

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Tehnoloogiainstituut

Marcus-Oliver Jaaniste

LoRa'l põhinev kaugjuhtimis- ja kontrollisüsteem taimekasvatuses

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendajad:

nooremteadur Jaanus Kalde
kaasprofessor Heiki Kasemägi

Tartu 2024

Resüme

LoRa'l põhinev kaugjuhtimis- ja kontrollisüsteem taimekasvatuses

Efektiivse tootmise saavutamiseks kasutatakse aina rohkem automatsioonisüsteeme tootmisprotsesside jälgimiseks või nende automatiseerimiseks. Põllumajandussektoris tegutsevatele väiketootjatele on olemasolevad lahendused puudulikud või puuduvad täielikult. Töö käsitleb nende lahenduste uurimist, puudujääkide väljatoomise ja lahendamise ning kasutajanõudeid rahuldava süsteemi arenduse ning realiseerimisega. Töö tulemusena ehitati valmis laiendusvõimeline süsteem, mis pakub taimekasvatuse automatsioonilahendust väiketootjatele. Lahendus koosneb keskserverist ja kontrollerist. Keskserver on võimeline koguma andmeid mitmelt kasvualalt ning pakub kasutajale andmete kuvamiseks ning kastmise seadistamiseks tarkvaraliidest. Kasvualadel paiknev kontrollerseade võimaldab taimekasvatajatel automatiseerida taimede kastmist kasvualalt kogutud andmete põhjal. Kontrollerseade on sõltumatu olemasolevast sidevõimekusest või vooluvõrgust. Seade saab toidet akudelt, mida laetakse päikesepaneelidega. Kommunikatsiooniks kasutatakse LoRa-modulatsiooniga raadiotransiiverit.

CERCS: T120 Süsteemitehnoloogia, arvutitehnoloogia; T125 Automatiseerimine, robotika, juhtimistehnika; T170 Elektroonika; T420 Põllumajandustehnika, põllumajandusmasinad, põllumajanduslike hoonete ehitus

Märksõnad: taimekasvatus automatsioon, kaugjuhitavus

LoRa based remote observation and control system in agriculture

To ensure effective production automation systems are being widely adopted in production industries for system monitoring and process automation. Available solutions for smallproducers in the agriculture industry are not suitable or have limitations on usability. The thesis deals with the review of existing solutions, their limitations and potential solutions. The goal is to develop and build a system that would satisfy the end user requirements for such a system. As a result a system was built that offers automation solutions in plant growth processes for smallproducers. The solution is comprised of a central server and a controller device. The central server is capable of collecting data from multiple controllers and offers the user the ability to view the data and configure irrigation. The controller resides in the plant growth area and ables the user to automate the irrigation based on the collected data. The controller can function independent of existing mains power or communication infrastructure. The device is battery powered and recharged by solar panels. For communication a LoRa capable radiotransceiver is used.

CERCS: T120 Systems engineering, computer technology; T125 Automation, robotics, control engineering; T170 Electronics; T420 Agricultural engineering, agricultural machines, farm-

house construction

Keywords: plant growth automation, remote control

Sisukord

Resümee	2
Jooniste loetelu	6
Tablelite loetelu	7
Lühendid, konstandid, mõisted	8
1 Sissejuhatus	9
2 Olemasolevad lahendused	10
2.1 Tööstuslikud lahendused	10
2.2 Lahendused hobiaednikele	10
2.3 Avatud lähtekoodiga ja riistvaraga lahendused	11
3 Nõuded	12
3.1 Kasutusjuhud	12
3.2 Süsteeminõuded	12
3.3 Riistvaranõuded	13
4 Lahenduse disain	14
4.1 Riistvara disain	14
4.1.1 Süsteemi energiatarbe kaalutlused	14
4.1.2 Päikesepaneeli reguleerimine ja aku haldussüsteem	15
4.1.3 Raadio	15
4.1.4 Energia efektiivne disain	16
4.1.5 Mikrokontroller ja sensorid	16
4.2 Teoreetiline energiatarve	17
5 Tarkvara	19
5.1 Kontroller ja raadiomoodul	19
5.1.1 Kontroller	19
5.1.2 SX1262 transiiveri kasutus	20
5.2 Keskserver	20
6 Tulemused	21
6.1 Aku laadimine	21
6.2 Süsteemi energiatarve	21
6.3 Raadio suhtlus	22
6.4 Süsteemi kasutus	22

6.5 Järeldused	22
7 Edasiarendus	24
8 Kokkuvõte	25
Kokkuvõte	25
Viited	28
Lisad	30
A Töö repositoorium	31
B BOM	32
C Plaatide skeemid ja disainijoonised	34
Lihlitsents	40

Jooniste loetelu

4.1	Lahenduse arhitektuur	15
4.2	Riistvara arhitektuur	18
5.1	Tarkvara arhitektuur	19
8.1	Lahenduse riistvara	25
8.2	Juhtimistarkvara	26
C.1	Kontrolleri MCU	35
C.2	Transiiver	35
C.3	Pinge reguleerimine	36
C.4	Aku/Päikesepaneeli haldus	36
C.5	Sensorid/Väljundid	37
C.6	Raadiomooduli MCU	37
C.7	Kontrolleri esikülg	38
C.8	Kontrolleri tagakülg	38
C.9	Raadiomooduli plaat	39

Tablelite loetelu

4.1	Seadme pidev energiatarve (24h lõikes)	17
4.2	Seadme energiatarve erinevates olekutes (24h lõikes)	17
6.1	Seadme reaalne energia tarve erinevates olekutes	21
6.2	Raadiosuhtluse ulatus erinevates keskkondades	22
B.1	BOM	32

Lühendid, konstandid, mõisted

- LoRa** - *Long Range*, patenteeritud raadiosignaali moduleerimise meetod;
- MCU** - *Microcontroller*, ühe kiibi peal olev keskprotsessor koos mälu ja perifeeriaga;
- SPI** - *Serial Peripheral Interface*, jadaliides perifeeria seadmetega suhtlemiseks;
- ADC** - *Analog to Digital Converter*, süsteem analoog signaalide digitaliseerimiseks;
- I2C** - *Inter-Integrated Circuit* litsenseeritud kahejuhtmeline jadaliides perifeeria seadmetega suhtlemiseks;
- USB** - *Universal Serial Bus*, universaalne kommunikatsiooni liides;
- MOSFET** - *Metall Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*, väljatransistor, mida juhitaks värati pingestamisega;
- dBm** - *decibel per milliwatt*, absoluutne mõõtühik millega võrreldakse võimendite võimsust, ehk mitu detsibelli võimendust millivatti kohta;
- IO** - *Input/Output*, seadme võimekus võtta signaali sisendina või väljundina
- IoT** - *Internet of Things*, asjade internet, ehk väikeseadmete (manusüsteemide) osalus võrgusuhtluses;
- LoRaWAN** - *Long Range Wide Area Network*, võrguarhitektuur mida kasutavad LoRa modulatsiooniga raadioseadmed;
- HAL** - *Hardware Abstraction Layer*, programmikoodi osa mis abstraherib riistvaraga suhtlemise;
- RSSI** - *Received Signal Strength Indicator*, raadio vastuvõtja poolt nähtud signaali võimsus;
- Ling budget** - lingi bilanss, meetod raadiosuhtluses esivate signaali võimenduste ja kadude hindamiseks
- BW** - *Bandwidth*, ribalaius, mis raadiosides viitab signaali sagedusmodulatsiooni sageduslaiusele;
- SF** - *Spreading Factor*, *spread spectrum* raadio signaali puhul sageduse muutuse kiirus;
- CV-CC** - *Constant Voltage - Constant Current*, meetod liitiumioon aku laadimiseks;
- MPPT** - *Maximum Power Point Tracking*, meetod päikesepaneelist saadud voolu reguleerimiseks, et saavutada maksimaalse võimsus;
- BMS** - *Battery Management System*, skeem, mis tegeleb aku turvaliselt laadimisega;
- CRC** - *Cyclic redundancy check*, meetod vigaste andmepakettide tuvastamiseks;

1 Sissejuhatus

Maailma elanikkonna kasv ning pidevalt suurenevad tarbimisharjumused nõuavad aina suurenevat toidu tootmise võimekust [1]. Lisaks harjumuste muutmisele ning toidu raiskamise vähendamisele on vajadus arendada süsteeme, mis parandaksid toidutootmisprotsesside efektiivsust ja jätkusuutlikust.

Nutistu ehk asjade interneti (inglise keeles *Internet of Things* [2]) lahenduste kasutus on põllumajanduses läbi aastate pidevalt kasvanud ning prognoositud kasvama edasi [3]. Samuti on IoT-lahenduste kasutamine antud valdkonnas aina rohkem populaarsust koguv meetod tootmisprotsesside optimeerimiseks ning kulude vähendamiseks. Lahendusi saab kasutada süsteemide ja keskkondade jälgimiseks ning andmeanalüüsiks, mille läbi suudetakse jooksvalt tuvastada probleeme ja tootmise pudelikaelu, mida ei suudetud ette näha süsteemide loomise ajal. Samuti suudavad lahendused kogutud andmete põhjal langetada otsuseid ning läbi füüsiliste liidest lülitada või korrigeerida protsessides osalevaid süsteeme [4].

Põllumajanduses kasutatakse automatsioonilahendusi taimede kasvukeskonna jälgimiseks ning mõjutamiseks [5]. Omadused nagu pinnaseniiskus ja happelisuse tase ning õhutemperatuur ja -niiskus on olulised faktorid taimede kasvatusel. Efektiivne keskkonnaomaduste seadmine (pinnase niisutamine või õhu ventileerimine) aitab tagada optimaalse taimekasvatuse ning tulusa tootmise.

Süsteem, mis saaks teostada alade jälgimist ning kõrvaliste süsteemide lülitamist, suudaks optimeerida tööprotsesse, vähendades tööülesannetele kuluvat aega ning seeläbi ka kulusid [4]. Hetkel turul pakutavatest kasvuhoone- või taimekasvatuse automatsioonilahendustest on suurem osa suunatud suurtootjatele. Väiketootjatele on valik kasin ning suuremate automatsioonilahenduste rakendamine ei tasu ära [6, 7]. Samuti võib piiranguks osutada süsteemi universaalsus või laiendusvõimekus, kuna süsteemid nõuavad olemasolevat taristut nende funktsionaalse toetamiseks.

