

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Tehnoloogiainstituut

Oliver Vaht

Lämmastikhappe taaskasutussüsteemi juhtplaadi prototüübi loomine

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendaja:

kaasprofessor Tarmo Tamm

Tartu 2022

Resümee

Lämmastikhappe taaskasutussüsteemi juhtplaadi prototüübi loomine

Lämmastikhappe taaskasutuse jaoks puuduvad väiksematele mahtudele sobivad lahendused ja selle tõttu kasutatud lämmastikhape neutraliseeritakse. Bakalaureusetöö raames tegeletakse lämmastikhappe vaakumdestillatsioonil põhineva regenereeriva süsteemi juhtplaadi prototüübi loomisega. Töö teoreetilises osas tuuakse välja süsteemi eritingimused ja kirjeldatakse, kuidas nende tingimustega arvestatakse. Töö praktilises osas loodi juhtplaadi prototüüp, mis jälgib ja kontrollib vaakumdestillatsiooninõus toimuvat ning suhtleb süsteemi erinevate osadega.

CERCS: T120 Süsteemitehnoloogia, arvutitehnoloogia; T125 Automatiseerimine, robotika; T170 Elektroonika; T350 Keemiatehnoloogia ja -masinaehitus;

Märksõnad: automatiseerimine, elektroonika, lämmastikhape

Abstract

Creation of a mainboard prototype for a nitric acid recovery system

There are no suitable solutions for recycling smaller volumes of nitric acid, which typically results in the neutralisation of the used nitric acid. The bachelor's thesis deals with the creation of a prototype mainboard for a nitric acid vacuum distillation based regenerative system. The theoretical part of the thesis outlines the special conditions of the system and describes how these conditions are accounted for. In the practical part of the study, a prototype mainboard was created, which monitors and controls what is happening in the vacuum distillation vessel and interacts with different parts of the system.

CERCS: T120 Systems engineering, computer technology; T125 Automation, robotics, control engineering; T170 Electronics; T350 Chemical technology and engineering

Keywords: automatization, electronics, nitric acid

Sisukord

Resümee	2
Abstract	3
Sisukord	4
Jooniste ja tabelite loetelu	6
Lühendid, konstandid, mõisted	7
1 Sissejuhatus	8
2 Lämmastikhappe jääkide taaskasutamine	9
2.1 Lämmastikhappe jääkide teke	9
2.2 Süsteemi üldine tööpõhimõte	10
2.3 Funktsionaalsed nõuded	14
3 Töö eesmärk	15
4 Metoodika	16
4.1 Andmehõive süsteemi iseloomustavatelt sensoritelt	16
4.1.1 Juhtivus	17
4.1.2 Temperatuur	19
4.1.3 Rõhk	19
4.2 Juhtplaadi arendus	20
4.2.1 Mikrokontrolleri valimine	20
4.2.2 Üldine elektroonika disain	22
4.2.3 Muu elektroonika ja korpuse arendus	26

4.3 Tarkvara arendus	29
4.3.1 Vaakumdestillatsiooni protsessi algoritm	30
4.3.2 Andmehõive	33
4.3.3 Suhtlus proto-lülitusplaadiga	33
4.3.4 Veebiserver ja andmete edastamine	34
4.3.5 Passiivne monitoorimine ja signaalitöötlus	34
5 Testimine	35
5.1 Andmehõive mooduli testimine	35
5.2 Proto-lülitusplaat	36
5.3 Juhtplaadi elektroonika testimine	36
5.4 Tarkvara testimine	37
5.5 Üldine testimine	38
Kokkuvõte	40
Tänuavaldused	41
Kirjandus	42
Lisad	45
Lisa 1 Juhtplaadi 2. versiooni elektriskeem	45
Lisa 2 Juhtplaadi 2. versiooni vasekihid	47
Lisa 3 Korpuse mudel	49
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	51

Jooniste ja tabelite loetelu

Joonis 1. Vaakumdestillatsiooni aparatuur

Joonis 2. Süsteemi modulaarsus ja juhtplaadi roll

Joonis 3. Vaakumdestillatsiooni automatiseerimise funktsionaalne diagramm

Joonis 4. Näivtakistus ja reaktakistuse suhestumine

Joonis 5. Esimese põlvkonna trükkplaadi väljanägemine

Joonis 6. Teise põlvkonna trükkplaadi väljanägemine

Joonis 7. Loodud korpus kasutuses juhtplaadi hoiustamiseks

Joonis 8. Solenoid kinnises olekus

Joonis 9. Informatsiooni kättesaamine arduinosse ja viikude külge ühendatud LEDid

Joonis 10. Valminud testplaat. Tähistatud numbritega :

Joonis 11. Vaakumdestillatsiooni protsessi algoritm 1/2

Joonis 12. Vaakumdestillatsiooni protsessi algoritm 2/2

Joonis 13. Andmehõive mooduli ühendused

Joonis 14. Süsteemi üldine testimine

Joonis 15. Juhtplaadi elektriskeem 1/2

Joonis 16. Juhtplaadi elektriskeem 2/2

Joonis 17. Vasekiht I

Joonis 18. Vasekiht II

Joonis 19. Vasekiht III

Joonis 20. Vasekiht IV

Joonis 21. Korpuse kaane osa

Joonis 22. Korpuse trükkplaadi hoidja osa

Joonis 23. Korpuse juhtmestiku ja toiteplokki osa

Tabel 1. Võrdlus mikrokontrollerite vahel

Lühendid, konstandid, mõisted

Destillatsiooninõu - mahuti, milles toimub destillatsioon [1, lk 4]

EMI - elektromagnetiline interferents

IC - integraallülitus (inglise *integrated circuit*)

I/O - sisend/väljund

MCU - mikrokontroller (inglise *Microprocessor Unit*)

PCB - trükkplaat (inglise *printed circuit board*)

PT100 - plaatina termistor

RTOS - reaalaegaline operatsioonisüsteem (inglise *Real-time operating system*)

TTL - transistor-transistor loogika (inglise *Transistor-Transistor Logic*)

UART - jadaport (inglise *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*)

1 Sissejuhatus

Lämmastikhape on üks maailmas enim kasutatavaid happeid. Iga aasta toodetakse pea 60 miljonit tonni lämmastikhapet [2]. Kontsentreeritud lämmastikhapet kasutatakse metallide oksüdatiivsel söövitamisel, mille käigus hakkab vähenema lämmastikhappe kontsentratsioon [3]. Metalli ioone sisaldav ja vähenenud kontsentratsiooniga lämmastikhappe lahust käsitletakse ohtliku ja kasutu jäägina ning see neutraliseeritakse. Neutraliseerimise protsess on kulukas ja tekkivad jäägid looduskeskkonnale koormavad. Selle asemel, et vähenenud kontsentratsiooniga lämmastikhappe jääk neutraliseerida, on mõistlik hape eraldada ja suunata taaskasutusse.

Tänapäeva tööstuses on väiksemas mastaabis lämmastikhappe regenereerimine vähe levinud, kuna sobivad seadmed puuduvad. Suuremas mastaabis lämmastikhappe regenereerimise lahendused on olemas, kuid valmistatakse igale kliendile eritellimusena [4].

Bakalaureusetöö on osa projektist, milles võetakse aluseks uus meetodika lämmastikhappe taaskasutuseks (vaakumdestillatsiooni meetod), mis võrreldes teistega meetoditega on ohutum ja odavam. Vastavalt eeltoodule luuakse antud bakalaureusetöö raames juhtimisplaat, mille abil saab HNO_3 regenereerimise protsessi automaatselt kontrollida ja juhtida.

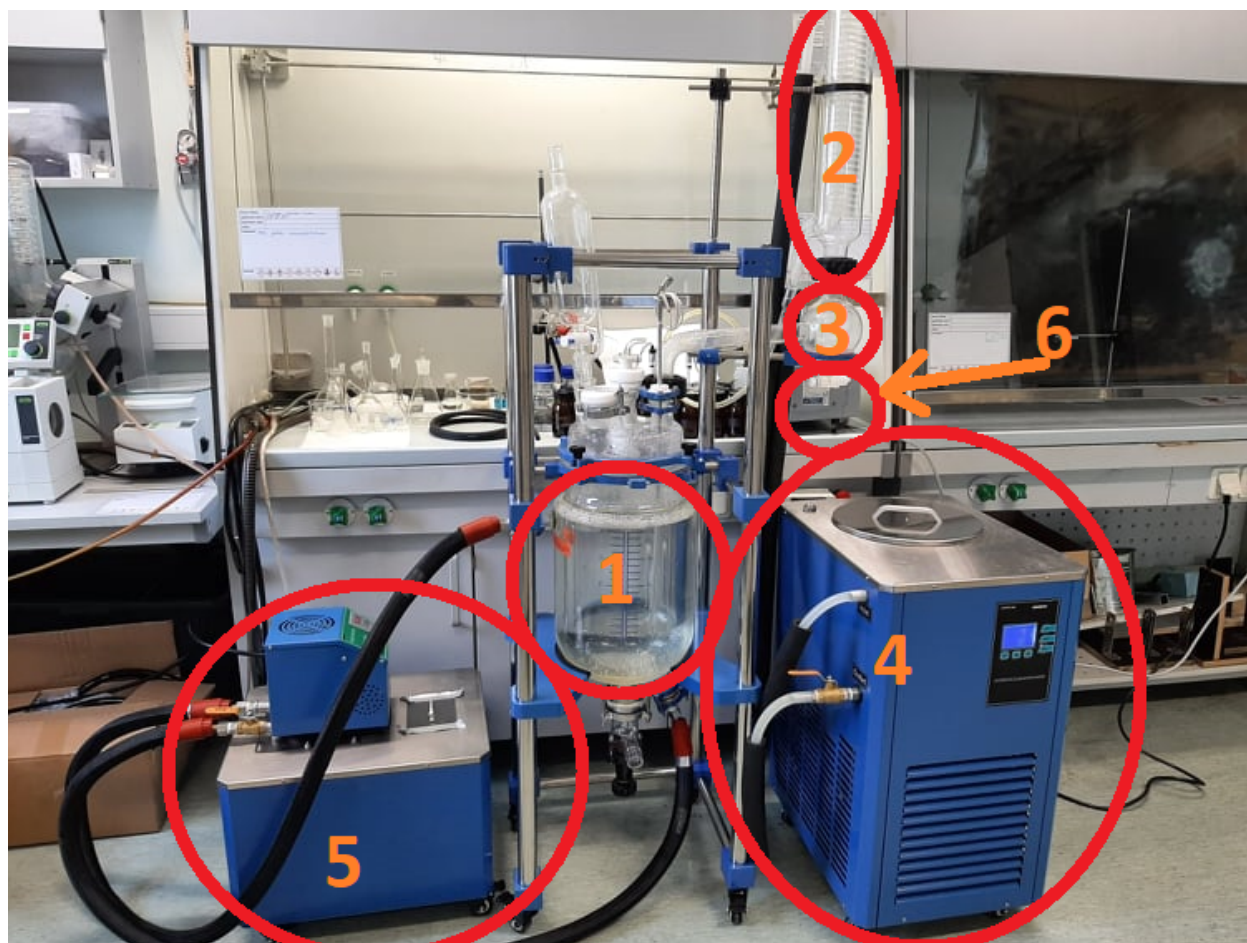
2 Lämmastikhappe jääkide taaskasutamine

2.1 Lämmastikhappe jääkide teke

Metalli ja happe vahelisel reaktsioonil tekivad metallide soolad, osa happest laguneb ja eelnevatest loputusvannidest kantakse koos detailidega kaasa happevanni loputusvett. Eelnevast tulenevalt saab järeldada, et kasutatud hape saastub metalli sooladega ja lahjeneb ning ei sobi lõpuks enam metalldetailide puhastamiseks. Sellise jääkhappe HNO_3 sisaldus on tüüpiliselt 40-50 massi-%. Toodud andmetest ilmneb, et algsest happest on ära reageerinud üksnes 20-30%.

Käesoleval ajal on tavaks selline vana happelahus eemaldada ja uus kasutusele võtta. Kuna happelahust ei tohi reovette puhtal kujul suunata, tuleb happelahus neutraliseerida pH vahemikku 6.0 kuni 9.0 [5]. Neutraliseerimisel kasutatakse NaOH lahust, mis on tootmisprotsessi vaatevinklist täiendav kulu.

2.2 Süsteemi üldine tööpõhimõte



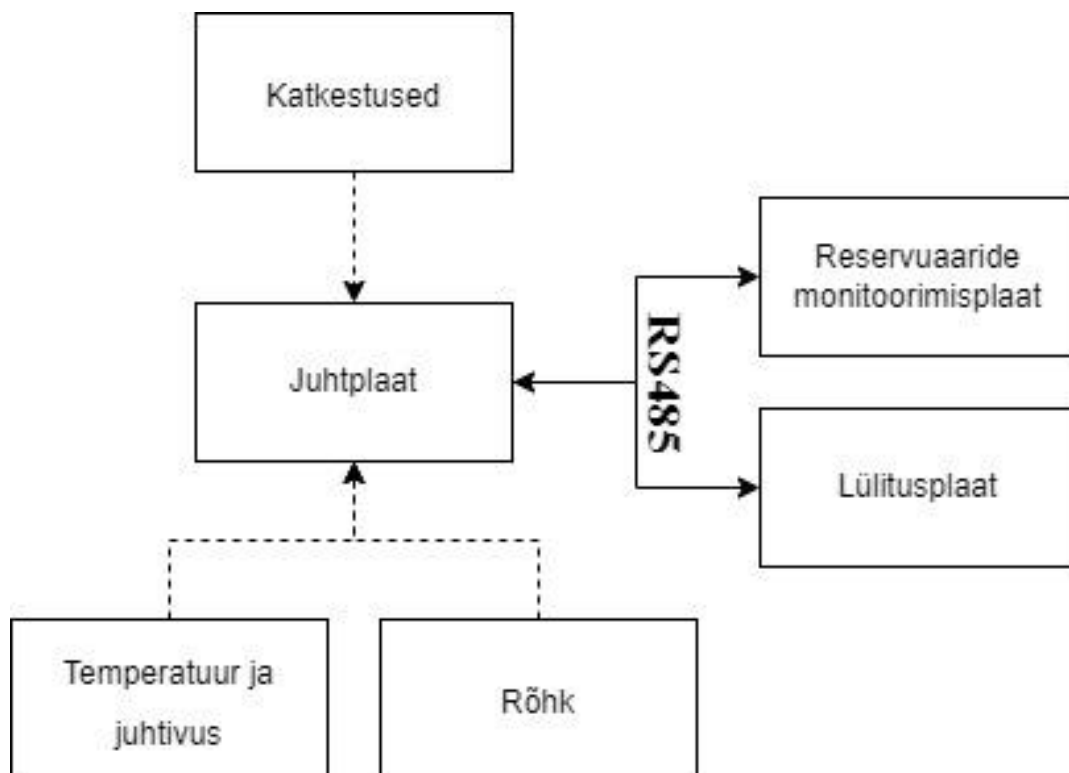
Joonis 1. Vaakumdestillatsiooni aparatuur

Joonisel 1. on näha järgnevad vaakumdestillatsiooni aparatuuri osad :

1. destillatsiooninõu;
2. jahuti;
3. vastuvõtja;
4. vaakumpump;
5. krüostaat;
6. termostaat.

