_timer2_handler);
USBUART_Start(0,USBUART_5V_OPERATION);
while(USBUART_GetConfiguration()==0){
for(;;)
{
    if (taskActive==1)
    {
        ADC_SAR_Start();

        int first_amp_data[500] = {}, second_amp_data[500] = {}, third_amp_data[500] = {};
        int first_amp_data_len = 0, second_amp_data_len = 0, third_amp_data_len = 0;

        while (taskActive==1){

            int first_amp[100] = {}, second_amp[100] = {}, third_amp[100] = {};
            int first_amp_len = 0, second_amp_len = 0, third_amp_len = 0;

            while (Comp_GetCompare() == 0) {

                AMux_Select(0);
                ADC_SAR_StartConvert();
                ADC_SAR_IsEndConversion(ADC_SAR_WAIT_FOR_RESULT);
                int in1 = ADC_SAR_GetResult16();
                addtolist(first_amp, &first_amp_len, in1,100);

                AMux_Select(1);
                ADC_SAR_StartConvert();
                ADC_SAR_IsEndConversion(ADC_SAR_WAIT_FOR_RESULT);
                int in2 = ADC_SAR_GetResult16();
                addtolist(second_amp, &second_amp_len, in2,100);

                AMux_Select(2);

```

```

    ADC_SAR_StartConvert();
    ADC_SAR_IsEndConversion(ADC_SAR_WAIT_FOR_RESULT);
    int in3 = ADC_SAR_GetResult16();
    addtolist(third_amp, &third_amp_len, in3,100);
}
for (int i = 0; i < 10; i++) {
    AMux_Select(0);
    ADC_SAR_StartConvert();
    ADC_SAR_IsEndConversion(ADC_SAR_WAIT_FOR_RESULT);
    int in1 = ADC_SAR_GetResult16();
    addtolist(first_amp, &first_amp_len, in1,100);

    AMux_Select(1);
    ADC_SAR_StartConvert();
    ADC_SAR_IsEndConversion(ADC_SAR_WAIT_FOR_RESULT);
    int in2 = ADC_SAR_GetResult16();
    addtolist(second_amp, &second_amp_len, in2,100);

    AMux_Select(2);
    ADC_SAR_StartConvert();
    ADC_SAR_IsEndConversion(ADC_SAR_WAIT_FOR_RESULT);
    int in3 = ADC_SAR_GetResult16();
    addtolist(third_amp, &third_amp_len, in3,100);
}
float amplitude_first_amp = Amplitude(first_amp, first_amp_len);
float amplitude_second_amp = Amplitude(second_amp, second_amp_len);
float amplitude_third_amp = Amplitude(third_amp, third_amp_len);

if (amplitude_first_amp != 0 && amplitude_second_amp != 0 && amplitude_third_amp
!= 0) {
    addtolist(first_amp_data, &first_amp_data_len, (int)amplitude_first_amp,500);

```

```

        addtolist(second_amp_data, &second_amp_data_len,
(int)amplitude_second_amp,500);

        addtolist(third_amp_data, &third_amp_data_len, (int)amplitude_third_amp,500);

    }

}

float mean_first_amp = Mean(first_amp_data, first_amp_data_len);
float mean_second_amp = Mean(second_amp_data, second_amp_data_len);
float mean_third_amp = Mean(third_amp_data, third_amp_data_len);
float EF_amp_1 = ((mean_first_amp/7.156)*multiplier/1000);
float EF_amp_2 = ((mean_second_amp/54.376)*multiplier/1000);
float EF_amp_3 = ((mean_third_amp/445)*multiplier/1000);
float Electric_Field;
if (EF_amp_2 < 6000) {
    Electric_Field = EF_amp_2;
}
else{
    Electric_Field = EF_amp_1;
}
char value[100];
sprintf(value, "Electric field: %.2f\r\n", Electric_Field);
USBUART_PutString(value);
}
}
}

void addtolist(int* list, int* length, int value, int maxlen) {
    if (*length < maxlen) {
        list[(*length)++] = value;
    } else {

}
}

```

```

}
float Amplitude(int* list, int length) {
    if (length < 40) {
        return 0;
    }
    int group_size = 3;
    float means[30] = {0};
    int group_index = 0;

    for (int i = 0; i < length - group_size + 1; i += group_size) {
        float sum = 0;
        for (int j = 0; j < group_size; j++) {
            sum += list[i + j]*5000/4096;
        }
        means[group_index++] = sum / group_size;
        if (group_index >= 30) break;
    }
    float max = means[0];
    float min = means[0];

    for (int i = 1; i < group_index; i++) {
        if (means[i] > max) max = means[i];
        if (means[i] < min) min = means[i];
    }
    if (means[0] < means[group_index - 1]) {
        return (max - min) / 2;
    } else {
        return (min - max) / 2;
    }
}

```

```
float Mean(int* list, int length) {  
    float sum = 0;  
    for (int i = 0; i < length; i++) {  
        sum += list[i];  
    }  
    float mean = sum/length;  
    return mean;  
}
```

## Lisa 2

Lisa  
rektori 07.04.2020 käskkirjale nr 1-8/17

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

Mina, Henrik Hinn

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose *FIELD MILL ELEKTRIVÄLJA MÕÖTESEADME EHTAMINE RAKENDADES PSOC MIKROKONTROLLERIT*, mille juhendajad on Lembit Kurik ja Indrek Luberg,
    - 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.
- 

23.05.2025

---

<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 loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtjaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.