Eeltoodul põhinedes on käesoleva töö eesmärgiks arendada väiketootjale sobilik, võimaluse korral väikeses mastaabis isekoostatav modulaarne kaugjuhitav süsteem taimekasvatuses eelkõige taimede niisutamisel ja keskkonnaparametrite kogumisel ja muutmisel.

2 Olemasolevad lahendused

Uurides automatsioonilahendusi kasvuhoonetele ning taimekasvatuseks leiab peamiselt kahte tüüpi lahendusi. Nendes lahendustes leidub mitmeid piiranguid, kui neid soovida kasutada väiketootjate vaatepunktist.

2.1 Tööstuslikud lahendused

Tööstuslike lahenduste hulgast võib välja tuua Spangol'i [6], mis pakub suures ulatuses lahendusi toidutootmissüsteemide optimeerimiseks. Pakutud lahenduste hulgas on kasvuhoonete kliimakontrollerid, kasvukeskkonna jälgimissensorid (õhutemperatuuri, -niiskuse ja süsinikdioksiidi mõõtmiseks) kui ka väetise haldussüsteemid [8].

Sarnaseid lahendusi pakub ka Priva [7]. Nende pakutavate toodete ja teenuste hulk on märksa suurem, mille hulka kuuluvad sisekliima- ning pinnasejälgimine, targad kastmissüsteemid, pilvepõhine andmeagregatsiooni ja -analüüsi teenus [9].

Nii Priva kui ka Spangol'i poolt pakutud süsteemid võimaldavad tootjatel rakendada automatsiooni- ja jälgimislahendusi, et optimeerida tootmisprotsesse. Lahendusi kasutavad ettevõtted kelle vastutuses on suurusjärgust 100 kuni 400 hektarit tootmistaad [10, 11]. Need ning sarnased lahendused on välistatud väiketootja vaatepunktist. Välistavad faktorid on kõrge hind, sobivus väiksematele kasvuhoonete ja aladega ning ka nende ülesseadmise keerukus.

2.2 Lahendused hobiaednikele

Erinevalt viimasest kahest lahendusest pakub ettevõtte Harvst Automation Systems Ltd automatsionisüsteeme just hobiaednikele. Nende poolt pakutud toode "WaterMate Pro" võimaldab järgmist [12]:

- kasvuhoone temperatuuri ja niiskuse jälgimine;
- pinnaseniiskuse jälgimine;
- veepumba juhtimine;
- sensori andmete põhjal kastmise seadistamine;
- graafiku alusel kastmise seadistamine;
- mobiilirakenduses kogutud andmete kuvamine ja kastmise seadistamine;
- toide päikesepaneelist või vooluvõrgust.

Pakutud süsteem lahendab hobiaednike jaoks suurema osa kasutusjuhtudest. Küll esineb lahenduses piiranguid väiketootjatele ja potentsiaalselt ka hobiaednikele.

Esimene piirang seisneb kontrolleri seadistamises. Kuna kontrolleri peamine kommunikatsiooniliides on WiFi, siis kaugjuhtimiseks nõuab seade WiFi võrgu olemasolu. Kui WiFi puudub, siis peab seadmega lokaalselt ühendama, et sätetele ligi pääseda. Teine piirang seisneb laiendusvõimekuses. Hetkel koosneb lahendus ühest kontrollerist, mis on mõeldud kasutamiseks ainult ühes kasvuhoones. Seega pole süsteem laiendatav mitmele kasuvalale või mitmesse kasvuhoonesse.

2.3 Avatud lähtekoodiga ja riistvaraga lahendused

Avatud lahenduste olemasolu on tähtis igale valdkonnale, kuna võimaldab ideede jagamist, mis kiirendab innovatsiooni, lahenduste arendamist ja parandab lahenduste turvalisust [13]. Nagu mitmetes tegevusvaldkondades, leidub ka taimekasvatuse huviliste seas lahendusi avatud lähtekoodiga (inglise keeles *open source*) või riistvara disainiga (inglise keeles *open hardware*) [14]. Internetis leidub mitmeid õpetusi, kuidas endale kättesaadavate vahenditega ehitada lihtne automatsioonilahendus kasvuhoone jälgimiseks ning taimede kastmiseks [15]. Leidub ka keerukamaid lahendusi nagu *FarmBot*, mis suudab otsast lõpuni ühel peenral taimekasvatuse eest vastutada [16].

3 Nõuded

Hetkel saadaval olevatel lahendustel, mis pakuvad automatiseeritud võimalust taimede kastmiseks ning kasvukeskkonna jälgimiseks, on kaks peamist puudujääki: laiendusvõimekuse puudus või süsteem on mõeldud rakendamiseks tööstuslikul tasandil ning seetõttu ei sobiks väiksematele kasvualadele või hoonetele. Vahepealne lahendus, mis sobiks väiketootjale puudub. Bakalaureusetöö tegeleb modulaarse taimede kastmis- ning jälgimissüsteemi arendamisega, mis pakuks lahendust just sellisele sihtgrupile. Valmis lahenduse riistvaraline ja tarkvaraline disain avalikustatakse, et panustada tegevusvaldkonna arengusse.

3.1 Kasutusjuhud

Töö eesmärk on esitada valmis süsteem, mis säilitaks väiksemate süsteemide lihtsuse ja kasutajasõbralikkuse, kuid laiendaks puudulike võimekuste osas. Süsteem peab võimaldama järgnevad kasutusjuhud:

1. õhutemperatuuri ja niiskuse jälgimine;
2. pinnaseniiskuse jälgimine;
3. pinnaseniisutuse seadistamine graafiku või pinnaseniiskuse põhjal;
4. laiendusvõimekus lisada jälgimise alla uusi alasid;

3.2 Süsteeminõuded

Kasutusjuhtudest tulenevate nõuete põhjal peaks lahendus olema modulaarne, et vajadusel lisada olemasolevale lahendusele automeeritud kraane ning sensoreid, kui taimede kasvu- või jälgimisala laiendatakse. Võimekusse peab ka kuuluma akutoide ja raadioside ühendus. Kui seadmeni ei ole võimalik viia voluvõrgu toidet peab ta hakkama saama akutoitega ning andmete ja käskluste saatmine peab olema võimalik üle suuremate distantside. Kasutusjuhtude põhjal pandi kokku üleüldised süsteeminõuded:

1. võimekus mõõta pinnaseniiskust;
2. võimekus mõõta õhutemperatuuri ja suhtelist niiskust;
3. võimekus töötada akutoitel ning laadida päikesepaneeliga;
4. võimekus lülitada kastmissüsteemi;
5. võimekus suhelda üle raadioside vähemalt 1 km distantsilt (otsenähtavusega);

6. keskkonsool mõõtmisandmete jälgimiseks ning kastmistingimuste seadistamiseks;
7. modulaarsus, et pakkuda võimalust süsteemi laiendamiseks;

3.3 Riistvaranõuded

Süsteemi riistvara peab tasakaalustama aku laadimise kiiruse (tulenevalt päikesepaneeli võimsusest) ja tühjenemise suurema koormuse korral ning säilitama töövõimekuse. Samuti peavad kõik alamsüsteemid säilitama energia efektiivsuse. Riistvaralised nõuded, mis võimaldaksid kirjeldatud kasutusjuhtusi ning süsteeminõuded, on järgnevad:

1. päikesepaneel peab olema võimeline toitma koormuse all olevat süsteemi;
2. piisav aku mahtuvus, et säilitada töövõimekus, kui päikesepaneel ei tooda piisavalt energiat (nt. pilvisel päeval);
3. raadiosüsteemi võimsus peab võimaldama suhtlust vähemalt 1 km kauguselt (otsenähtavusega);
4. riistvara energia efektiivsete komponentide kasutus ja disain, et pikendada aku tööaega;

4 Lahenduse disain

Pakutud lahenduse arhitektuur koosneb kõrgel tasandil keskserverist ja kontrollerseadmest (joonis 4.1). Kontroller asetseb taimede kasvualal ning vastutab sensoriandmete kogumise ning taimede kastmise eest. Keskserveri ülesanne on kontrollerilt andmete kogumine ning kastmise või muude sätete edastamine. Kommunikatsioon serveri ja kontrolleri vahel toimub üle raadioside, kasutades LoRa modulatsiooni sagedusel 868 MHz. Keskserver on võimeline suhtlema mitme kontrolleriga.

4.1 Riistvara disain

Riistvara disaini juures pidi kinni pidama nõuete piiritlestest, et saavutada võimalikult efektiivne ja töökindel lahendus. Disainimise vältel pidi arvestama süsteemi energiatarbega, raadio transiiveri võimsusega ja skeemi efektiivsusega, komponentide vahel pinge reguleerimisega ning komponentide ühilduvusega.

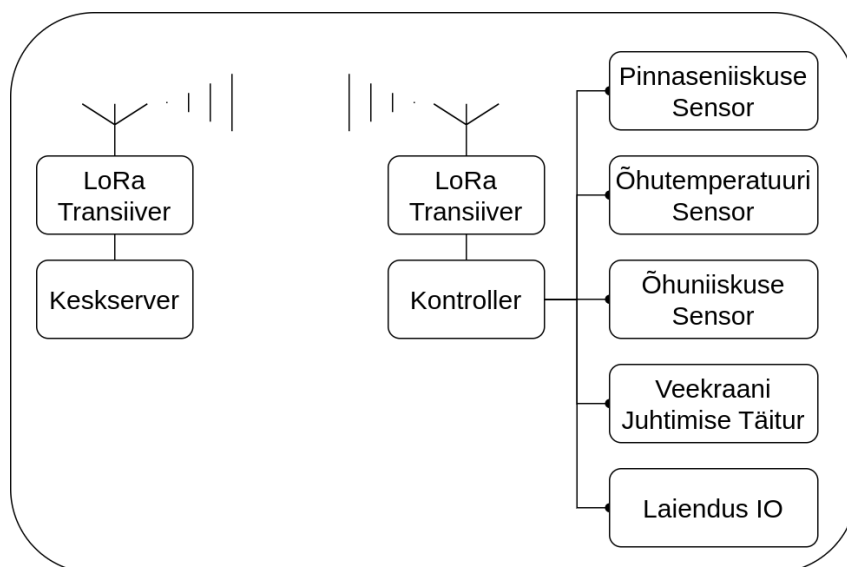
4.1.1 Süsteemi energiatarbe kaalutlused

Suurim piiritlus, millest disaini juures lähtuti, oli aku mahtuvus ja kuidas see ühildub süsteemi energiatarbega erinevates olekutes. Sarnaselt tuli arvestada, kui kiiresti on võimalik aku päikese-paneeliga täis laadida. Disaini alustati kolme määrava komponendi valikuga: päikesepaneel, aku ja veekraan.