Joonisel 1. välja toodud seadmed ja anumad on vajalikud vaakumdestillatsiooni protsessiks. Tegemist ei ole tavalise laboritehnikaga vaid pooltööstusliku prototüüp seadmega. Termostaat kuumutab destillatsiooninõu veesärgis ringlevat kuumutusvedelikku (vesi). See toob kaasa destillatsiooninõus asetseva happe temperatuuri tõusu soojusülekande tõttu. Krüostaat on vajalik jahutusvedeliku (vesi) jahutamiseks. Jahutusvedelik suunatakse jahutisse ja seal toimub happeaurude kondenseerumine ning destillaat koguneb vastuvõtjasse. Vaakumpump võimaldab rõhku alandada, mis omakorda langetab keemistemperatuuri.

Automatiseerimise protsess on jaotatud põhisüsteemiks (juhtplaat) ja selle alamsüsteemideks (reservuaaride monitoorimissüsteem ja lülitussüsteem). Modulaarsus on vajalik süsteemi dünaamilisuse tagamiseks (kergesti edasiarendatav ja ümber tehtav). Näiteks vajaduse tekkel saab vaakumdestillatsiooni aparatuuri ümbritseva keskkonna monitoorimissüsteemi lihtsasti ümber disainida.



Joonis 2. Süsteemi modulaarsus ja juhtplaadi roll

Joonisel 2 on kujutatud juhtplaadi suhtlemis ja andmehõive skeem. Juhtplaat kogub informatsiooni rõhu, katkestuste ja temperatuuri ning lahuse juhtivuse (neid andmeid kogutakse koos) kohta. Andmevahetus teiste plaatidega toimub RS485 standardi abil.

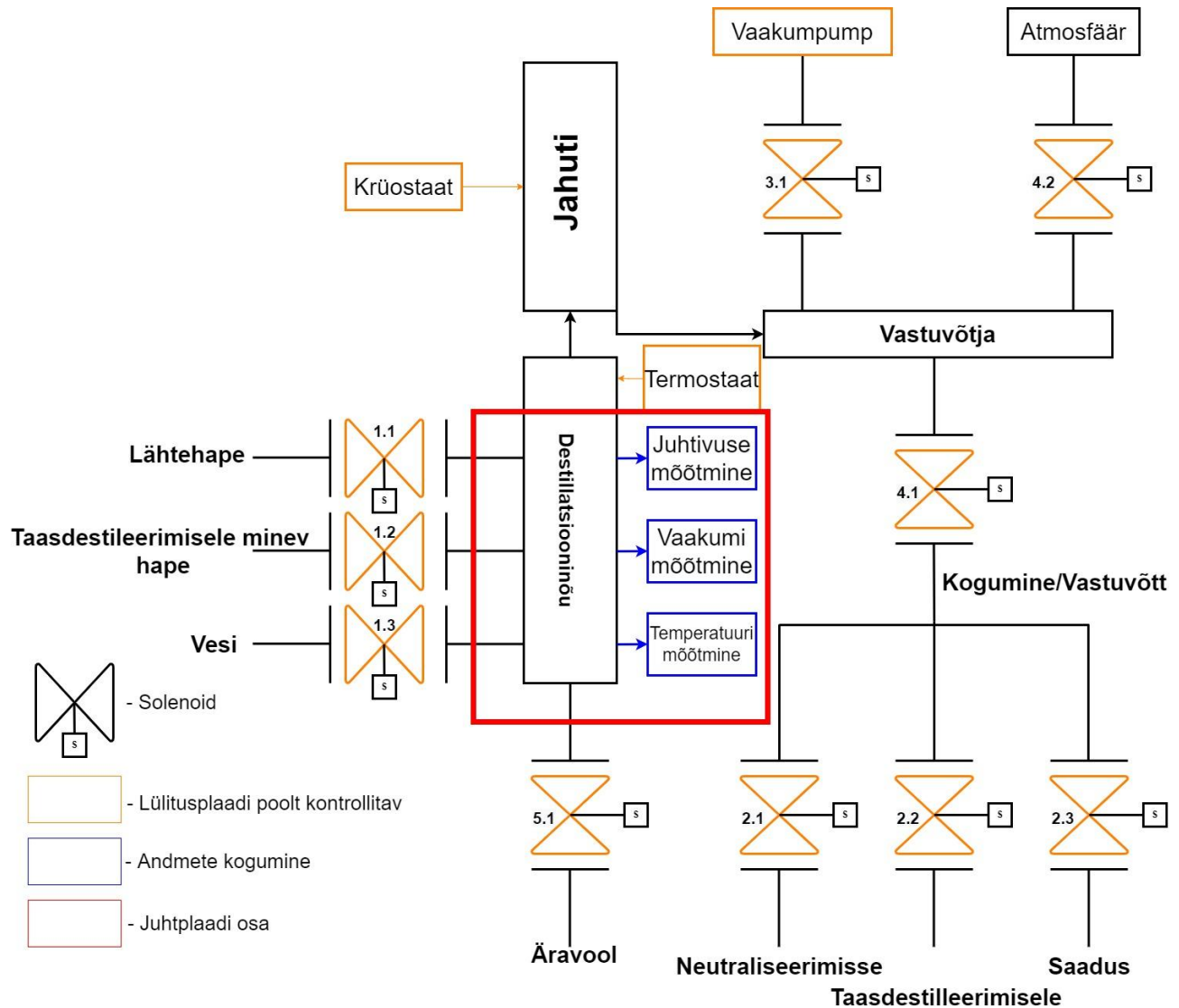
Reservuaaride monitoorimisplaadi abil kontrollitakse piisava ruumi olemasolu mahutites enne vaakudestilatsioon alustamist. Lülitusplaat on vajalik juhtplaadilt saadud käskluste täitmiseks. Juhtplaadil hakatakse lülitama solenoidklappe, mille ülesanded on järgnevad:

- Lähtehappe sissevõtt (tähistatud 1.1);
- Taasdestilleerimisele mineva happe sissevõtt (tähistatud 1.2);
- Vee sissevõtt (tähistatud 1.3);
- Neutraliseerimisse suunav (tähistatud 2.1);
- Taasdestilleerimisele suunav (tähistatud 2.2);
- Saadusesse suunav (tähistatud 2.3);
- Vaakumpumbaga ühendust kontrolliv (tähistatud 3.1);
- Kogumine/vastuvõtt (tähistatud 4.1);
- Välisõhuga ühendav (tähistatud 4.2);
- Äravoolu kontrolliv (tähistatud 5.1).

Lisaks hakatakse juhtplaadil abil lülitama järgnevaid releesid seadmete töölepanekuks:

- Vaakumpump;
- Krüostaat;
- Termostaat.

Juhtplaadil on võimalus vastu võtta katkestusi. Antud funktsionaalsus on loodud tulevikkuvaatavalt, näiteks võib osutuda vajalikuks ümbritseva keskkonna monitoorimine lämmastikhappe lekete tuvastamiseks. Nii saab täiendada süsteemi uute ohutuse kontrolli võimalustega.



Joonis 3. Vaakumdestillatsiooni automatiseerimise funktsionaalne diagramm

Joonisel 3 on kujutatud erinevate lülituste, andmehõive ja juhtplaadi osa. Juhtplaat saab informatsiooni vaakumdestillatsiooninõuga ühendatud sensoritelt, milleks on vaakumsensor, juhtivuselektrood ja termistor. Saadavate andmete järgi otsustatakse millal algoritmis järgmisesse sammu liikuda ja kohandatakse järgmise faasi suunavad tingimused ümber (keemistemperatuur sõltub rõhust). See tagab algoritmi dünaamilisuse erinevate olukordade tekkel.

2.3 Funktsionaalsed nõuded

Riistvaralised nõuded saab jaotada kaheks peamiseks osaks. Süsteemi osad, mis puutuvad happelahusega kokku ja mis ei puutu.

Happelahusega kokkupuutuvad süsteemi osad peavad olema materjalist, mis ei degradeeru, säilitaksid funktsionaalsuse ja korrektsuse. Süsteemi tingimused on äärmuslikud. Tuleb arvestada ligikaudu 10 M (Molaarse) happelahusega, mille temperatuur võib ulatuda maksimaalselt 95°C. Hetkel puuduvad standardsed lahendused sensorite ja kraanidega, mis peaksid vastu nii ekstreemsetele tingimustele [5] [6].

Happelahusega mittekokkupuutuvad osad peavad eelkõige olema modulaarsed. Modulaarsus tagab süsteemi eri osade mugava laiendamise võimaluse. See tähendab, et pole vaja kogu elektroonika plaati ümber teha, kui leitakse viga näiteks reservuaaride monitoorimise plaadil. Sel viisil andmevahetusprotokollid jäävad samaks.

Maailmas on suur kiibipuudus, mis võib jõuda taastumisfaasi alles 2023 aastal [8]. Suur nõudlus on tõstnud kiipide hinda märkimisväärselt ja tihti saab vajalikke komponente kätte alates aastast 2025 [9]. Seetõttu tuleb süsteemi loomisel silmas pidada komponentide saadavust ja hinda.

Realses süsteemis on vahemaad erinevad laboris ülesseatud süsteemist. Tuleb eeldada, et distantis süsteemi osade vahel võib olla kuni 50m (varuga), andmesiidil ei tohi signaal kaduma minna. Ühtse kommunikatsiooniprotokolli kasutamine on vajalik süsteemi lihtsustamiseks.

3 Töö eesmärk

Töö eesmärk on:

- Luua vaakumdestillatsiooni süsteemi haldamiseks juhtplaat, mis:
 - võtab vastu sensoritelt rõhu, temperatuuri ja elektrijuhtivuse andmeid;
 - suudab kuvada ja edastada informatsiooni süsteemi kohta;
 - otsustab vastavalt juhtimisalgoritmile;
 - edastab vastavalt juhtimisalgoritmile juhtimissignaale;
 - on kergesti laiendatav.
- Programmiloojika loomine ja esmane testimine.

Loodavad lahendused peavad arvestama süsteemi ekstreemseid tingimusi, kõrgeid nõudeid ohutusele ja tagama võimaluse edasiarenduseks.

4 Metoodika

Metoodika saab jaotada kolmeks suuremaks osaks:

1. Andmehõive;
2. Juhtplaadi arendus;
3. Tarkvaraarendus;

4.1 Andmehõive süsteemi iseloomustavatelt sensoritelt

Andmed, mida on vaja koguda destillatsiooninõus olevate tingimuste kohta:

- Elektrijuhtivus;
- Temperatuur;
- Rõhk.

Elektrijuhtivuse mõõtmine on vajalik happelahuse nivoo tuvastamiseks destillatsiooninõus. Seni kuni juhtivuselektroodi kontakte vahel puudub vedelik on juhtivus praktiliselt null. Vedeliku nivoo tõustes saabub hetk kui kontaktide vahel on vedelik ja sellisel juhul juhtivus tõuseb suurusjärke. Happelahuse nivoo tuvastamine annab juhtplaadi algoritmikale sisendi, millal liikuda järgmisesse etappi. Lisaks aitab juhtivuse määramine tuvastada, milline lahus on süsteemis. Erinevad lahused omavad erinevat juhtivust. See annab süsteemile täiendava võimaluse kontrollimiseks, kas ollakse õiges etapis.

Temperatuuri jälgimine on vajalik vaakumdestillatsiooni protsessi monitoorimiseks. Temperatuur annab tagasisidet, mis etapis on vaakumdestillatsioon. Selle põhjal saab otsuseid vastu võtta, milline solenoidklapp avada.

Rõhu jälgimine on vajalik, et koguda täpselt etteantud koostisega destillaadi fraktsioone õigetele temperatuuridel. Kindla koostisega happe keemistemperatuur sõltub rõhust, mida madalam on rõhk seda madalamal temperatuuril vastav vedelik keeb. Rõhu väärtustega tuleb arvestada otsuste vastuvõtmisel. Vaakumdestillatsiooni süsteemi töö rõhk sõltub ühenduskohtade tihendatuse määrast ehk leketest ja võib seega süsteemi lahtiühendamise eelselt ning taas kokku monteerimise järgselt erineda.

Eksperimentaalsed andmed näitavad, et sensorid peavad vastu pidama 10 M happele. Sensorite andmestik ei tohi hakata ajas triivima ehk anda ebausaldusväärseid andmeid. Kontrollimaks signaal triivi puudumist viidi läbi eksperiment.