Kastmist reguleerivaks veekraaniks valiti 4 W tarbimisega solenoidiga avatav kraan, mis on vaikimisi suletud olekus. Disainis kaaluti ka mootoriga reguleeritavat kraani mootori FIT0278 [17] näol, mis suudaks 4:1 ülekandega avada standardset kuulkraani, mille avamise jõumoment on ligikaudselt 1 Nm. Sellise töö juures kasutaks mootor umbes 6 W energiat võrreldes solenoid kraani 4 W tarbega. Kuigi mootoriga juhitud kraan kulutaks kokku vähem energiat, kuna ei pea olema koormuse all kogu kastmise perioodi nagu solenoid kraan, siis otsustati solenoidi kasuks. Mootoriga juhitud kraan nõuaks eraldi välja arendatud ülekande- ning installerimis mehhanismi, mis võib pikas perspektiivis osutada vähem töökindlaks, kui valmis ehitatud solenoid kraan. Samuti on solenoid kraani hind märkimisväärselt väiksem kui mootoril, mitte arvestades lisa arendusaega, mis kuluks mootoriga kraani mehhanismi peale. Solenoid on sobilikum tegelema veaolukorraga kui seadmelt kaob ootamatult toide, kuna sellisel juhul lülitab kraani kinni.

Arvestades, et 4 W tarbivat solenoid kraani hoitakse lahti päevas maksimaalselt 30 minutit (kaks 15 minutit kestvat kastmist), siis kasutab solenoid kraan 7560 J. Valides aku mahtuvusega 3600 mAh ehk 47952 J, suudab seade solenoid kraani avada 30 minutiks umbes 6 korda.

Järgnevalt vaadati, kas 5 W võimsusega päikesepaneel suudab piisavalt kiiresti laadida aku täis



Joonis 4.1: Lahenduse arhitektuur

ning tagasi toota kraani poolt kasutatud energia.

Päikese kiirgusvoog perioodil mai kuni august 08:00 hommikul kuni 20:00 õhtul oli keskmiselt 450 W/m^2 [18]. Sellise kiirgusvoo puhul on paneeli CL-SM5P maksimaalne võimsus 2,52 W, mis tähendab, et suudab sama päevase perioodi jooksul toota umbes 108 kJ energiat, mis on piisav, et laadida aku täis kaks korda ning toota tagasi solenoidi kasutatud energia 14 korda [19].

Valitud komponendid täidavad 1. ja 2. punkti riistvaralistest nõuetest.

4.1.2 Päikesepaneeli reguleerimine ja aku haldussüsteem

Päikesepaneeli toodetud energiat tuleb targalt reguleerida, et saavutada maksimaalne sisendvõimsus. [20] Samuti, tuleb liitiumioon akut laadida kahes faasis (CV-CC) ning kaitsta ülelaadimise eest. [21] Päikesepaneeli ja aku laadimise reguleerimiseks valiti MPPT võimekusega BMS'i. Nõuetekohaseks ning paneeliga ühilduvaks komponendiks osutus LTC4121 (joonis C.4), mille sisendit on võimalik programmeerida päikesepaneeli maksimaalset võimsust järgima ning suudab liitiumioon akut turvaliselt laadida [22].

4.1.3 Raadio

Raadio transiiveri nõueteks oli võimalikult suur võimsus, et suurendada maksimaalset lingi bilanssi (inglise keeles *link-budget*) ning samas madal volutarve. Disainis otsustati Semtech'i SX1262 transiiveri kasuks (joonis C.2), mis kasutab LoRa modulatsiooni. SX1262 maksimaalne väljund võimsus on 22 dBm'i tarbides saates ligikaudselt ainult 0,4 W [23]. Transiiveri võimekuse kinnitamiseks arvutati teoreetiline lingi bilanss (valem 4.1). [24]

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L_{FS} + G_{RX} \quad (4.1)$$

kus:

- P_{RX} on vastuvõtja poolt nähtud signaali võimsus;
- P_{TX} on saatja võimendus;

- G_{TX} ja G_{RX} on antennide võimendused;
- L_{FS} on kadu signaali propageerumisel vabas ruumis;

Vaba ruumi kaovalem [25]:

$$L_{FS}(dB) \approx 32.45dB + 20\log_{10}[sagedus(MHz)] + 20\log_{10}[kaugus(km)] \quad (4.2)$$

Arvestades, et halvimal juhul on antennide võimendus on 0 dBi, suhtlus on 1 km kauguselt ning saatja maksimaalne võimsus on 22 dB, tuleb vastuseks, -69.2 dB. See tähendab, et vastuvõtja peab olema vähemal nii tundlik, et võtta võtta vastu saadetud signaal. Kuna SX1262 vastuvõtja tundlikus on -138 dB (vastavalt transiiveri seadistusele 125kHz BW, 12 SF ehk *Spreading factor*) [23], siis on arvutuste kohaselt suhtlus 1 km kauguselt võimalik, mis rahuldab punkti 3. riistvaralistest nõuetest. Tuleb arvestada, et vaba ruumi kadu arvestus eeldab otsest nähtavust saatja ja vastuvõtja vahel, mis on harva reaalne olukord. Seetõttu on suur tolerantants hea näitaja, kuid suhtlusvõimekust tuleb kinnitada reaalsete testidega.

4.1.4 Energia efektiivne disain

Skeemi disainis arvestati komponentide energia efektiivsusega ning eemaldati võimalikud voolulekked. Skeemis kasutati pingereguleerimiseks lülituvaid pingeregulaatoreid, mis on efektiivsemad võrreldes lineaarregulaatoritega [26]. Erinevate skeemi osade lülitamiseks kasutati välja-transistoreid (*MOSFET*), et ootel komponendid ei tarbiks pidevalt energiat (joonis C.3). Sellega on kaetud riistvara nõuete punkt 4.

4.1.5 Mikrokontroller ja sensorid

Mikrokontroller Mikrokontrolleri nõueteks olid piisav arv sisend/väljund viike, süsteemi komponentide lülitamiseks ja parameetrite lugemiseks, kommunikatsiooniliidesed sensorite ja transiiveriga ning samuti energiaefektiivsus. Süsteemi mikrokontrolleriks valiti STM32L072 (joonis C.1). STM32L0 seeria mikrokontrollerid on vähese voolutarbega ning mõeldud rakendamiseks disainidesse kus energiaefektiivsus on oluline parameeter. Samuti pakub MCU vajalikke liideseid (SPI, I2C, ADC) sensorite ja transiiveriga suhtlemiseks, USB DFU muugavaks programmeerimiseks üle USB liidese ning ülejäänud 25 IO viiku süsteemi komponentide lülitamiseks ja jälgimiseks [27].

Õhutemperatuuri ja niiskuse sensor Õhutemperatuuri ja niiskuse sensoriks valiti SHT20 (joonis C.5), kuna lubab väikest energiatarvet, 0,3 mA, ja täpset niiskuse ja temperatuuri mõõtmist keskmise veaga 3% suhtelisest niiskuses ning 0,3 kraadi temperatuurist [28].

Pinnaseniiskuse sensor Pinnaseniiskuse sensori valimisel tuli arvestada seadme elueaga, kuna puutub otseselt kokku väliskeskkonnaga. Selle tõttu valiti mahtuvusliku põhimõttega töötav seade SEN0193 (joonis C.5) [29], mille keskmine voolutarve on 5 mA ning millelt on võimalik andmeid kergelt lugeda kasutades mikrokontrolleri ADC'd [30].

Lõplik riistvara arhitektuur on välja toodud joonisel 4.2.

Komponent	Sisendpinge (V)	Voolutarve (A)	Energiatarve (W)	Kasutatud energia (J)
MCU	3,3 V	7 mA	23,1 mW	1995,8 J
3V3 Regulaator	3,7 V	0,003 mA	0,01 mW	0,8 J
12 V Regulaator	3,7 V	0,075 mA	0,28 mW	24,1 J

Tabel 4.1: Seadme pidev energiatarve (24h lõikes)

Olek	Sisendpinge (V)	Voolutarve (A)	Energiatarve (W)	Tarbe kestvus (min)	Kasutatud energia (J)
Ootel	3,3 V	0,004 mA	13 mW	1410 min	1099,8 J
Saatmine	3,3 V	118 mA	390 mW	0,07 min	1,6 J
Kastmine	12 V	350 mA	4200 mW	30 min	7560 J

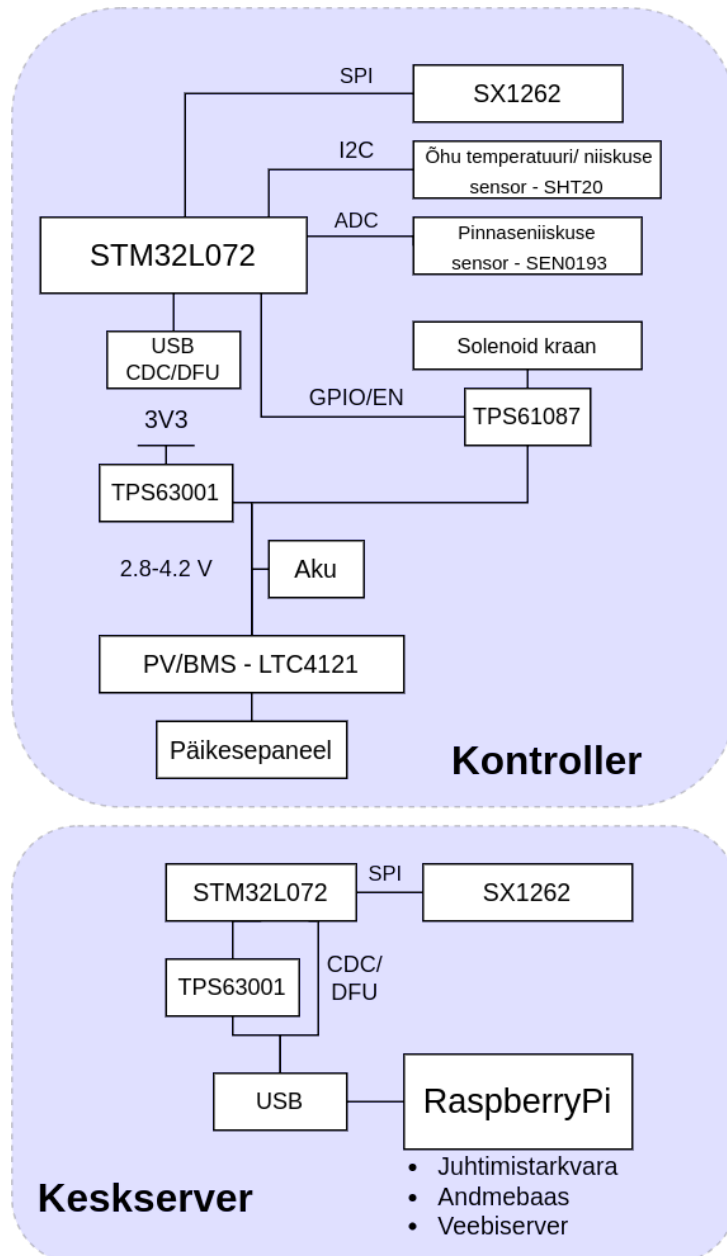
Tabel 4.2: Seadme energiatarve erinevates olekutes (24h lõikes)

4.2 Teoreetiline energiatarve

Kuna energia tarbimine erineb süsteemi mitme kasutusjuhu vahel, siis tuvastati kolm peamist olekut: käsu ooterežiim, saatmisrežiim ja kastmise režiim. Oote- ja saamisrežiimis on suurim tarbija transiiver ning kastmisrežiimis solenoid kraan. Nende komponentide näitajate põhjal arvutati, kui palju aku mahtuvusest kasutatakse 24 tunni lõikes (tabel 4.2). Saatmisrežiimis arvestati, et seade on ooterežiimis 23,5 tundi, kogu teoreetilise saatmisajaga 4,2 sekundit (kui saatmine toimub tunniste intervallidega) [31] ning kahe 15 minutit kestva kastmisega.

Arvestati ka pidevalt energiat tarbivate komponentidega. Pidevad tarbijad (tabel 4.1) on skeemis mikrokontroller ja 3,3 V ning 12 V regulaatorid. Arvutustes arvestati energiatarbega 24 tunni lõikes, mikrokontrolleri suurima võimaliku voolutarbega, 3,3 V regulaatoril 70% efektiivsusega ning 12 V regulaatori väljalülitatud olekuga.

Kokkuvõttes on näha, et pidevad tarbijad (tabel 4.1) kasutavad 24 tunni jooksul ligikaudselt 2020,7 J ning tarve süsteemi erinevate olekute vahel 24 tunni lõikes on 8661,4 J (tabel 4.2). Tulemusena kasutatakse esitatud info põhjal aku mahtuvusest (47952 J) 24 tunni jooksul ära 22,3%. Kuna komponentide tarve ning efektiivsus on varieeruv sõltuvalt mitmetest tingimustest, tuleb viia läbi süsteemi üldise kasutuse test, et kinnitada arvutustele vastav energiakulu.



Joonis 4.2: Riistvara arhitektuur

5 Tarkvara

Arendatud süsteem koosnes kolmest erinevast tarkvaralisest komponendist. Erinev programmikood jooksis kontrolleri, keskserveri ja keskserveri raadiomooduli peal.

5.1 Kontroller ja raadiomoodul

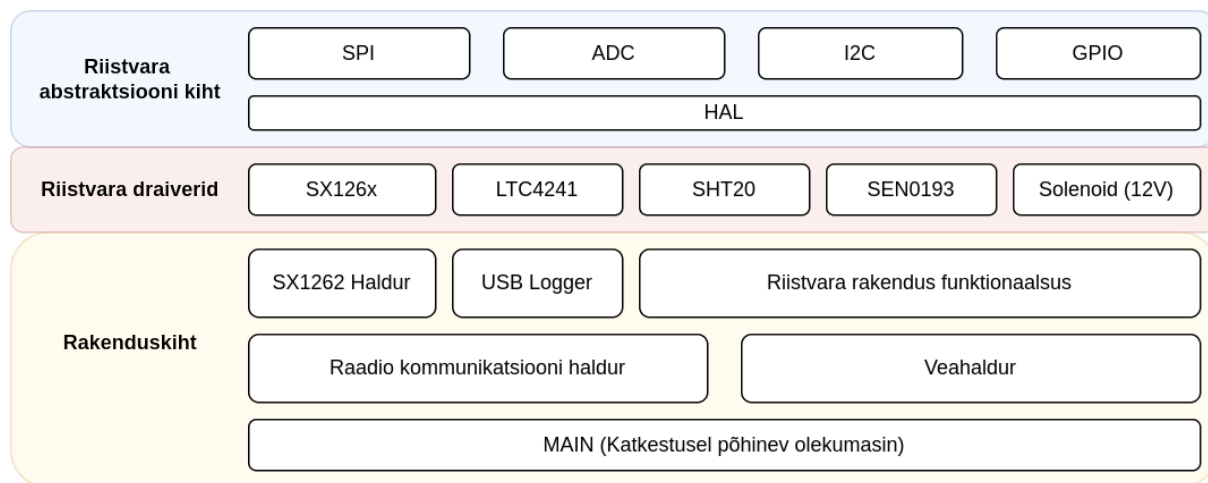
Kuna kontrolleril ja raadiomoodulil kasutati STM32 mikrokontrollerit, oli nende programmi-koodi arendus lihtsustatud kasutades CubeMX integreeritud arenduskeskkonda [32]. CubeMX lihtsustas arendust märkimisväärselt, kuna pakkus mitmeid tööriistu MCU perifeeria seadistamiseks ja koodi genereerimiseks. Kuna raadiomoodul ja kontroller on riistvaraliselt sarnased (joonis C.6), siis raadiomoodulil jookseb kontrolleriga sama ehitusega programm jättes välja osad kontrolleri lisa riistvaralistest võimekustest.

5.1.1 Kontroller

Kontrolleri tarkvara arhitektuur (joonis 5.1) on jaotatud kolmeks tasemeks: riistvara abstraktsiooni kiht, riistvara draiverid ja rakenduskiht.

Riistvara abstraktsiooni kiht (HAL) HAL kihi eesmärk on pakkuda mugav ning töökindel liides, mis vastutab riistvarakomponentide vahelise suhtluse eest. Tulemusena ei pea rakenduse osas riistvaralisi funktsioone kutsuma.

Riistvara draiverid Riistvara draiverite kiht rakendab HAL'is defineeritud kommunikatsiooni funktsioone ning defineerib ära riistvarakomponendile spetsiifilised käsklused, millega



Joonis 5.1: Tarkvara arhitektuur

on võimalik komponendi funktsionaalsus realiseerida. See võib hõlmata komponentidelt andmete pärimise, olekute seadistamise või nende jälgimise.

Rakenduskiht Rakenduskiht korraldab kogu seadme põhifunktsionaalsuse. Selle vastutuse alla kuulub raadiohaldus (seadistamine, saatmine ja vastuvõtmine), USB loggimise liides ja riistvara rakenduse funktsionaalsus.

Riistvara rakenduse funktsionaalsus hõlmab enda alla sensoritelt andmete kogumise ja täiturite lülitamise ning vastavate komponentide või skeemi osade sisse lülitamise. Üksikkomponendi haldus on ühes funktsionaalses koodiplokis, et ennetada riistvaralisi veaolukordi.

Viimaseks vastutavad rakenduskihi osad raadiosuhtluse eest (käskluste saatmise ning andmete vastuvõtu) ning veahalduse eest, mille eesmärk on kaitsta seadet ja koodi veaolukordadest. Peamine tööfunktsioon, "main", rakendab endas katkestuste põhimõttel töötavat olekumasinat, mis korraldab koodi madalamate osade tööd.

5.1.2 SX1262 transiiveri kasutus

Töös kasutati Semtech'i poolt pakutud avatud lähtekoodiga riistvara draiverit SX1262 transiiveri jaoks. Programmeerijal jääb ülesandeks implementeerida HAL, ning seadistada transiiver tööks. Saatmise kui ka vastuvõtmise seadistusel tuleb järgida käskluste kindlat järjekorda ning oodata seadme käskluse töötlemise lõpetamist enne järgneva edastamist. Viimasena tuleb pärida transiiveri olek, et kinnitada seadistuse õigsus.

5.2 Keskserver

Kasutajaliidese ning andmesalvestuse eest vastutab keskserver, mille peal jookseb veebiteenus kasutajaliidese jaoks ning andmebaas mineviku andmete salvestamiseks. Kontrolleriga suhtlemiseks liidestub keskserver raadiomooduliga. Kuna jõudlusnõuded seadmele ei ole suured otsustati kasutada RaspberryPi arvutit keskserveri ülesannete täitmiseks.

Raadiomoodul ühendub RaspberryPI'ga USB jadaliidese, mille üle esitatakse käsklusi moodulile ja päritakse andmeid. Kontrollerilt kätte saadud andmed salvestatakse andmebaasi (MySQL), mis kuvatakse kasutajale veebilehel. Kui kasutaja teeb veebilehel uue seadistuse kontrollerile, siis kutsutakse serveril jooksev tagateenus (inglise keeles *back-end*), mis edastab seadistuse kasutades raadiomoodulit.

6 Tulemused

Valmis ehitatud lahenduse peal viidi läbi järgnevad testid, et kinnitada nõuetele vastav funktsionaalsus:

- aku laadimise kiirus;
- süsteemi energia tarve erinevates olekutes;
- raadio suhtluse ulatus;
- süsteemi kasutus, tulenevalt kasutusjuhtudest;

6.1 Aku laadimine

Aku laadimise test viidi läbi kasutades päikesepaneeli päevasel ajal, kus kiirusvoog oli ligikaudselt 750 W/m^2 . Testi alguses oli aku pingeline 3.5 V ehk ligikaudselt 1500 mAh. Päikesepaneel suutis aku viia 4.2 V juurde 5.5 tunniga, mis kattub arvestusega, et LTC4241 laeb paneeli vooluga 0.4 A. Mõõtmiste kohaselt suudab paneel edukalt laadida täis aku ühepäevase kasutuse jooksu isegi suurema koormuse puhul kui ennustatud 22,3% aku mahtuvusest (tabel 4.2). Aku kestvuse täpsemaks hindamiseks oleks vaja läbi viia test üle seadme reaalse kasutusaja, et näha kuidas peab aku vastu üle mitme kuu kasutuse.