4.1.1 Juhtivus

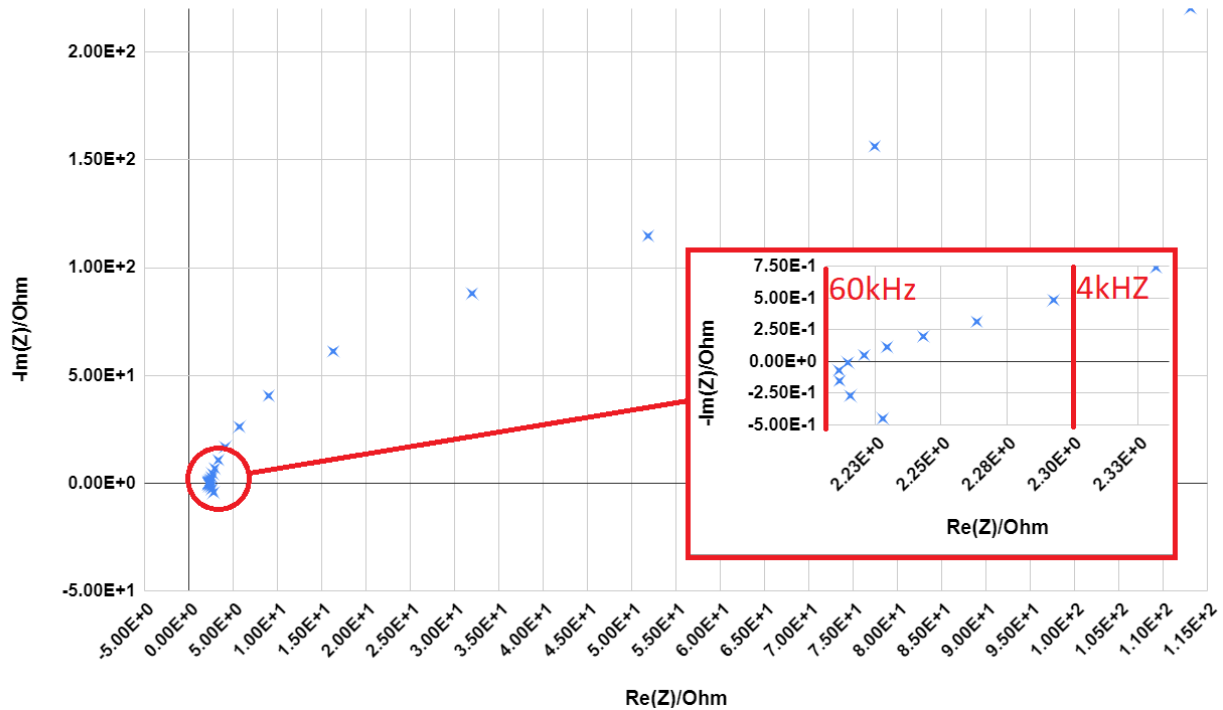
Juhtivuse andmestiku kättesaamisel on vajalik arvestada skaleeritavusega. Kuna süsteemi olulisteks osadeks on reservuaarid, mille täituvust tuleb monitoorida, on mõistlik kasutada ühesuguseid sensoreid ja juhtivuselektroode.

Juhtivuselektrood, mida prototüübis kasutati, on *DJS-1C Conductivity electrode (platinum black)*. Andmelehe järgi on selle *cell constant* = 1 +- 0,2, mõõtepiirkond 2-20000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ja kalibreerimislahus 0,01 M kaaliumkloriidi lahus [10].

Mõõtmistel tuleb kasutada võimalikult madalat pinget ja vahelduvvoolu. Madal pinge on vajalik elektrokeemiliste reaktsioonide ärahoidmiseks [11]. Vahelduvvoolu kasutamine välistab elektrokeemiliste reaktsioonide toimumise elektroodi kontaktpindadel. Kui kasutada alalisvoolu, hakkavad laengud platinast kontaktpinna juurde akumuleeruma - see mõjutab mõõtetäpsust. Mõõtepinna reageerimine on tingitud alalisvoolu poolt esile kutsutud elektrokeemilisest protsessist, kus ajapikku hakkab plaatina reageerima happes olevate ionidega [12].

Vahelduvvoolu tuleb kasutada võimalikult optimaalset sagedust, mis on vajalik vältimaks muude keemiliste protsesside müra. Lisaks aitab see vältida mahtuvuslikku takistust [13, Ptk 10]. Joonisel 4. on näha eksperimentaalsed andmed erinevate sageduste mõju impedantsile ja

reaaltakistusele. Kasutades elektrokeemia tööjaama BioLogic BP-300 tehti mõõtmised vahemikus 1MHz $\rightarrow$ 1Hz, koguti kokku 30 andmepunkti ja kasutati pinget 0.1V.



Joonis 4. Näivtakistus ja reaktakistuse suhestumine

Jooniselt 4 on näha kõrge sageduse vajadus juhtivuselektroodilt andmete kogumiseks. Mida madalam on sagedus, seda rohkem mõjutavad difusiooniprotsessid signaali. Kuid ka liiga kõrge sagedus ei ole hea, sest mõõtevead hakkavad suurenema ja mõõtetulemust mõjutavad ühendusjuhtmete elektrilised omadused. Baseerudes mõõtmistele ja kirjanduse on optimaalne sagedus 20-50 kHz ringis [14].

Pidades silmas eeltoodud kriteeriumeid ja temperatuuri jälgimise vajadust, kasutati juhtivuse monitoorimiseks **Analog Devices EVAL-CN0359-EB1Z** (edaspidi **EB1Z**). Teised alternatiivid

olid EVAL-CN0349-PMDZ (edaspidi **PMDZ**) ja juhtivuse mõõtmise plaadi isetegemine. Kuigi PMDZ vastab süsteemi kriteeriumitele, puudub see tarnijate laost. Süsteemi isetegemine olnuks omaette lõputöö vääriline ja komponentide kättesaadavuse piirangud oleks veelgi raskendanud selle loomist ning eelnevast tingituna sellest loobuti.

4.1.2 Temperatuur

Vaakumdestillatsiooni aparatuuri olemasolev kasutajaliides omab funktsionaalsust näidata temperatuuri. Temperatuuri väärtus pärineb reaktori seest, kus asub PT100 termistor. Termistor tagasisidestab end takistuse näol. Juhtivuse andmestiku saamiseks kasutatakse EB1Z plaati, millel on lisaks funktsionaalsus temperatuuri jälgimiseks.

Suhtlemiseks kasutab EB1Z RS485 standardit. Sellega tuleb arvestada elektroonika disainis.

4.1.3 Rõhk

Rõhu andmestiku saamisel on kõige komplitseerivamaks nõudeks vastupidavus ligi 10 M lämmastikhappe lahusele ja selle aurudele. Kommertsiaalselt pakutav valmisolev lahendus on Vacuubrand DCP 3000 + VSP 3000 kombinatsioon [15].

Suhtlemiseks kasutab DCP 3000 + VSP 3000 RS-232C suhtlusprotokolli. Sellega tuleb arvestada elektroonika disainis.

4.2 Juhtplaadi arendus

Süsteemi korpus disainiti kasutades SOLIDWORKS tarkvara (versioon 2020) [16] ja elektroonikadisain on tehtud Circuitmaker (versioon 2.1) tarkvaras [17].

4.2.1 Mikrokontrolleri valimine

Mikrokontrolleri töö ülesandeks on:

- koguda andmeid destillatsiooninõust;
- juhtida vaakuestillatsiooni protsessi;
- saata informatsiooni lülitusplaadile;
- andmetöötlus;
- saada informatsiooni reservuaaride täituvuse kohta;
- kuvada ja saata informatsiooni vaakuestillatsiooni nõus olevate tingimuste kohta.

Temperatuur, juhtivus ja rõhk - need on vajalikud parameetrid vaakumdestillatsiooni protsessi jälgimiseks. Neid andmeid koguvad sensorid kasutavad kas RS232 või RS485 standardit andmete edastamiseks. Andmete vastuvõtmiseks tuleb esmalt muuta nad mikrokontrolleri jaoks mõistetavasse formaati, milleks on UART. RS485 ja RS232 poolt kasutatav pingeline on liiga kõrge mikrokontrolleri jaoks.

Reservuaaride täituvuse ja destillatsiooninõus olevate tingimuste kuvamiseks on vaja GPIO võimekust mikrokontrolleril. Reservuaaride täituvuse kohta saadakse informatsioon reservuaaride monitoorimisplaadilt viigule. Kui viik on madal (pinge puudub viigul) on reservuaarid täitunud ja vastupidisel korral tühjad. See lähenemine loob täiendavad võimalused reservuaaride monitoorimisplaadiga suhtlemisel. Kui toitepinge peaks kaduma on viik normaalolekus madal ja süsteem seeläbi ohutum.

Destillatsiooninõus olevate tingimuste kuvamiseks on vaja GPIO olemasolu nihkeregistritele andmete edastamiseks.

Vaakumdestillatiooni protsessis on tähtis täpne ajastus. Tuleb tuvastada kui kaua mingi protsess kestab ja millal on mingi mõõtmine tehtud (saadud sensorist andmestik). Lisaks on vaja teha teatud otsused, infoedastamised jms määratud intervallide tagant. Kõige selle võimalikuks tegemiseks ja lihtsustamiseks on mõistlik kasutada RTOSi. RTOSi spetsiifilised funktsioonid näiteks *"MUT"*ual *"EX"*clusion" aitavad kaitsta koodi kriitilisi muutujaid. Seega peab olema mikrokontrolleril RTOS tugi.

Eeltoodud põhjustel on mikrokontrollerile seatud nõuded on järgnevad:

- Võrgutugi;
- Toetab RTOSi;
- Vähemalt 2 UART viiku;
- Vähemalt 10 GPIO;

Kuna mikroprotsessori ja sellele eraldi võrgumooduli lisamine loob ebavajaliku lisakeerukust on mõistlik seda vältida ja kasutada mikrokontrollerit, kuhu on võrgutugi sisse integreeritud. Seega võrgutoe nõude täitmiseks on mõistlik kasutada valmis mikrokontrollerit, mis sisaldab endas mikroprotsessorit ja sellega liidestatud antenni.

Mikrokontrolleri kasutusjuhend, dokumentatsioon ja tehniline tugi peavad olema olemas ja kvaliteetse sisuga. Eeltoodute olemasolu vähendab mikroprotsessorile elektroonika silumisele kuluvat aega ja muudab ka koodi silumise kergemaks. Lisaks peab olema mikrokontroller kergesti kättesaadav.

Vastavalt nõuetele on all tabelis välja toodud erinevate variantide vaheline võrdlus :

Mikrokontrolleri nimetus	ESP-12F [18]	ESP-WROOM-32 [19]
WIFI kiip :	ESP8266	ESP32
Maksimaalne taktsagedus:	160 MHz	240 MHz
Hind :	1.33 € [20]	2.83 € [21]
UART viikude arv :	1	3
GPIO arv :	9	22
Flash mälu suurus :	32 MB	16MB
RTOS toetus :	Jah	Jah

Tabel 1. Võrdlus mikrokontrollerite vahel.

Baseerudes ülaltoodud nõuetele valiti **ESP-WROOM-32** mikrokontroller.

4.2.2 Üldine elektroonika disain

Nagu andmehõive peatükis välja toodi, siis varasemalt kasutatakse infovahetuseks RS485 standardit, erandina ka RS-232C. Mõlema puhul tuleb saadav ja edastatav info teisendada mikroprotsessori jaoks TTL UARTiks - parimaks lahenduseks on kasutada RS485 to UART IC'd. Nõuded selle IC'le on järgnevad :

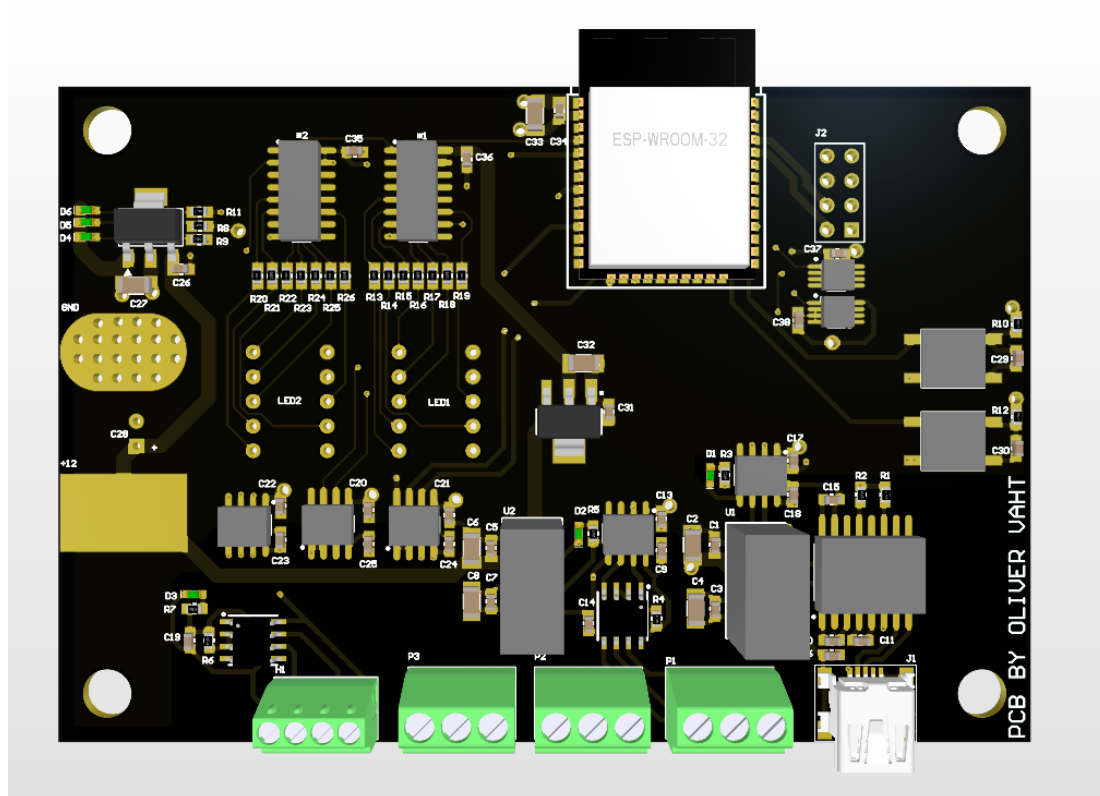
- Andmevahetuskiirus vähemalt 115200 baud;
- Võimeline infot vastu võtma ja saatma;
- Võimalikult kvaliteetne dokumentatsioon.

Kõikidele nõuetele vastavaks ja võimalikult odavaks komponendiks osutus MAX485CSA+T [22]. Seda IC kasutatakse edaspidi kõikide teiste RS485 lahenduste puhul.