6.2 Süsteemi energiatarve

Süsteemi reaalse energiatarbe testis vaadati süsteemi kogutarvet kolmes põhiolekus: vaikimisi (raadio vastuvõtmisrežiimis), andmete saatmine ja kastmisrežiimis. Režiimide teoreetilisele energia tarbe väärtused moodustuvad režiimi peamise tarbija ning pidevate tarbiate hetkesest energia tarbest. Kõikides režiimides (tabel 6.1) olid tulemused ootuspärased ning ühtivad disainis paika pandud teoreetilise energiatarbe ennustustega. Ainuke erand on solenoidi voolu tarve, mis osutus teoreetilisest madalamaks.

Olek	Teoreetiline energiatarve	Mõõdetud tarve
<i>Ootel (Transiiver+pidevad)</i>	36 mW	33 mW
<i>Saatmine (Transiiver+pidevad)</i>	413 mW	460 mW
<i>Kastmine (Solenoid+pidevad)</i>	4223 mW	2072 mW

Tabel 6.1: Seadme reaalne energia tarve erinevates olekutes

Keskkond	Maksimaalne saavutatud kaugus (<5 CRC viga)	RSSI 1 km kauguselt
Otsenähtavus	2800 m (<i>Max mitte saavutatud otsenähtavust säilitades</i>)	-94 dB
Linnas	300 m	-
Metsas	150 m	-

Tabel 6.2: Raadiosuhtluse ulatus erinevates keskkondades

6.3 Raadio suhtlus

Raadio testid viid läbi kolmes erinevas keskkonnas: linnas, metsas, vabas ruumis. Testides hinnati maksimaalset suhtlusulatust nendes keskkondades, ehk viimane kaugus, kus toimus edukas suhtlus. Mitteedukaks suhtluseks loeti olukorda, kus vastuvõtja on saanud 5 vigast paketti (ehk CRC viga) järjest. Samuti mõõdeti milline on vastuvõtja RSSI 1 km kauguselt.

Asukohad testide läbi viimiseks:

- Otsenähtavus - Kuhjavere küla
- Linnaruum - Riia tänav, Tartu
- Mets - Kuhjavere küla

Testid (tabel 6.2) kinnitasid vastavust nõudele suhelda otsenähtavusega tingimustes vähemalt 1 kilomeetrise distantsi tagant. Kuna otsenähtavusega hindas vastuvõtja 2,8 kilomeetri tagant signaali tugevuseks -98 dB (kus transiiveri teoreetiline tundlikus on -138 dB) tähendab, et vastuvõtja on võimeline suhtluseks üle palju pikemate distantside. Metsas ning linnaruumis ei suudetud ühe kilomeetrist distantsi saavutada. Tulems on ootuspärane, kuna kasutatud raadiosagedus on tundlik füüsilistele takistustele.

6.4 Süsteemi kasutus

Süsteemi kasutuse test viidi läbi kasutusjuhtude põhjal, et vaadata kas kogu funktsionaalsus katab kasutuse nõuded töökindlalt ja kasutajasõbralikult. Kasutaja peamine liides andmetele on veebirakendus, mis jookseb keskserveri peal, millele pääseb kasutaja ligi läbi veebibrauseri.

Veebileht pakub ülevaate seadme mõõtmistest (õhutemperatuur, õhuniiskus ja pinnaseniiskus), mis on kogutud kontrolleri seadme poolt ühetunniste intervallidega. Lehel on kasutajal võimalik seadistada kastmise pinnaseniiskuse piirmäär või kellaajapõhine graafik. Samuti on kuvatud lehel sektsioonid kõikide ühendatud kontrolleri kohta, et seadistada neid eraldi. Kasutajal on võimalik esitada päring, mis küsib kontrolleritelt hetkeandmeid.

Testi käigus hinnati, kas veebileht (joonis 8.2) on võimeline kuvama korrektseid andmeid kõikide seadmete kohta ning kas seatud kastmissätted salvestuvad kontrolleri. Seadmed läbisid testid edukalt, mis kinnitas süsteemi nõuetele vastavust.

6.5 Järeldused

Kõik läbi viidud testid kinnitasid süsteemile arendatud võimekuste ühtimist paika pandud kasutaja, süsteemi ning riistvaraliste nõuetega.

Kontrolleri riistvara demonstreeris vastupidavust läbi kõikide energiatarbe testide. Kuna energiatarve oli teoreetilistele arvutustele vastav on süsteem võimeline jätkama tööd ka pilvistel päevadel, kui päikese kiirusvoog on keskmisest madalam. Süsteemi tarkvara suutis vastu pidada ning tööd jätkata ka potentsiaalsetes veaolukordades, kui edastati vigase vormistusega käsklused või seadistused.

7 Edasiarendus

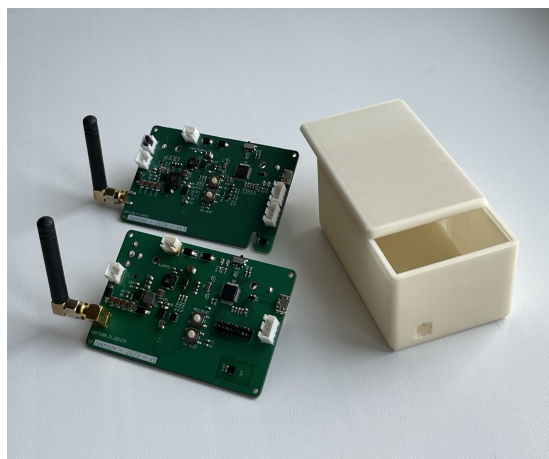
Arendatud süsteemis jäeti võimalust edasiarenduseks nii tarkvaralise kui ka riistvaralise külje pealt. See võimaldab seadme töövõimekust laiendada riistvaraliste lisasüsteemidega ja seda integreerida teiste süsteemidega, mis kataks uusi kasutusjuhtusid. Tarkvara külje pealt on võimalik arendada võimekus liidestuda LoRaWAN võrguga või kasutada ära seadmete omavahelist suhtlusvõimekust, et hoida ära võimalikke sidekatkestusi. Riistvara külje pealt saaks lisada funktsionaalsust, mis kasutab ära kontrolleri lisa sisend/väljund viiku. Funktsionaalsuse alla võib kuuluda väline seade, mis juhib ventilatsiooni või mitmetsooniline pinnaseniiskuse jälgimine ning kastmine.

Seadme universaalsus olla sõltumatu vooluvõrgust või sidevõimekustest esitab ka võimekuse kasutada kontrolleri suuremal maal või tootmisalal. Lihstaimad kasutusjuhud on näiteks vihmuti juhtimine või põllu pinnaseniiskuse jälgimine.

8 Kokkuvõte

Tarkade automatsioonilahenduste kasutus tootmises aitab kaasa efektiivsele tootmisele ning väljundite suurendamisele. Uurides taimekasvatuse automatsioonilahendusi väiketootjate vaatepunktist leiab, et olemasolevatel lahendustel leidub piirtlusi, mis muudavad lahendused väiketootjatele ebasobilikuks.

Töö tulemuseks on valmis ehitatud süsteem, mis pakub väiketootjatele lahendust taimekasvatuse automatiseerimiseks. Süsteemi osadeks on kontrolleri (joonised 8.1a, C.7, C.8), raadiomoodul (joonised 8.1b, C.9) ning juhtimistarkvara (joonis 8.2). Kavandatud süsteemi võimekusi testiti mitmest vaatepunktist ning kinnitati süsteemi vastavus püstitatud nõuetele. Süsteem disainiti modulaarseks ning laiendusvõimeliseks, et katta potentsiaalseid uusi nõudeid või kasutusjuhatusid.



(a) Kontrolleri



(b) Raadiomoodul

Joonis 8.1: Lahenduse riistvara

Current Measurements Refresh

Irrigation Schedule Change

Automatic Irrigation Start
Moisture Threshold

%

Set

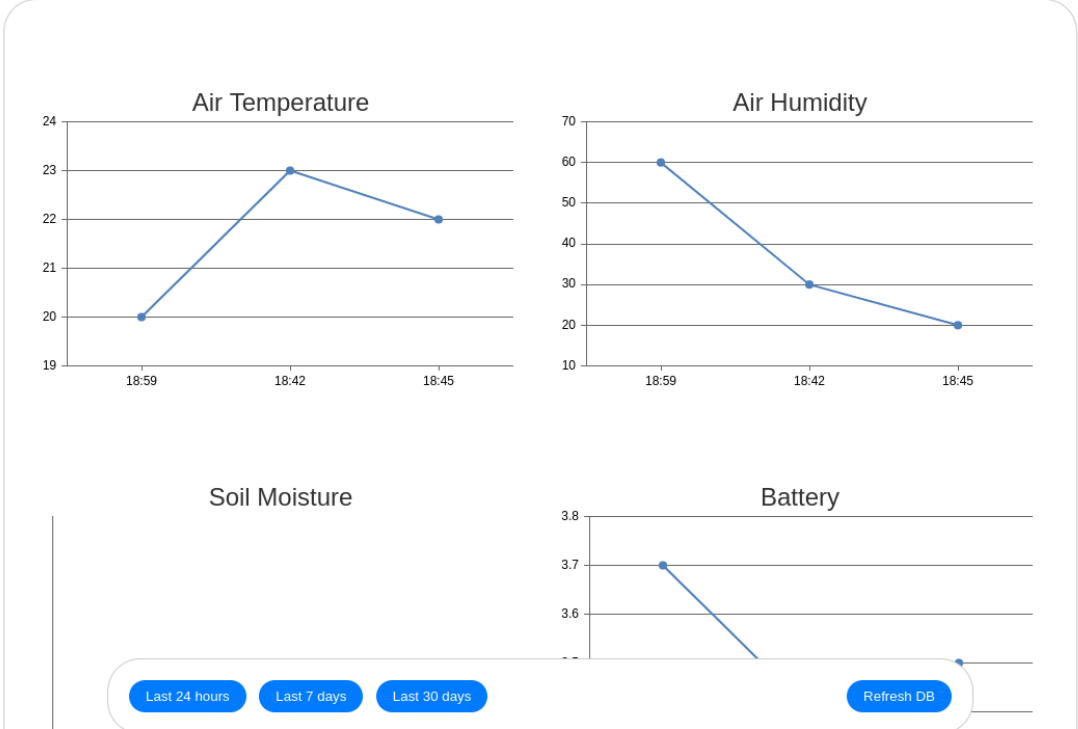
Manual Irrigation Start
Irrigation Start time

🕒

Irrigation Length

min

Set



Joonis 8.2: Juhtimistarkvara

Tänuavaldused

Soovin tänada juhendajaid Heiki Kasemägi ja Jaanus Kalde abi, suunamise ja põnevate arutelude eest.