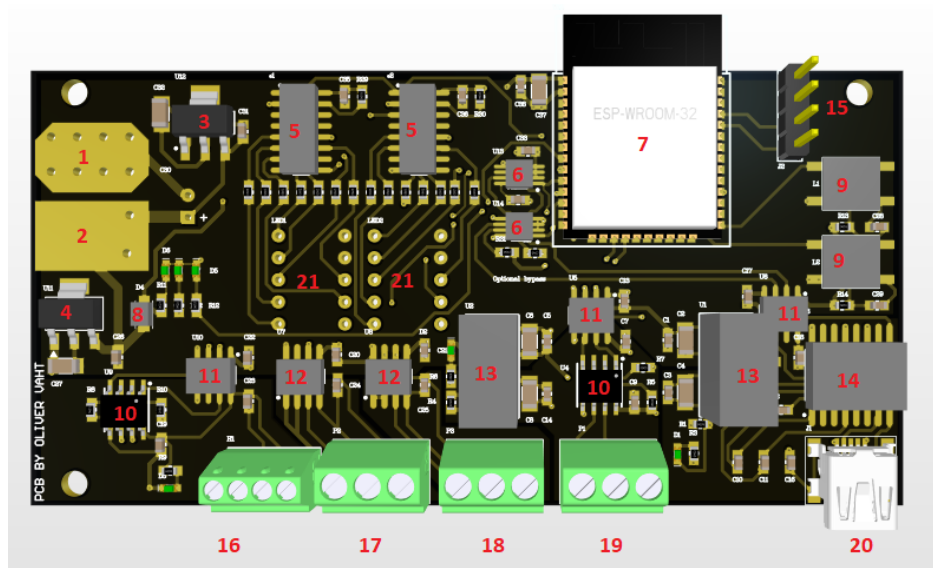
RS232-C puhul on nõuded samad, mis eelmisel. Valituks osutus MAX202IDWR [23] selle sobivuse ja kättesaadavuse põhjal. Lõputöö praktilise tegevuse ajal ei saadud vaakumsensoriga läbi RS232C standardi suhelda kuna vaakumsensor ei olnud saabunud ning juhtplaat loodi tulevikku silmas pidades. RS-232C sidestakse juhtplaadiga kasutades USB Mini pistikut. USB mini osutus valituks parema töökindluse tõttu.

Kõigi eeltoodud komponentide signaalid, mis on ühendatud MCUga tuli digitaalselt isoleerida. Digitaalne isoleerimine hoiab ära kogu süsteemi hävimise ühe alamsüsteemi riknemisel. Lisaks MCU GPIOga ühendatud digitaalsed isoleeritud signaalid hoiavad ära MCU hävimise/restardi tegemise pinge tõusu puhul(>3.3V). Digitaalsete isolaatorite abil saab muuta CMOS loogika TTL loogikaks. Digitaalse isoleerimise jaoks kasutati töös IC ISO7221AD [24], mis on kahe-suunaline digitaalne isolaator. Digitaalse isoleerimise jaoks tuleb isoleeritav pool panna eraldi toiteallikale. Selleks valiti ROE-1205S [14, lk 12], mis on DC/DC tüüpi konverter. Konverteeritakse 12V DC $\rightarrow$ 5V DC, mis on digitaalse isolaatori toitepinge. ROE-1205S maksimaalne väljundvool on 200mA, mis sobiv digitaalse isolaatori ja *RS485 to TTL UART* IC toiteks. Katkestuste monitoorimiseks kasutati ühesuunalist digitaalset isolaatorit nimega MAX22245BAWA.

Juhtplaadil asetsevad 7-segmendilised LED ekraane juhitakse jadasse ühendatud nihkeregistrite abil. Nihkeregistrite kasutamine aitab kokku hoida mikrokontrolleri I/O' de arvu. 7-Segmendilisel LED ekraanil hakatakse esitada temperatuuri vaakudestilatsiooninõus.



Joonis 5. Esimese põlvkonna trükkplaadi väljanägemine.



Joonis 6. Teise põlvkonna trükkplaadi väljanägemine.

Joonisel 6. kujutatud trükkplaadil on numbritega tähistatud järgnevad komponendid ja tähtsamad sisendid/väljundid:

1. GND;
2. +12V sisendpinge;
3. +5V pingeregulaator - LD1117S50TR;
4. +3.3V pingeregulaator - LD1117S33TR;
5. Nihkeregister - 74HCT4094;
6. Analooglüliti - TS5A3154DCUR;
7. Mikrokontroller - ESP-WROOM-32;
8. Schottky diood;
9. Programeerimise/taaslähestamise nupud;
10. RS485 vastuvõtja/saatja - MAX485CSA+T;
11. Kahesuunaline digitaalne isolaator - ISO7221AD;
12. Ühesuunaline digitaalne isolaator - MAX22245BAWA+;
13. 12 V $\rightarrow$ 5 V digitaalset isoleeritud pingeallikas - Recom Power ROE-1205S;
14. RS232 vastuvõtja/saatja - MAX202IDWR;
15. Programmeerimisliides;
16. Sisend/väljund juhtimisplaadiga suhtlemiseks;
17. Reservuaaride plaadilt informatsiooni saamiseks;
18. Eesmärk selgumisel vaakumdestillatsiooni aparatuuri edaspidises arengus;
19. Sisend/väljund EB1Ziga suhtlemiseks;
20. Sisend/väljund vaakumsensoriga suhtlemiseks.

Loodi kaks põlvkonda trükkplaate. Teise põlvkonna trükkplaadi eelised on: a) väiksemad mõõtmed; b) parem vastupidavus EMI'le; c) mõnest komponentidest möödahiilimise võimalus(inglise *bypass*); d) korpusele sobilikum disain; e) parandati esimese põlvkonna trükkplaadi vead.

Loodud elektriskeemi ja vase kihid leiab Lisa 1 ja Lisa 2 toodud joonistelt..

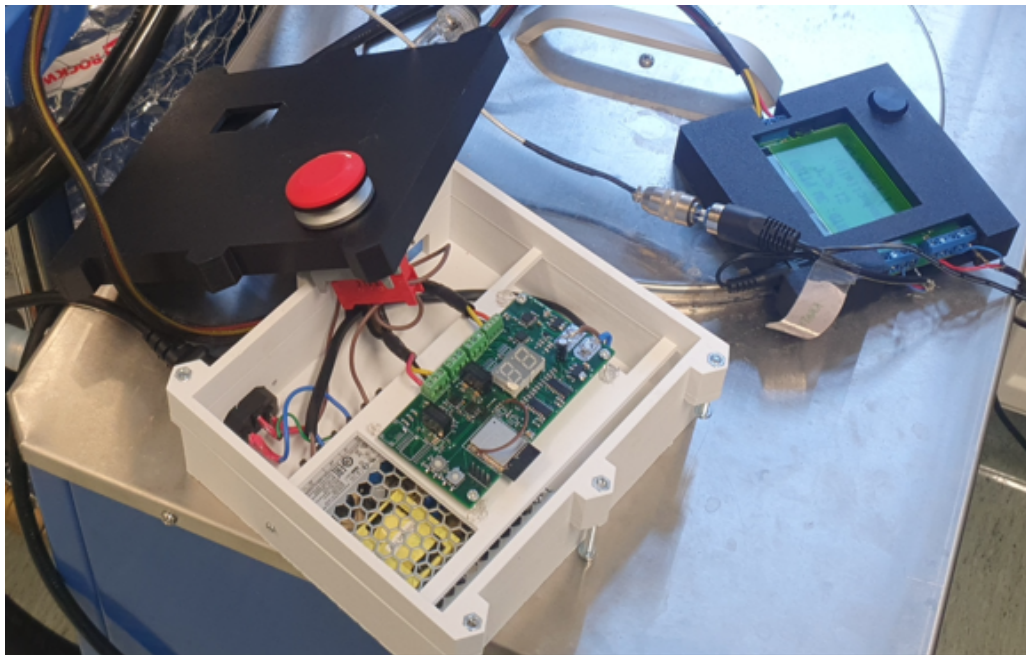
Võrreldes esimese põlvkonna plaadiga suurendati EMI'le vastupidavust teises generatsioonis: a) kondensaatorite lähemale asetamisega komponentidele; b) lisati maandatud läbiviike signaali läbiviikude juurde; c) vasekihtide virm tehti ümber (inglise *layer stack*) [25].

Juhtplaat töötab 12V sisendpingega. Sisendpinge loomiseks kasutatakse Mean Well toiteploki, mille võimsus on 35W [26]. Toiteploki võimsus on varuga.

4.2.3 Muu elektroonika ja korpuse arendus

Korpuse arendus oli vajalik toiteploki, elektroonikaplaadi jms seadmele kinnitamiseks. Korpuse disain peab olema modulaarne ja võimaldama ilma ümbertegemisteta täiendada. Lisaks peab olema tsentraalne ohutusnupp, mis lülitab kogu süsteemi välja. Selleks kasutatakse normaalselt suletut lüliti. Lüliti aktiveerimisel ühendatakse lahti toide toiteplokilt ja süsteemi töö seiskub - muudab süsteemi ohutumaks.

3D printimiseks jaoks pidi olema võimalikult vähe üleulatuvusi ja olema suur tugipind millelt korpuse osi printida. See annab parima sobivuse ja loodi järgnev joonisel 7. kujutatud disain:



Joonis 7. Loodud korpus koos paigaldatud juhtplaadiga

Rohkem informatsiooni korpuse modulaarsuse kohta leiab peatükist Lisa 3 toodud joonistelt..

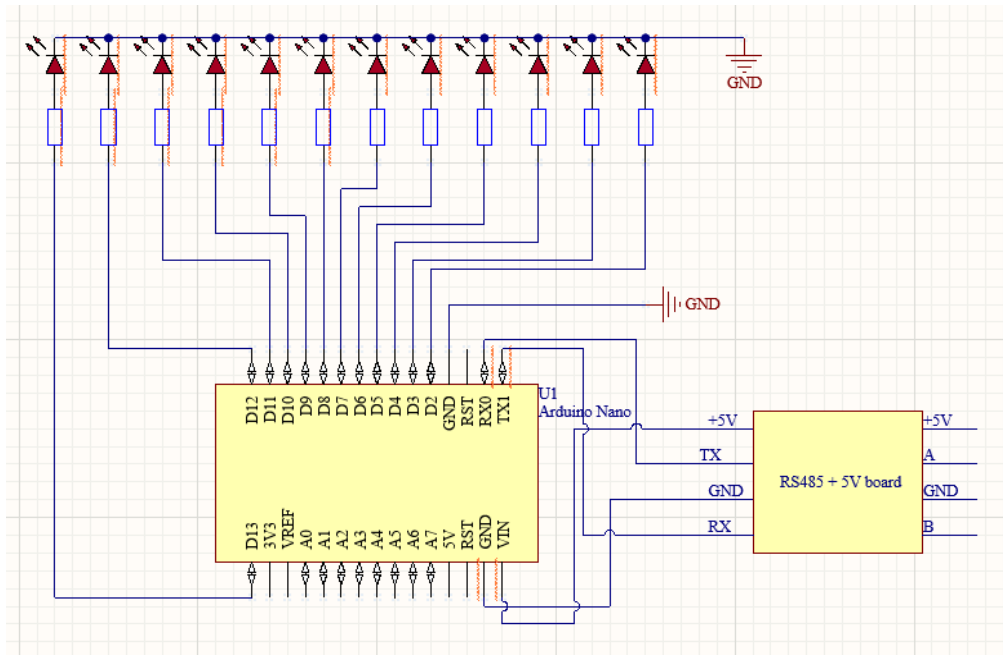
Proto-lülitusplaadi arendus oli vajalik vaakumdestillatsiooni algoritmika testimiseks. Kuna vaakumdestillatsiooni aparatuuri jaoks pole hetkel saadaval piisavas koguses solenoidklappe on tarvilik testplaat, millel hakatakse lülitama LEDe. LEDide süttimine/kustumine on hea indikatsioon sellest, kas teatud lülitus on toimunud või mitte. Joonisel 8. kujutatud solenoidklappi vaadates ei ole võimalik aru saada, kas see on avatud või suletud.



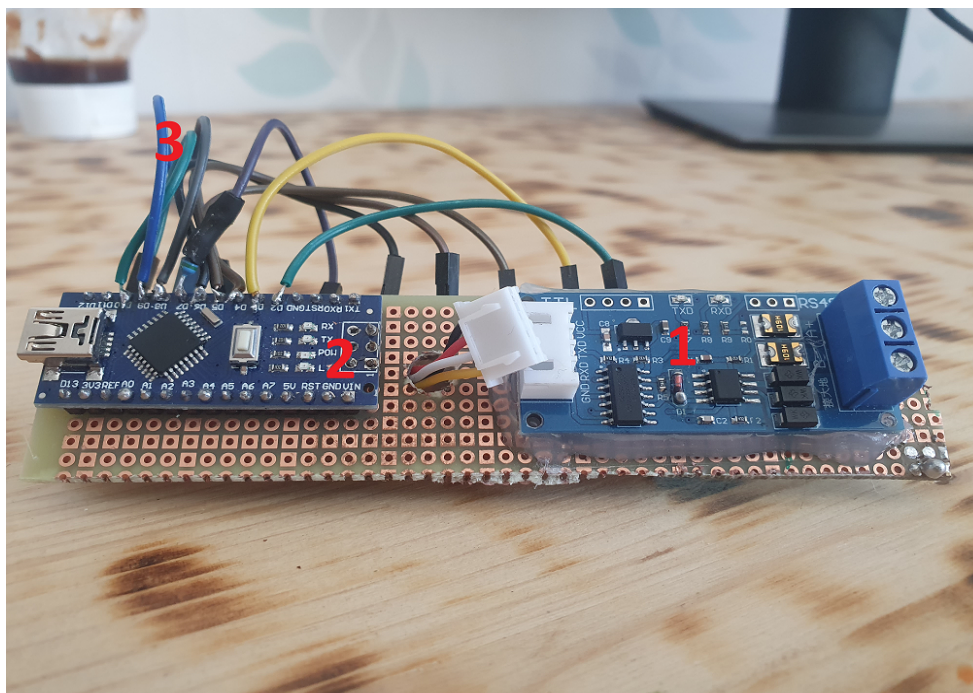
Joonis 8. Solenoid kinnises olekus.

Proto-lülitusplaadi infovahetus toimub RS485 standardit kasutades. RS485 muudetakse UARTiks UART TTL - RS485 konverter mooduli abil [27]. Saadud informatsiooni põhjal

pannakse põlema või kustutatakse LEDe. Joonisel 9. on välja joonistatud lihtsustatud skeem testplaadi elektriühendustest.