Viited

- [1] P. Campbell, “The Future Prospects for Global Arable Land,” <https://docslib.org/doc/9261063/the-future-prospects-for-global-arable-land>.
- [2] IBM, “What is the Internet of Things (IoT)?” <https://www.ibm.com/topics/internet-of-things>.
- [3] IoT Analytics, “State of IoT 2023: Number of connected IoT devices growing 16” <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>.
- [4] X. Li, Q. Deng, H. Shi, and Y. Guo, “Sustainable manufacturing production process monitoring and economic benefit analysis based on iot technology.” <http://ezproxy.utlib.ut.ee/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,url,uid&db=edsjs&AN=edsjs.23A5CAD0&site=eds-live>, pp. 1 – 12, 2024. [Online]. Available: <http://ezproxy.utlib.ut.ee/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,url,uid&db=edsjs&AN=edsjs.23A5CAD0&site=eds-live>
- [5] M. A. Zamir and R. M. Sonar, “Application of internet of things (iot) in agriculture: A review,” pp. 425–431, 2023.
- [6] Spangol, “Greenhouse Automation,” <https://www.spagnol.com/en-us/home>.
- [7] Priva, “Greenhouse technology and horticulture automation,” <https://www.priva.com/horticulture>.
- [8] Spangol, “Greenhouse Automation,” <https://www.spagnol.com/en-us/solutions/greenhouse-automation>.
- [9] Priva, “Greenhouse solutions and horticulture products,” https://www.priva.com/horticulture/solutions?_gl=1*1745p1c*_up*MQ..*_ga*MTkxMTUwNDc2MS4xNzE2MTgyNjc2*_ga_P61TR4L9Y0*MTcxNjE4MjY3Ni4xLjAuMTcxNjE4MjY3Ni4wLjAuMjQzMjY2OTMz.
- [10] Spangol, “The Santacroe firm relies on Spangol,” <https://www.spagnol.com/en-us/news/products/the-santacroe-firm-relies-on-spagnol>.
- [11] Priva, “Ortolanda Operator,” <https://www.priva.com/customer-stories/horticulture/ortolanda-operator>.
- [12] Harvst, “WaterMate Pro,” <https://www.harvst.co.uk/product/greenhouse-watering-system/>.
- [13] Github, “What is Open Source Software (OSS),” <https://resources.github.com/open-source/what-is-open-source-software/>.

- [14] Open Source Garders, “Technologies,” <https://opensourcegardens.info/technologies.en.html>.
- [15] Eric Davisson, “Automated Garden System Built on Raspberry Pi for Outdoors or Indoors - MudPi,” <https://www.instructables.com/Automated-Garden-System-Built-on-RaspberryPi-for-O/>.
- [16] FarmBot, “FarmBot,” <https://farm.bot/>.
- [17] TME, “FIT0278,” <https://www.tme.eu/en/details/df-fit0278/stepper-motors/dfrobot/fit0278/>.
- [18] Tartu Ülikooli Füüsika instituudi ilmajaam, “Arhiiv,” <https://ilmajaam.physic.ut.ee/>.
- [19] CELLEVIA POWER, “CL-SM5P,” <https://www.tme.eu/Document/bab057a8a844396ef052688645558ec2/CL-SM5P.pdf>.
- [20] Electrical Academia, “Maximum Power Point Tracking (MPPT) Charge Controller Working Principle,” <https://electricalacademia.com/renewable-energy/maximum-power-point-tracking-mppt-charge-controller-working-principle/>.
- [21] Battery University, “Charging Lithium-ion,” <https://batteryuniversity.com/article/bu-409-charging-lithium-ion>.
- [22] Analog Devices, “LTC4121,” <https://www.analog.com/en/products/ltc4121.html>.
- [23] Semtech, “Semtech SX1262,” <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1262>.
- [24] Jim Zyren, Al Petrick, “Tutorial on Basic Link Budget Analysis,” <http://www.sss-mag.com/pdf/an9804.pdf>.
- [25] Jean-Paul M. G. Linmartz, “Radio Propagation Models,” https://web.archive.org/web/20050901001655/http://people.deas.harvard.edu/~jones/es151/prop_models/propagation.html.
- [26] Zachariah Peterson, “Switching vs Linear Voltage Regulator: What’s the Best Choice for Your Power Management Circuit?” <https://resources.altium.com/p/switching-vs-linear-voltage-regulator-what-s-the-best-choice-for-your-power-management-circuit>.
- [27] ST, “STM32L072,” <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l072cz.html>.
- [28] Sensirion, “SHT20,” <https://sensirion.com/products/catalog/SHT20/>.
- [29] E. Nagahage, I. Nagahage, T. Fujino, “Calibration and Validation of a Low-Cost Capacitive Moisture Sensor to Integrate the Automated Soil Moisture Monitoring System,” <https://www.mdpi.com/2077-0472/9/7/141>.
- [30] DFROBOT, “SKU:SEN0193,” https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193.
- [31] RF Wireless World, “LoRaWAN Airtime Calculator, LoRa Packet Duration Calculation,” <https://www.rfwireless-world.com/calculators/LoRaWAN-Airtime-calculator.html>.
- [32] ST, “STM32CubeMX,” <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>.

Lisad

A Töö repositoorium

<https://github.com/MarcusOJ/lora-based-remotecontrol>

B BOM

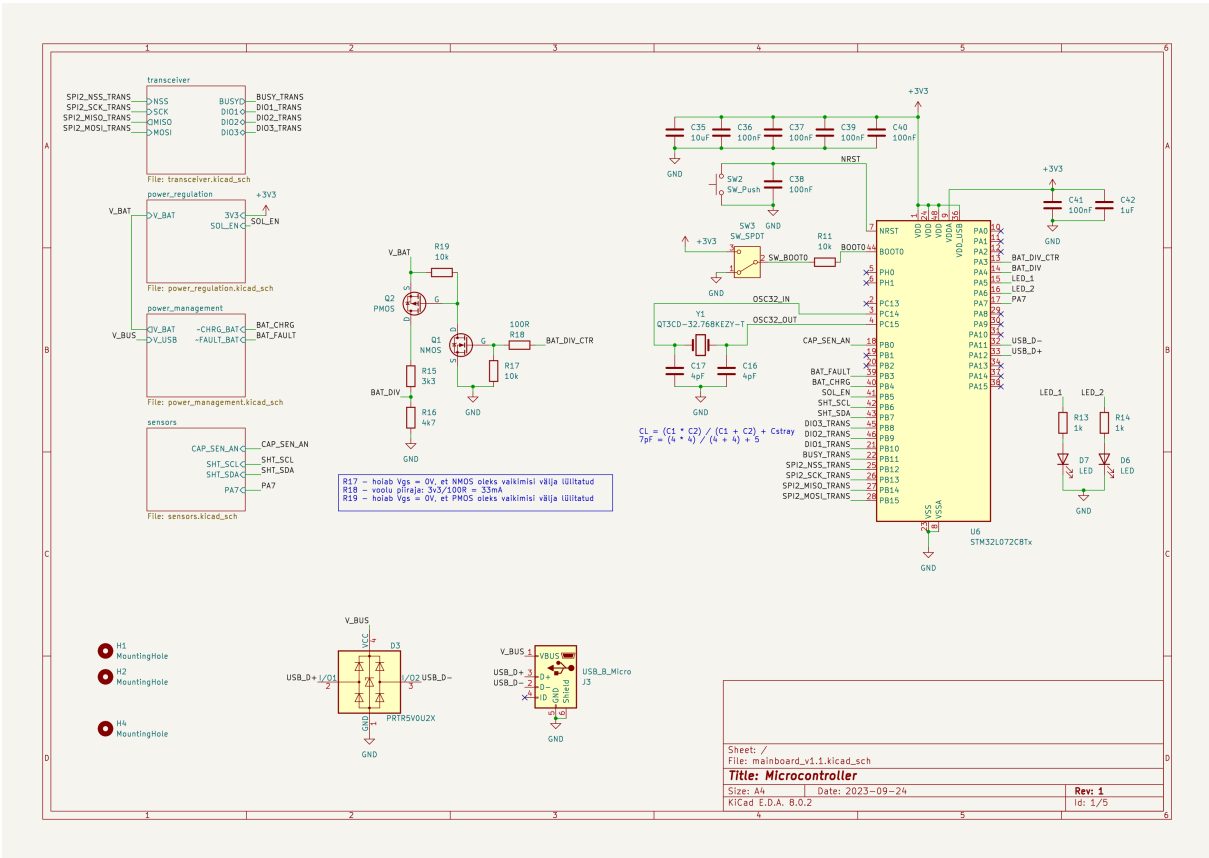
Tabel B.1: BOM

Kogus	Komponendi tähistus	Komponent
21	C1, C3, C21, C27, C36, C37, C38, C39, C40, C41, C43	06033C104KAT2A
4	C2	C0603X474K4RACTU
5	C4, C42	0603YC105KAT2A
5	C5	C0402C473K4RAC
3	C6, C7, C13	04025A470JAT2A
8	C8, C16, C17	CBR04C409B5GAC
4	C9	06035A3R9CAT2A
4	C11	CBR04C309B5GAC
6	C12, C14	04025A5R6CAT2A
4	C15	06035A3R3BAT2A
6	C18, C19, C28, C29, C30, C35	08056C106KAT2A
1	C20	0805YC105K4T2A
1	C22	06035C122JAT2A
7	C23, C24, C25, C26, C31	06035C223K4T2A
10	C32	C0603C225K8RAC
3	C33	C3225X7R1C226MAC
3	C34	GRM32DR71E106KA12L
4	D1, D2, D4, D5	B230A-13-F
2	D3	PRTR5V0U2X.215
2	J1	RF2-143-T-17-50-G
1	J2	B3B-XH-A
2	J3	MX-105017-1001
1	J4	B2B-XH-A
1	J5	B2B-XH-A
3	L1	LQG18HN15NJ00D
3	L2	LQG18HN4N7S00D
3	L3	LQW18AN8N2G80D
5	L5	L6 LQG18HN2N7S00D
3	L7	LQG18HN8N2J00D
2	L9	DR73-6R8-R
1	L10	LQH3NPN2R2MJRL
1	L11	SLF6025T-470MR48-PF
4	Q1, Q4	SI2342DS-T1-GE3
5	Q2, Q3	SI2305CDS-T1-GE3
Jätkub järgmisel lehel		