Joonis 9. Informatsiooni kättesaamine arduinosse ja viikude külge ühendatud LEDid



Joonis 10. Valminud proto-lülitusplaat

Joonisel 10. on tähistatud numbritega :

1. RS485 to UART TTL moodul;
2. Arudino nano;
3. Ühendused LEDidega.

4.3 Tarkvara arendus

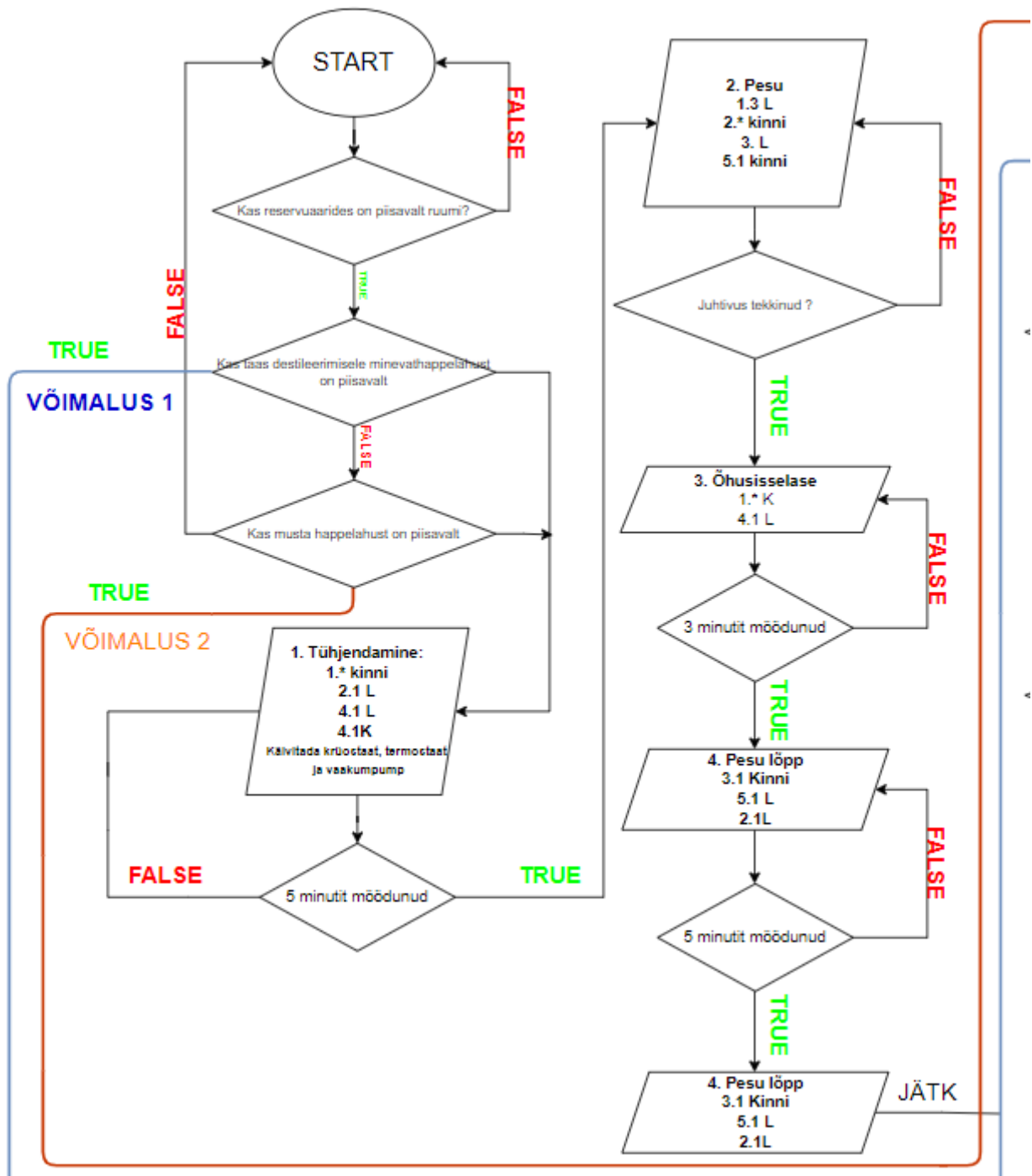
Tarkvara loodi Arduino programmeerimiskeskkonnas (versioon 1.8.19) [28], millele on lisatud ESP32 liides (versioon v2.0.3) [29]. ESP-WROOM32 programmeerimiseks kasutati UART to TTL programmaatorit, mis ühendati viigupeadega mikrokontrolleri kõrval. Mikrokontrolleri programmeerimisrežiimi panekuks on vajalik trükkplaadil asetsevate nuppude korrektne vajutus. Esmalt tuleb alla vajutada L2 ja seejärel L1 nupp (vaadata trükkplaadi skeemi).

4.3.1 Vaakumdestillatsiooni protsessi algoritm

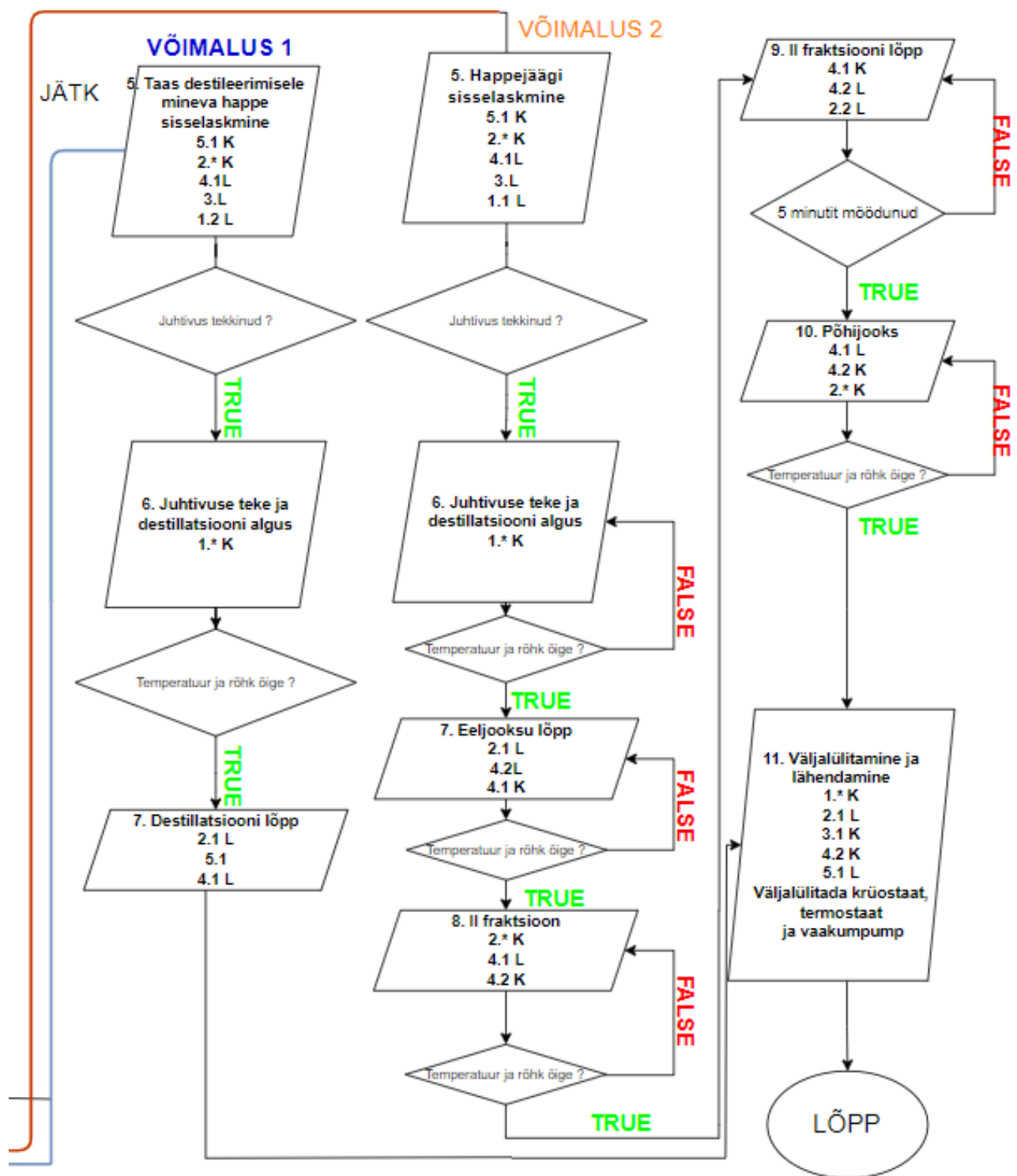
Antud bakalaureusetöö raames oli vaja luua vaakumdestillatsiooni protsessi juhtiv juhtplaat, siis ennekõike on tähtis teada kuidas vaakumdestillatsiooni protsess toimub. Millal mingid saadused tekivad, kui kaua mingi protsess toimub jne. Alltoodud algoritmi vooskeemiga on väljatoodud : a) vaakumdestillatsiooni etapid; b) otsustuskohad; c) tehtavad lülitused ja d) ooteajad. Tehtavad solenoidklappi lülitused on märgitud järgnevas formaadis "solenoidklapi number, seisund (**K**inni või **L**ahti)." Solenoidklappid on lülituse funktsionaalsuse põhjal tähistatud järgnevalt:

- 1.1 - Lähtehape;
- 1.2 - Taasdestileerimise minev hape;
- 1.3 - Vesi;
- 2.1 - Neutraliseerimisse;
- 2.2 - Taasdestileerimisse;
- 2.3 - Saadus;
- 3.1 - Vaakumpump;
- 4.1 - Kogumine/ Vastuvõtt;
- 4.2 - Atmosfäär;
- 5.1 - Äravool;

Parema ettekujutuse saab solenoidklappide ja nende seisundi kohta kolmandast alapunktist jooniselt 11. Vaakumdestillatsiooni protsessi algoritm on järgnev:



Joonis 11. Vaakumdestillatsiooni protsessi algoritm 1/2



Joonis 12. Vaakumdestillatsiooni protsessi algoritm 2/2

Lihtsustatuna joonistel 11-12 kujutatud algoritm toimib järgnevalt. Kontrollitakse kas vastuvõtjaga ühendatud reservuaarides on piisavalt ruumi ja hapet mida destilleerida. Kui on, siis pestakse destillatsiooninõu esmalt puhtaks (eelnevast destillatsioonist võis jääda sade põhja). Vastavalt, millist hapet destilleeritakse jaotub algoritm kaheks :

- Kui destilleeritakse happejääki, kogutakse fraktsioone happejäägile spetsiifiliselt.
- Kui destilleeritakse taas destilleerimisele minevat puhast hapet, siis algoritm toimib sellest lähtuvalt.

Mõlemad harud lõpetavad oma töö sama moodi. Lülitatakse välja masinad ja lähtestatakse. Antud algoritmi põhjal on kirjutatud programm vaakumdestilatsiooni juhtimiseks.

4.3.2 Andmehõive

Eeltoodud algoritmist on näha, et teatud etappidesse edasiminekuks on vaja temperatuuri, rõhu ja juhtivuse andmeid. Kuna hetkel ei ole vaakumsensor saabunud, siis selle osaga ei tegeleta.

Destillatsiooninõust temperatuuri ja juhtivuse informatsiooni kättesaamiseks on vajalik EB1Z plaadilt informatsiooni küsida [30]. Selleks tuleb saata EB1Z plaadile järgnev kirje "15 poll/n" , kus **15** tähistab EB1Z plaadil määratud aadressi, **poll** käsku mida täita ja **/n** käsu lõppu. Seepeale tagastatakse informatsioon kogu plaadi seadistuste kohta. Töö jaoks vajaliku informatsiooni leiab algusega "TEMP:" ja "conductivity:".

4.3.3 Suhtlus proto-lülitusplaadiga

Suhtlemiseks proto-lülitusplaadiga kasutatakse RS485 standardit. Mikrokontrolleri jadaport2 (*Serial 2*) on ühendatud läbi analooglüliti UART to RS485 IC külge. Mikrokontrolleri poolt saadetak andmestik peab olema proto-lülitusplaadile arusaadavas formaadis. Töös loodud programmi põhjal on mikrokontrolleri ja proto-lülitusplaadi vaheliseks suhtluseks vajalik 115200 baudine edastus- ja vastuvõtukiirus. Lisaks tuleb edastada proto-lülitusplaadile lülituste informatsioon järgnevas formaadis: %sLEDi number kahekohalisena, mida

väljalülitatakse%LEDi number kahekohalisena, mida sisselülitatakse%seadmete staatus (ON/OFF). Näiteks %01,02,03%04,12,10%ON. Eeltoodud näiteks lülitatakse välja LEDid tähistatud numbriga 1,2,3 ja lülitatakse sisse LEDid 4,12,10. Seadmete staatus on *ON*.

4.3.4 Veebiserver ja andmete edastamine

Võrguühenduse saamiseks kasutatakse Arduino <WiFi.h> teeki (versioon 1.2.7). See teek sobib kõigi Arduino poolt toetatavate mikrokontrollerite/protssessorite arhitektuuriga [31]. Esialgu hakatakse edastama veebiserveri abil destillatsiooninõus olevat temperatuuri ja juhtivussignaali olemasolu. Neid kriteeriumeid silmaspidades kasutatakse töös WebSeriali APId, mis sobib ESP32 ja ESP8266 arhitektuuriga [32]. WebSeriali APIsse saadetakse süsteemi oleku kohta informatsiooni iga sekundi tagant.

4.3.5 Passiivne monitoorimine ja signaalitöötlus

Aeg-ajalt võivad sensorite üksikud signaalid olla ebatäpsed juhusliku müra tõttu (kehtib eriti elektrijuhtivus sensori kohta). Et vältida müraste signaalide teravat mõju süsteemi otsustusprotsesside raames, kasutatakse töös probleemi vältimiseks andmete liikuvat keskmistamist. Kuna andmeid kogutakse iga 200 ms tagant ja lülitusi tehakse sekundi täpsusega on tarbekas kasutada liikuvaks keskmistamiseks akna suurus 5. Andmeid keskmistatakse passiivse monitoorimise käigus.

5 Testimine

Iga süsteemi toimimist on oluline kontrollida. Antud punktis antakse ülevaade läbiviidud testimistest veendumaks juhtplaadi ja sellega sidestuvate osade töö korrektsuses.

5.1 Andmehõive mooduli testimine

Joonisel 13. on esitatud skeem moodulile termopaari, juhtivuselektroodi ja juhtplaadi ühendamise kohta.



Joonis 13. Andmehõive mooduli ühendused[30]

Testiti juhtivuselektroodi ja temperatuuri kohta informatsiooni saamist ning juhtplaadiga suhtlemist. Juhtivuselektrood paigutati lämmastikhappe lahusesse ja kontrolliti signaali

stabiilsust 24h möödumisel. Testimise eesmärk oli tuvastada, et kas kestvuskatse raames hakkab signaal triivima. Testimise tulemusena selgus, et signaal ei hakka triivima isegi konsetreeritud lämmastikhappes..

Informatsioon temperatuuri kohta saadakse PT100 termistorilt. Ühendades EB1Z külge termistori saadi stabiilseid temperatuuri lugemeid, mis olid identsed vaakumdestilatsiooni aparatuuri küljes olev liidesest saadud väärtustega.