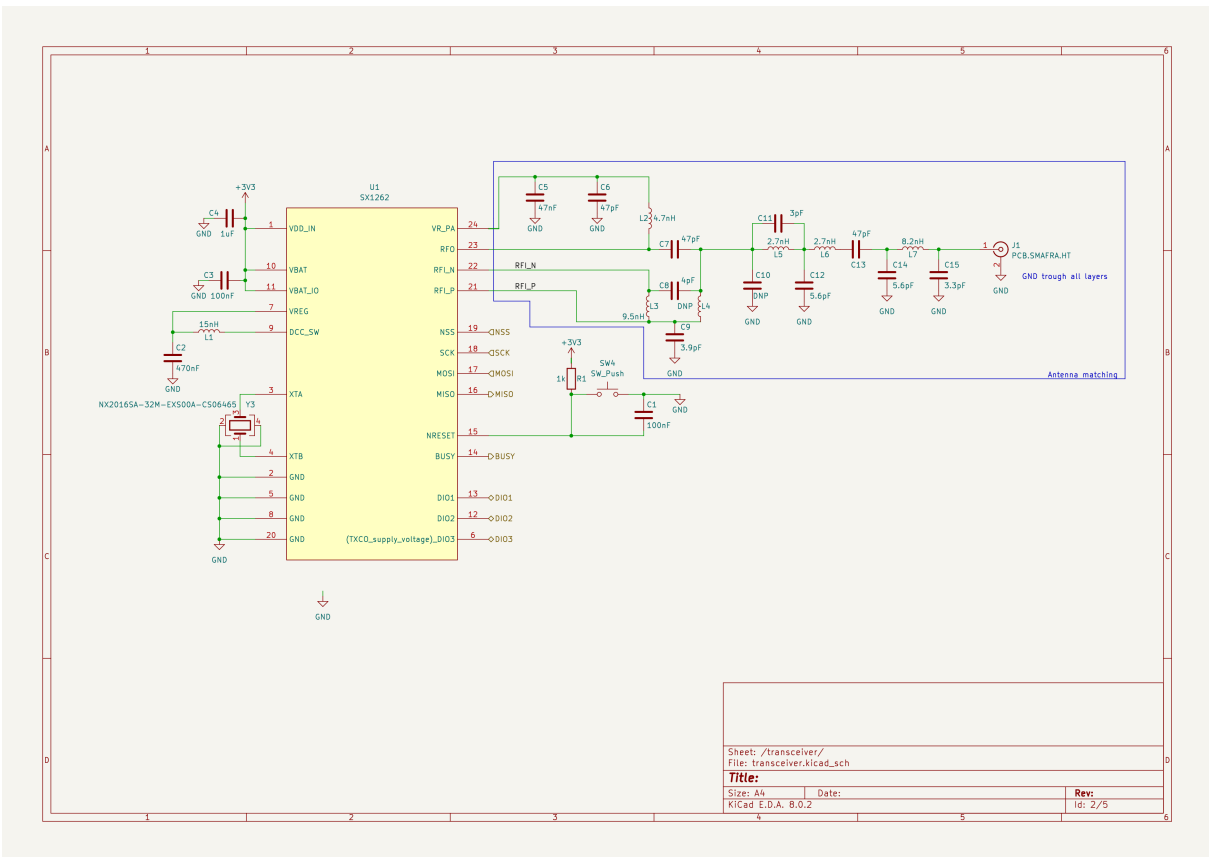
Tabel B.1 – jätk eelmiselt lehelt

Kogus	Komponendi tähistus	Komponent
7	R1, R13, R14	HP03-1K1
1	R2	ERA3AEB1543V
1	R3	ERA3AEB183V
1	R4	ERA3AEB683V
1	R5	ERJH3EF1000V
20	R6, R8, R9, R10, R11, R12, R17, R19, R22, R23	ERJPA3J103V
1	R7	CHP0603-FX-3011ELF
10	R15	AR0603-3K3-0.1
10	R16	AR0603-4K7-0.1
10	R18, R24	AR0603-100R-0.1
10	RFB1, RFB2	AR0603-1K-0.1
10	RFB3	AR0603-330R-0.1
2	SW3	PCM12SMTR
2	U1	SX1262IMLTRT
2	U2	TPS63001DRCT
2	U3	TPS61087DRCR
2	U4	LTC4121EUDPBF
1	U5	SHT20
3	U6	STM32L072CBT6
2	Y1	QT3CD-32.768KDZY-T
2	Y3	NX2016SA-32M
1	Pinnaseniiskuse sensor	DF SEN0193
1	Päikesepaneel	CL SM5P
1	Aku	ACCU 18650-3.5-10A
4	Ühendus	XHP2
3	Ühendus	XHP3
20	Ühendus	SXH 001T-P0.6
1	Lüliti	RD1113112R