Juhtplaadiga suhtlus oli edukas. Kirje "15 poll /n" saatmisel, mis oma olemuselt on konkreetset tüüpi mõõteandmete küsimine, saabusid vastuseks oodatavad sensorite mõõteandmed.

5.2 Proto-lülitusplaat

Proto-lülitusplaadiga tehti järgnevad testid korrektsuse kinnitamiseks:

- kõigi LEDide vilgutamine;
- infovahetus RS485 standardit kasutades;
- saadava informatsiooni põhjal LEDide sisse- ja väljalülitamine.

Testide tulemused olid ootuspärased ja kinnitasid proto-lülitusplaadi töö korrektust.

5.3 Juhtplaadi elektroonika testimine

Elektroonika testimise raames tehti järgnevad kontrollid:

- mikrokontroller on programmeeritav;
- 3.3V ja 5V pingeregulaatorid töötavad;
- digitaalsed isolaatorid töötavad;
- isoleeritud DC/DC muundur töötavad korrektselt;
- nihkeregistrid töötavad ja võimaldavad 7-segmendilisele ekraanile kuvada informatsiooni.

Mikrokontrollerile sai üleslaadida püsivara. Selleks tuli vajutada alla nupud, mis viis mikrokontrolleri programmeeritavasse olekusse.

Testriga mõõtes olid pingeregulaatorite väljunditel oli korrektsed pinge väärtused.

Ossiloskoobiga mõõtes mikrokontrolleri poolt saadetak signaal digitaalse isolaatori sisend viigule väljus korrektselt digitaalse isolatsiooni poolelt.

Isoleeritud DC/DC muundur korrektselt toimimisest indikeerib seotud komponentide töötamine.

Nihkeregistrid toimivad korrektselt. Nihkeregistrisse saadeti binaaris arv 0b11111111, mis pani nihkeregistrite viigud kõrgeks.

7-Segmendiline LED ekraan ei tööta korrektselt. Selle põhjuseks on ekslikult tellitud vale komponent, mis ei sobitu trükkplaadil olemasoleva konfiguratsiooniga.

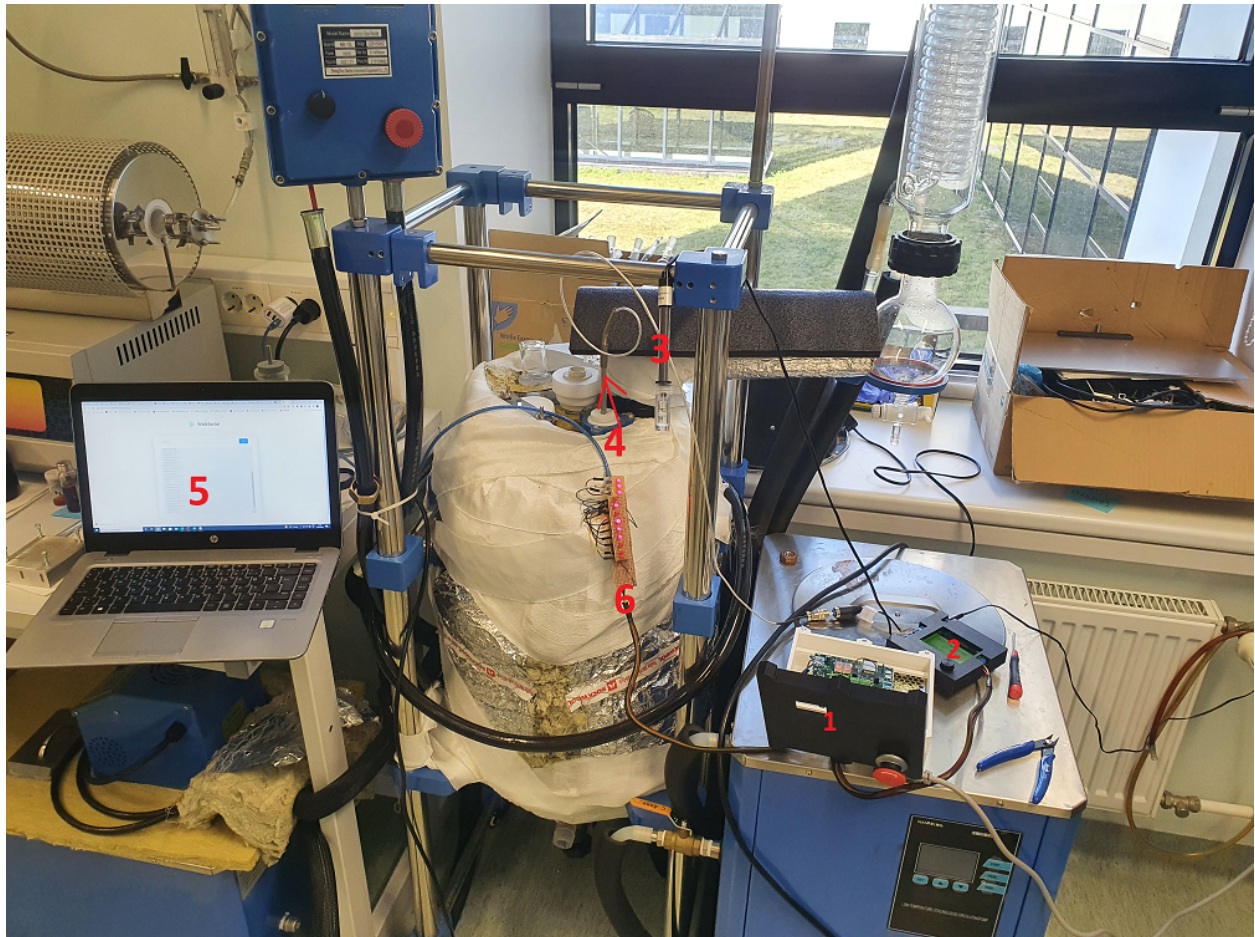
5.4 Tarkvara testimine

Tarkvara testimise raames on tehtud järgnevad kontrollid:

- Ühendus võrguga ja üle võrgu infovahetus;
- Vaakumdestillatsiooni algoritmi täitmine;
- Võrguühenduse katkemisel taasühendamine;

Kõik tarkvaralised testimised tehti ühe suure testimise käigus. Mikrokontroller saatis üle võrgu arvutisse WebSeriali informatsiooni, mis kattus andmehõive moodulil nähtuga (sama temperatuur ja juhtivuse kontroll). Ruuteri töö katkestamisel ja tagasi töölepanekul ühendus mikrokontroller taas end võrguga.

5.5 Üldine testimine



Joonis 14. Süsteemi üldine testimine.

Eeltoodud joonisel 14. on ära märgitud järgnevad süsteemi osad, mida kasutatakse ühes testimises:

1. Juhtplaat korpuses
2. Andmehõive moodul
3. Juhtivuselektrood (küllastunud NaCl lahuses)
4. Destillatsiooninõus asetsev PT100 termistor
5. Informatsiooni vastuvõttev arvuti

6. Proto-lülitusplaat

Üldise testimise käigus veenduti üksikute testide tulemuste korrektsust ühendatuna kogu süsteemiga. Süsteemi üldise testimise käigus ei leitud puudujääke süsteemi toimimises.

Kokkuvõte

Bakalaureusetöö raames tutvustati lämmastikhappe jääkide kasutamisel tekkivate jääkide utiliseerimise ja taaskasutamise võimalusi kirjanduse andmete põhjal. Käesoleval ajal taastoodetakse lämmastikhappe jääkidest vastavat hapet ainult suuremahuliste tööstusprotsesside korral. Väiksemate mahtude puhul rakendatakse enamasti jääkide kohest utiliseerimist, mis seisneb nende neutraliseerimises ja järgnevalt heitvee süsteemi juhtimises. Selline lähenemine on nii keskkonna kui ka majanduslikus mõttes ebaratsionaalne.

Väiksemas mahus tekkivate lämmastikhappe jääkide taaskasutamisel on väga huvipakkuvaks võimaluseks reageerimata happe eraldamine ja selle kontsentratsiooni tõstmine vaakumdestillatsiooni abil. Selline meetod on eelkõige huvipakkuv ohutuse aspektist, sest destilleerimisel saab kasutada nii jahutus- kui ka kuumutus vedelikuna vett ja keemine toimub oluliselt madalamal temperatuuril võrreldes normaalarõhul toimuva protsessiga.

Lämmastikhappe jääkide vaakumdestillatsiooni protsess on mõistlik läbi viia tsükliliselt, kuid samas seda maksimaalselt automatiseerides. Sellel eesmärgil töötati arendati välja optimaalne protsessi algoritm, mille põhjal koostati detailne juhtimisskeem. Viimase realiseerimiseks on vaja lülitada sisse seadmed, mõõta sensorite andmed ja nende alusel viia läbi solenoidklappide lülitused.

Skeemi realiseerimiseks loodi vajalik juhtplaat, mis suhtleb alamsüsteemidega informatsiooni saamiseks ja käskluste täitmiseks. Saadud informatsioon töödeldakse mikrokontrolleris (toimub andmete keskmistamine) ja saadetakse üle võrgu, et vajadusel monitoorida üle võrgu destillatsiooninõus olevaid tingimusi. Andmeid monitooritakse pidevalt, et süsteem oleks ohutum ja vigadele reageeritakse kiirelt. Töö praktilises osas loodud juhtplaat täitis ettenähtud nõuded ja selle toimimine tõestati reaalse prototüüp-süsteemi küljes.

Tänuavaldused

Ma soovin tänu avaldada :

oma juhendajale ja Urmas Johansonile kes tutvustasid mulle teadusmaailma, andsid nõu ja aitasid.

AS Sporrong Eesti ja Saaremaa vallale, kes toetasid bakalaureusetöö valmimist.

Kirjandus

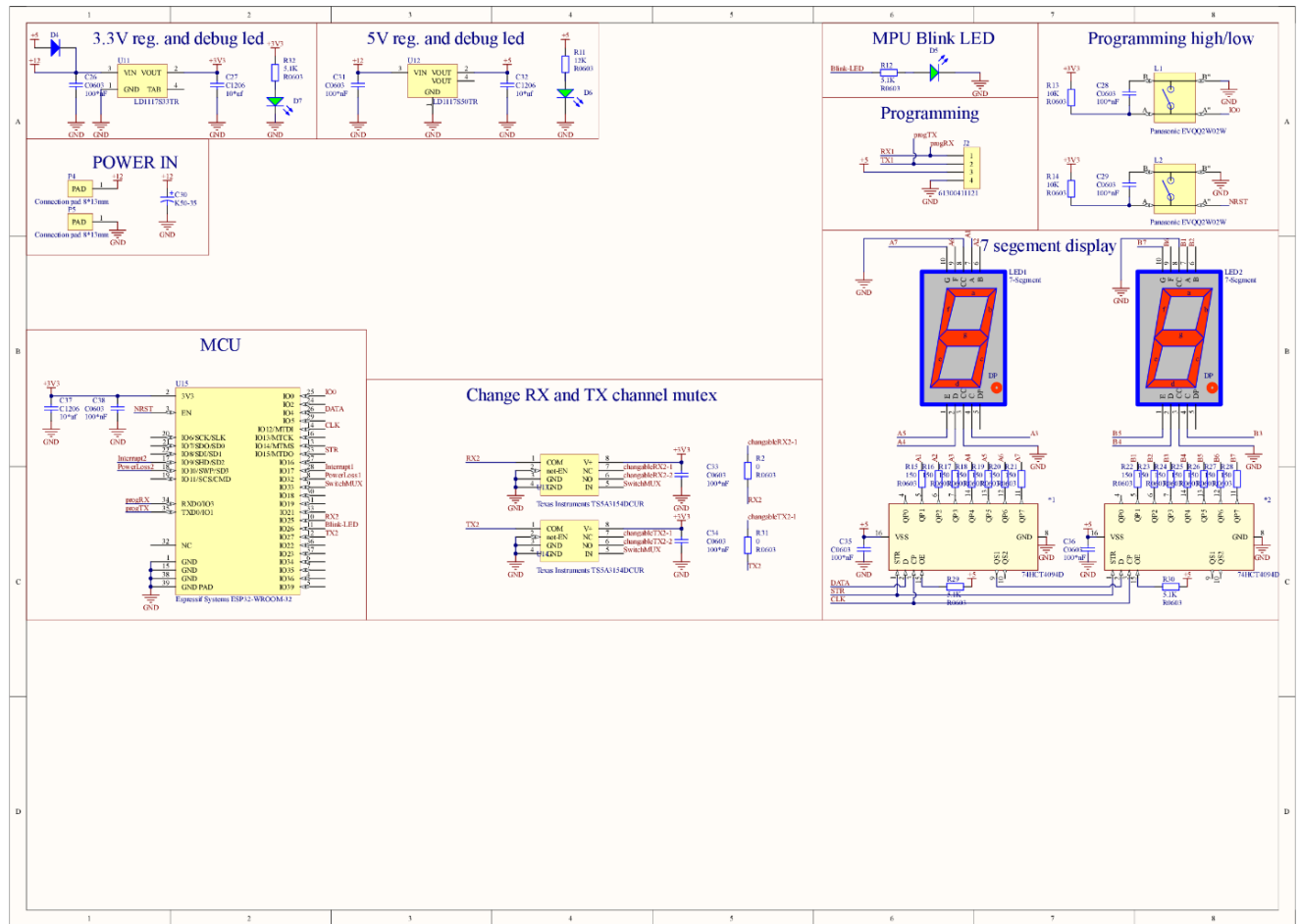
- [1] R. H. Perry ja D. W. Green, Toim, *Perry's chemical engineers' handbook*, 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2008.
- [2] S. I. Clarke, W. J. Mazzafrro, ja Updated by Staff, „Nitric Acid“, *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, John Wiley & Sons, Inc., Toim Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005, lk 1409201803120118.a01.pub2. doi: 10.1002/0471238961.1409201803120118.a01.pub2.
- [3] L. F. Jô, R. Marcus, ja O. Marcelin, „Nitric acid recycling and copper nitrate recovery from effluent“, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, kd 21, nr 11, lk 6975–6981, juuni 2014, doi: 10.1007/s11356-014-2724-z.
- [4] „Nitric acid treatment“. <https://www.dedietrich.com/en/solutions-and-products/mineral-acid-treatment/nitric-acid-treatment> (vaadatud 12. mai 2022).
- [5] V. Lemmiksoo, D. Rist, A. Kivirüüt, ja T. Tenno, „Tööstusreovee käitlemise juhend“, 2020. Vaadatud: 18. aprill 2022. [Online]. Available at: <https://evel.ee/wp-content/uploads/2020/11/Toostusreovee-kaitlemise-juhend.pdf>
- [6] „Olemaolevad tööstusautomaatika lahendused“. <https://www.sakt.ee/et/> (vaadatud 12. mai 2022).
- [7] „Olemaolevad tööstusautomaatika lahendused“. <https://www.tme.eu/> (vaadatud 12. mai 2022).
- [8] „Chip shortage recovery may not happen until 2023, auto industry forecast says“, 2021. <https://www.cnet.com/roadshow/news/chip-shortage-recovery-automakers-forecast/> (vaadatud 18. aprill 2022).
- [9] „Farnell“. <https://ee.farnell.com/> (vaadatud 18. aprill 2022).
- [10] „Juhtivuselektroodi spetsifikatsioon“. https://www.alibaba.com/product-detail/DJS-1C-Conductivity-electrode-platinum-black-_60537371874.html (vaadatud 12. mai 2022).
- [11] „The Cell Potential - Chemistry LibreTexts“. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Supplemental_Modules_\(Analytical_Chemistry\)/Electrochemistry/Voltaic_Cells/The_Cell_Potential](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Supplemental_Modules_(Analytical_Chemistry)/Electrochemistry/Voltaic_Cells/The_Cell_Potential) (vaadatud 14. mai 2022).
- [12] „IMS Labrois kogutud eksperimentaalsed andmed“, märts 2022.
- [13] H. Zumbahlen ja Analog Devices, inc, Toim, *Linear circuit design handbook*. Amsterdam ; Boston: Elsevier/Newnes Press, 2008.
- [14] „Conductivity Theory and Practice“. <https://www.tau.ac.il/~chemlaba/Files/Theoryconductivity.pdf> (vaadatud 14. mai 2022).
- [15] „Happekindel vaakumsensor“. <https://www.vacuubrand.com/en/page936.html> (vaadatud 12. mai 2022).
- [16] „SOLIDWORKS“. <https://www.solidworks.com/> (vaadatud 12. mai 2022).
- [17] „Free PCB Design Software | CircuitMaker“. <https://circuitmaker.com/> (vaadatud 12. mai 2022).

- [18] „ESP-12F, WiFi Module Based on ESP8266, Built-in 32Mbit Flash, SMD22 Package“. <https://www.waveshare.com/esp-12f.htm> (vaadatud 14. mai 2022).
- [19] „ESP32 Technical Reference Manual“. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf (vaadatud 12. mai 2022).
- [20] „Esp8266 Remote Serial Port Wifi Wireless Module Through Walls Wang Esp-12f - Integrated Circuits - AliExpress“. https://www.aliexpress.com/item/1005003238581133.html?dp=a9dc778c272042d3214cf06ae1dde26e&af=1711151&cv=47843&afref=https%3A%2F%2Ffanazar.com&mall_affr=pr3&utm_source=admitad&utm_medium=cpa&utm_campaign=1711151&utm_content=47843&dp=a9dc778c272042d3214cf06ae1dde26e&af=1711151&cv=47843&afref=https%3A%2F%2Ffanazar.com&mall_affr=pr3&utm_source=admitad&utm_medium=cpa&utm_campaign=1711151&utm_content=47843&aff_fcid=c6893787712643d39f3b0598c08d7458-1652547202064-04735-_ePNSNV&aff_fsk=_ePNSNV&aff_platform=portals-tool&sk=_ePNSNV&aff_trace_key=c6893787712643d39f3b0598c08d7458-1652547202064-04735-_ePNSNV&terminal_id=0cd580e4d87d4e54ba867dc8e4c7b0fc&afSmartRedirect=y (vaadatud 14. mai 2022).
- [21] „ESP 32S ESP WROOM 32 ESP32 ESP 32 Bluetooth and WIFI Dual Core CPU with Low Power Consumption MCU ESP 32|bluetooth mcu|bluetooth powerbluetooth bluetooth - AliExpress“. https://www.aliexpress.com/item/32763354928.html?spm=a2g0o.order_list.0.0.309e1802qLB2xp (vaadatud 14. mai 2022).
- [22] „MAX485CSA+T - Maxim Integrated / Analog Devices - Transceiver RS422, RS485, 4.75V-5.25V supply“. <https://ee.farnell.com/maxim-integrated-products/max485csa-t/rs422-rs485-txrx-2-5mbps-5-25v/dp/2512123> (vaadatud 12. mai 2022).
- [23] „MAX202IDW . - Texas Instruments - Transceiver RS232, 2 Drivers, 4.5V-5.5V supply“. <https://ee.farnell.com/texas-instruments/max202idw/line-driv-rcvr-rs232-120kbps-soic/dp/2335477> (vaadatud 12. mai 2022).
- [24] „ISO7221AD TEXAS INSTRUMENTS - IC: interface | digital isolator; 1Mbps; 3÷5.5VDC; SMD; SO8; Ch: 2 | TME - Elektroonilise osad“. <https://www.tme.eu/ee/details/iso7221ad/integraallulitused-muud-kasutajaliid/texas-instruments/> (vaadatud 12. mai 2022).
- [25] M. van Doorn, „Radiated emission from signal traces changing reference planes“, *2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Gothenburg, sept 2014, lk 709–712. doi: 10.1109/EMCEurope.2014.6930996.
- [26] „Toiteplokk 12VDC 3A 35W IP20 Mean Well - Oomipood“. https://www.oomipood.ee/product/lrs_35_12_toiteplokk_12vdc_3a_35w_ip20_mean_well?q=toiteplokk (vaadatud 12. mai 2022).
- [27] „UART TTL to RS485 Two-way Converter Module [TTL-RS485-Module] - US \$2.80 : HAOYU Electronics : Make Engineers Job Easier“. <https://www.hotmcu.com/uart-ttl-to-rs485-twoway-converter-module-p-267.html> (vaadatud 15. mai 2022).
- [28] „Software | Arduino“. <https://www.arduino.cc/en/software> (vaadatud 15. mai 2022).

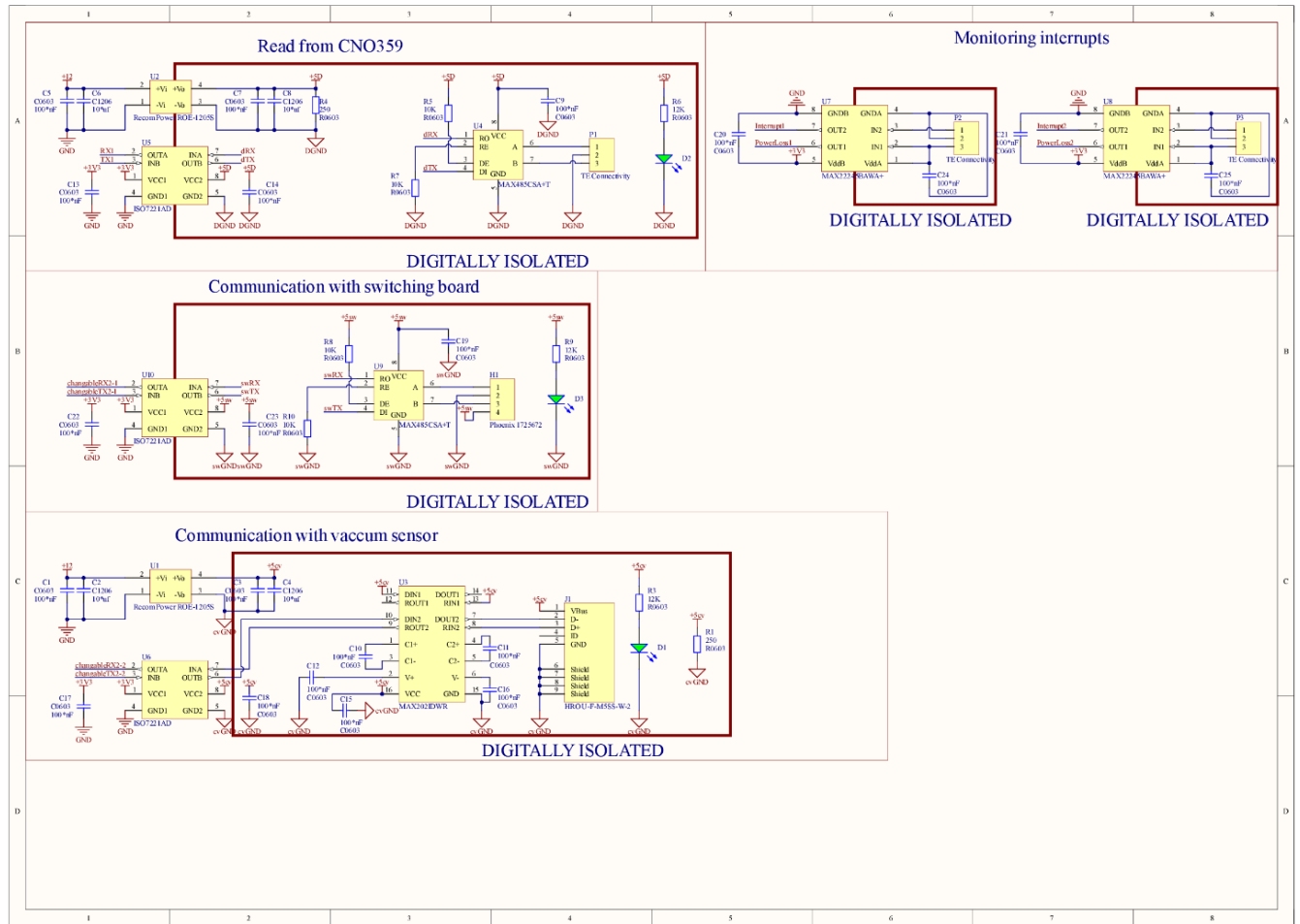
- [29] *Arduino core for the ESP32, ESP32-S2, ESP32-S3 and ESP32-C3*. Espressif Systems, 2022. Vaadatud: 12. mai 2022. [Online]. Available at:
<https://github.com/espressif/arduino-esp32>
- [30] „CN0359 Conductivity Measurement System User Guide [Analog Devices Wiki]“. <https://wiki.analog.com/resources/eval/user-guides/circuits-from-the-lab/CN0359> (vaadatud 15. mai 2022).
- [31] „WiFi - Arduino Reference“. <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/wifi/> (vaadatud 16. mai 2022).
- [32] „WebSerial - Arduino Reference“. <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/webserial/> (vaadatud 16. mai 2022).

Lisad

Lisa 1 Juhtplaadi 2. versiooni elektriskeem

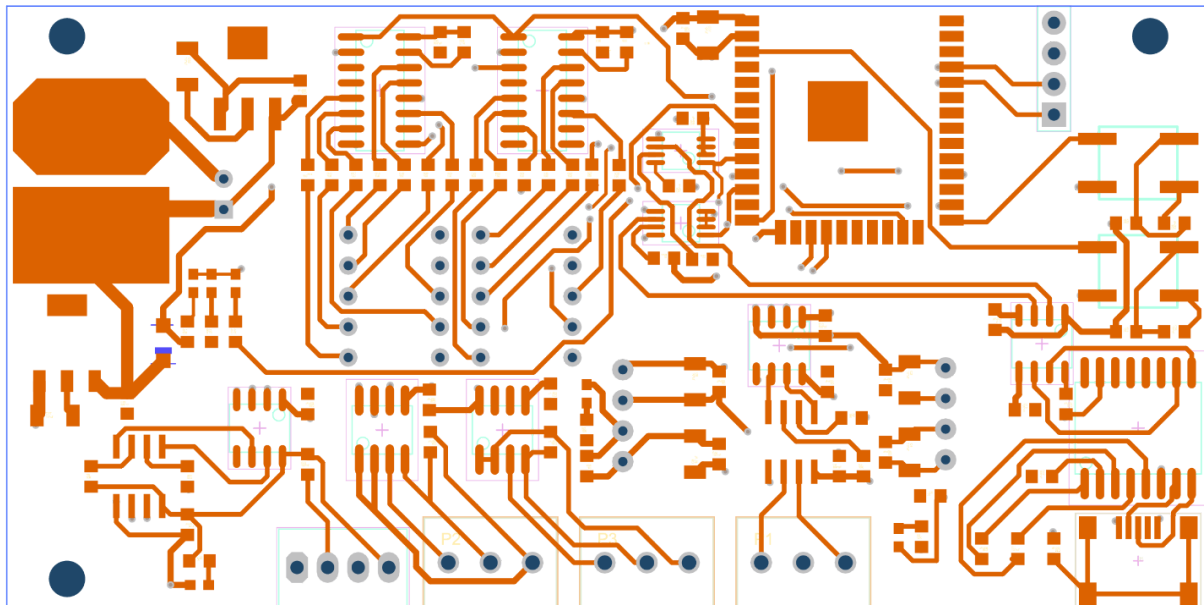


Joonis 15. Juhtplaadi elektriskeem 1/2

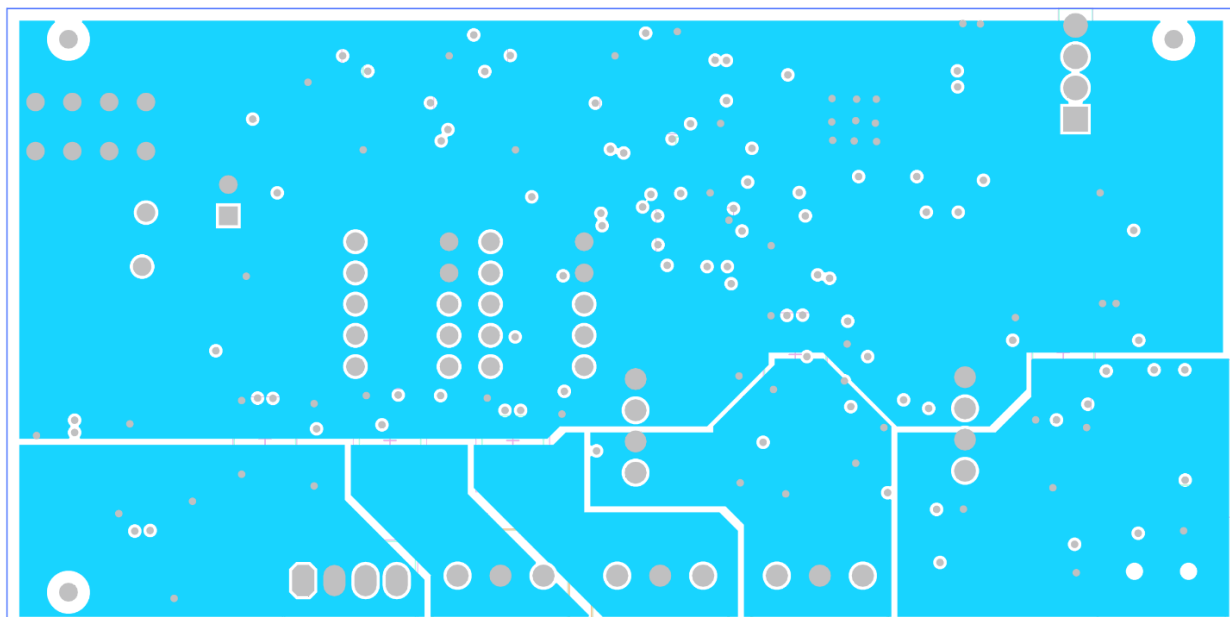


Joonis 16. Juhtplaadi elektriskeem 2/2

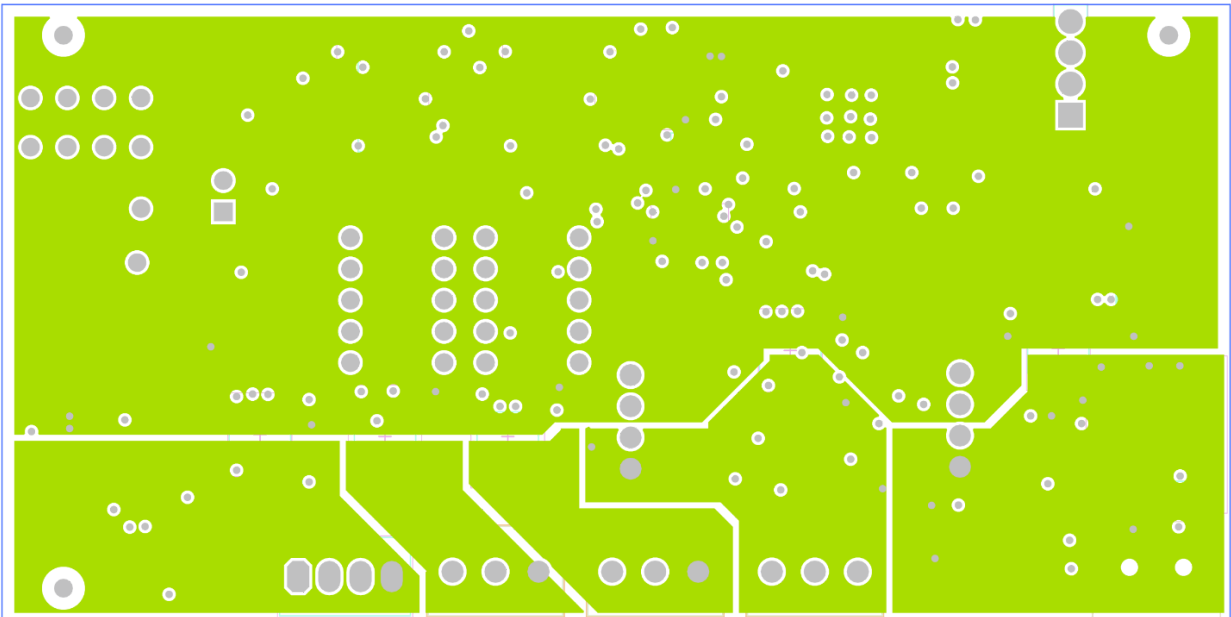
Lisa 2 Juhtplaadi 2. versiooni vasekihid



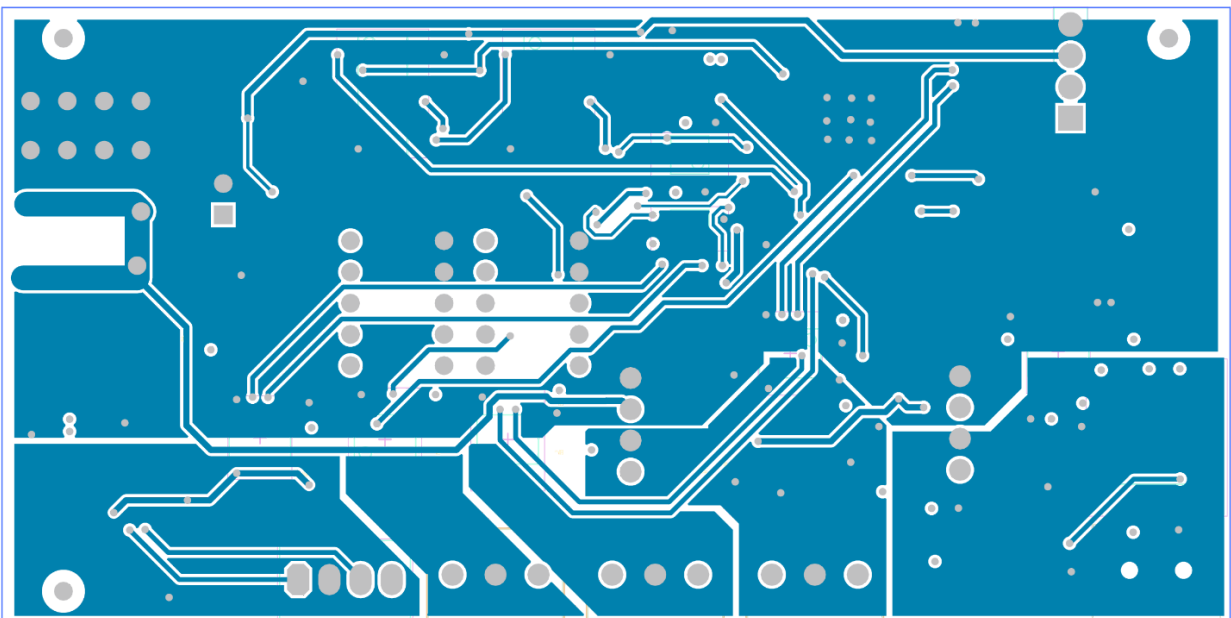
Joonis 17. Vasekiht I



Joonis 18. Vasekiht II

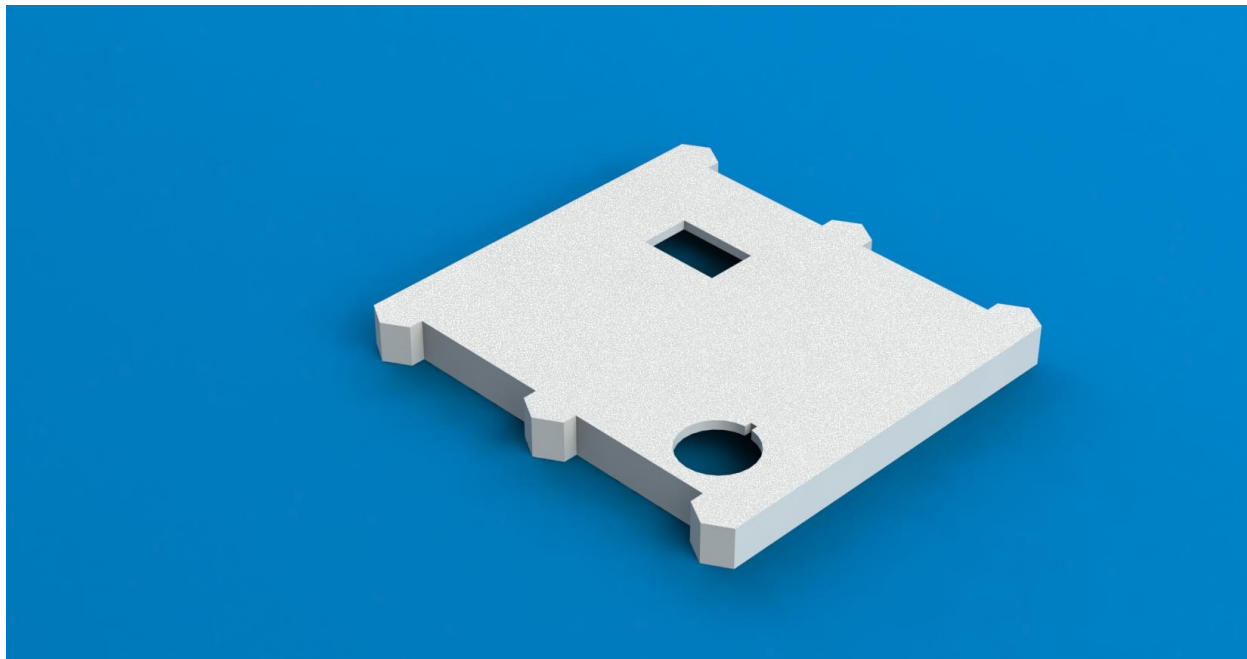


Joonis 19. Vasekiht III

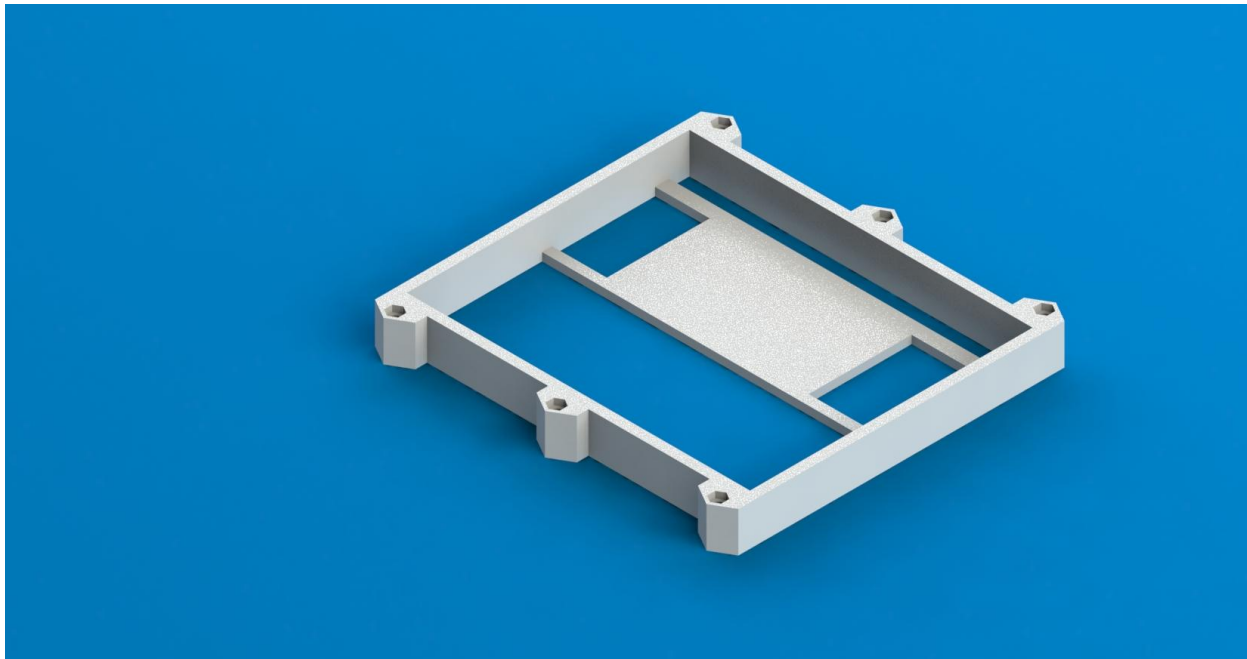


Joonis 20. Vasekiht IV

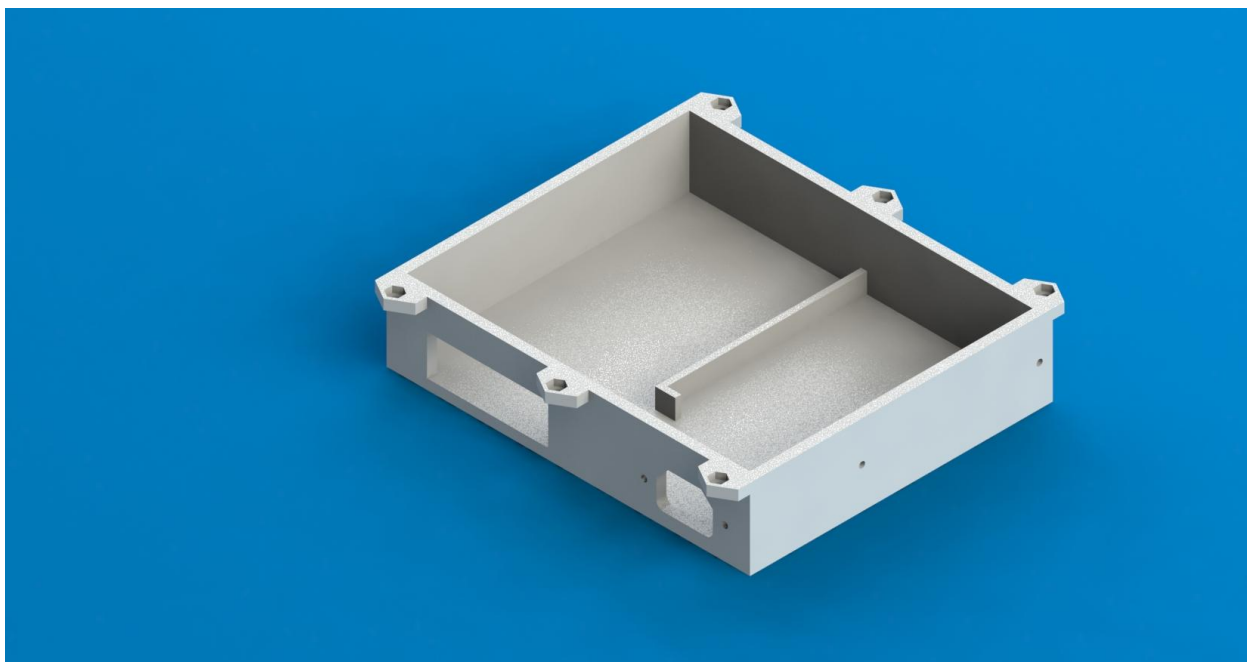
Lisa 3 Korpuse mudel



Joonis 21. Korpuse kaane osa



Joonis 22. Korpuse trükkplaadi hoidja osa



Joonis 23. Korpuse juhtmestiku ja toiteploki osa

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Oliver Vaht,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose "Lämmastikhappe taaskasutussüsteemi juhtplaadi prototüübi loomine", mille juhendaja on Tarmo Tamm, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Oliver Vaht

20.05.2022