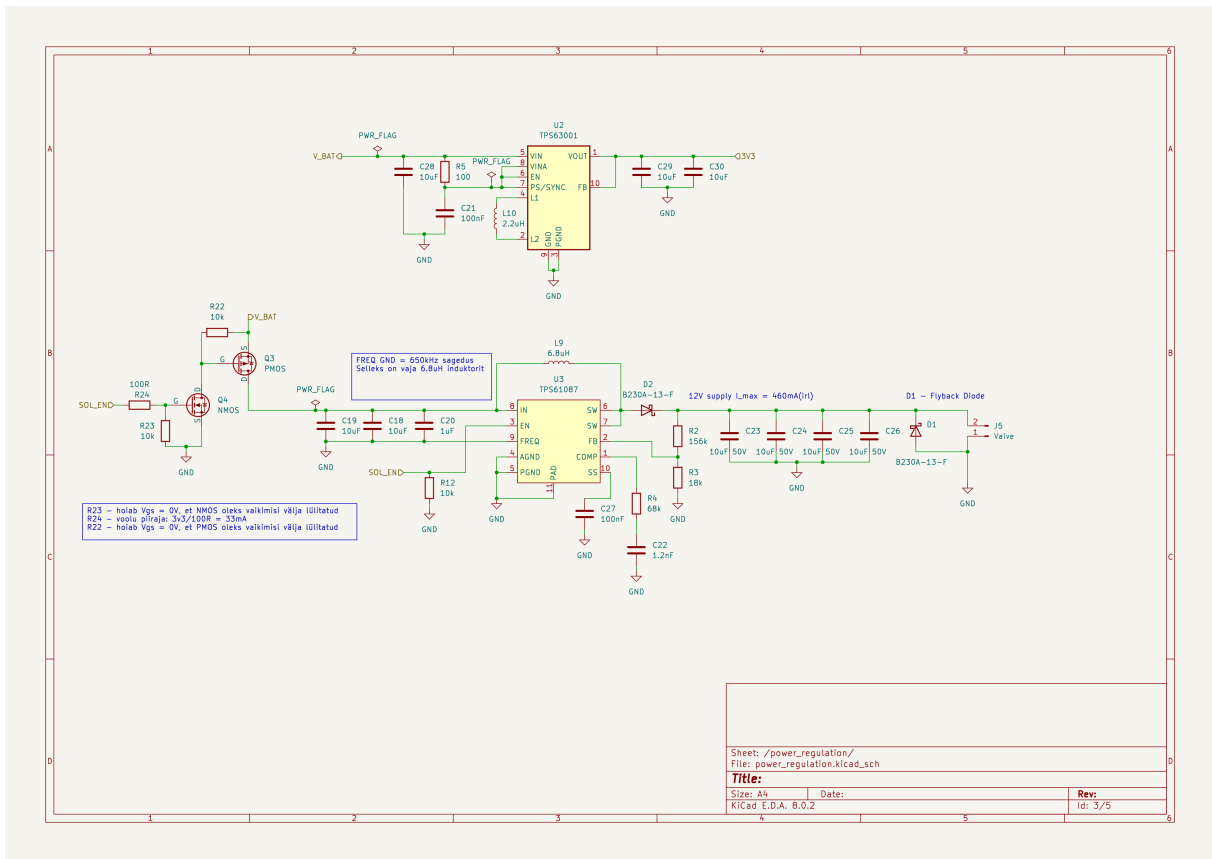
C Plaatide skeemid ja disainijoonised



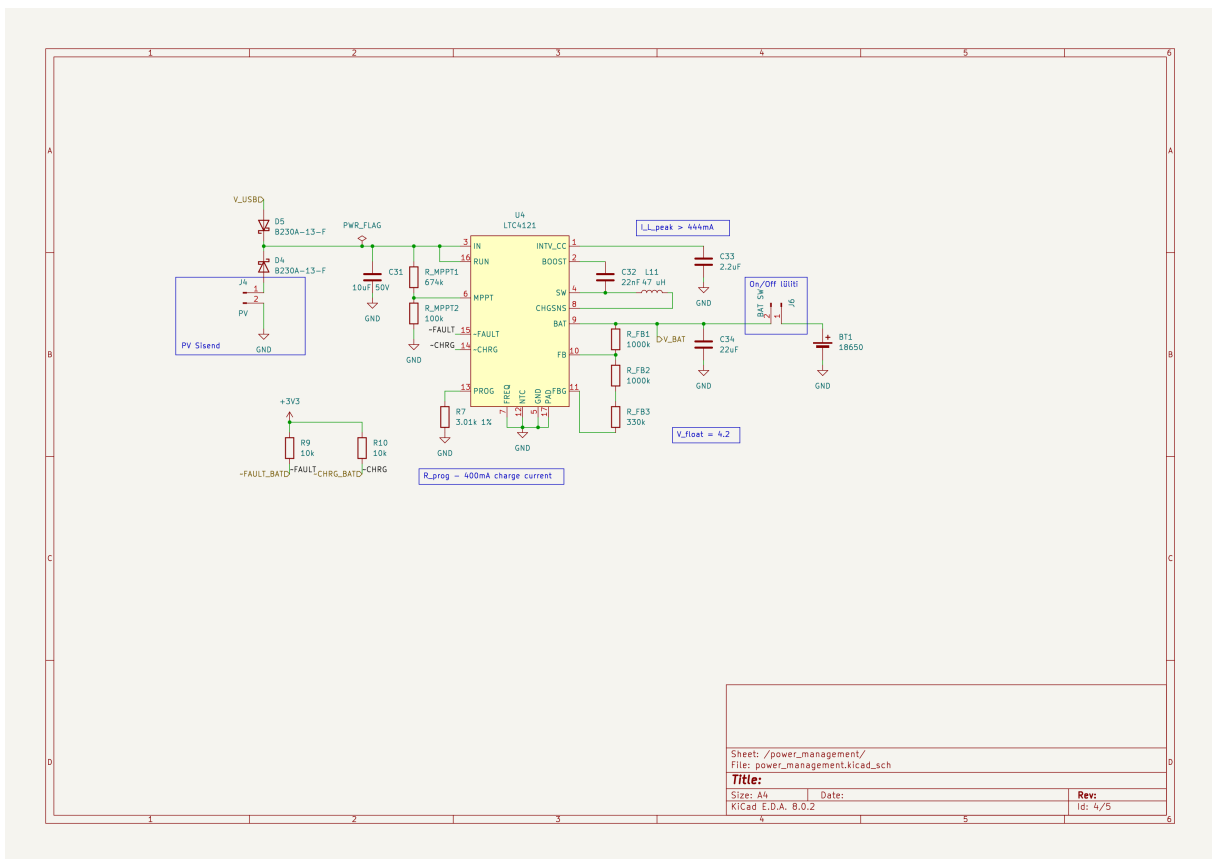
Joonis C.1: Kontrolleri MCU



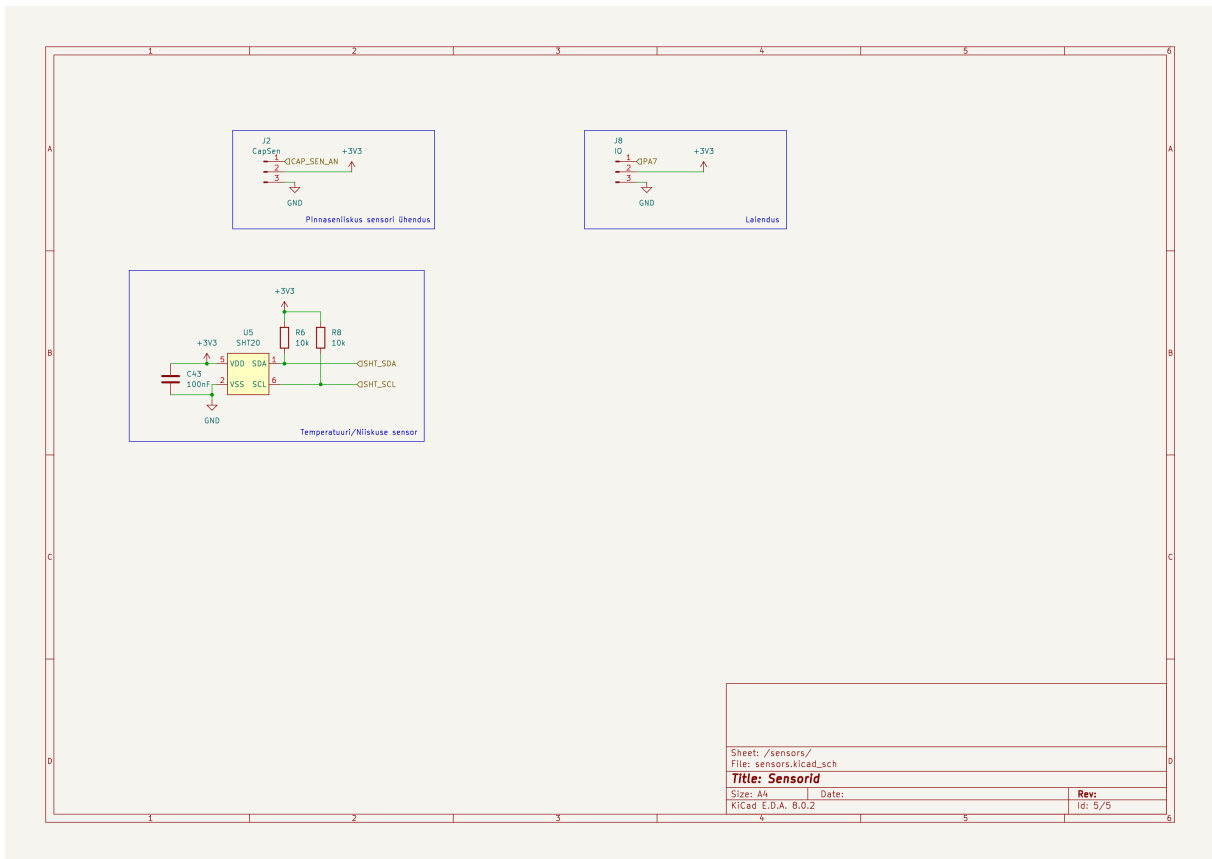
Joonis C.2: Transiiver



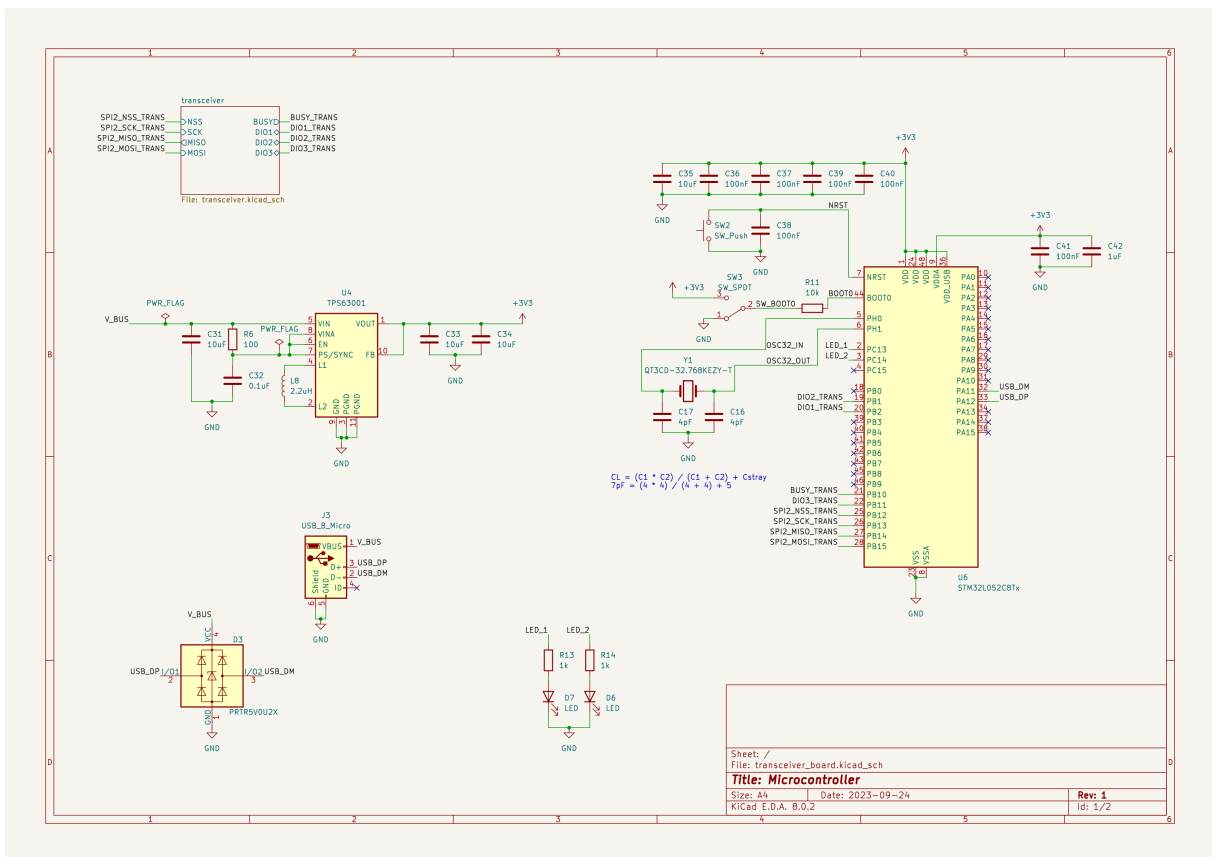
Joonis C.3: Pinge reguleerimine



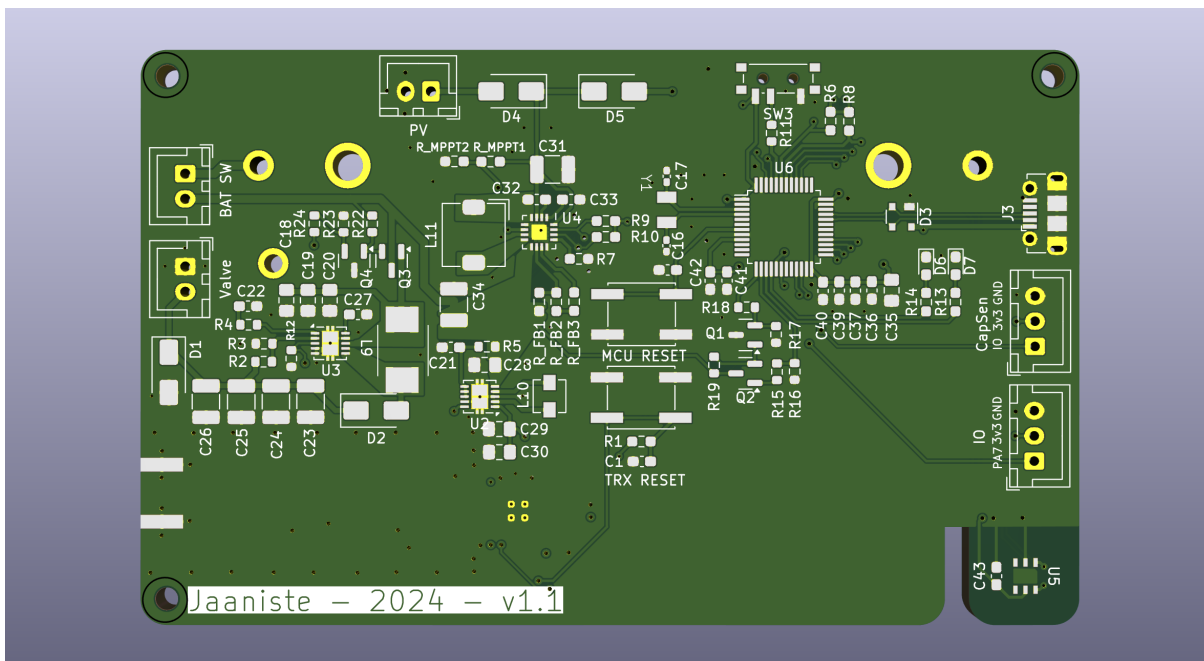
Joonis C.4: Aku/Päikesepaneeli haldus



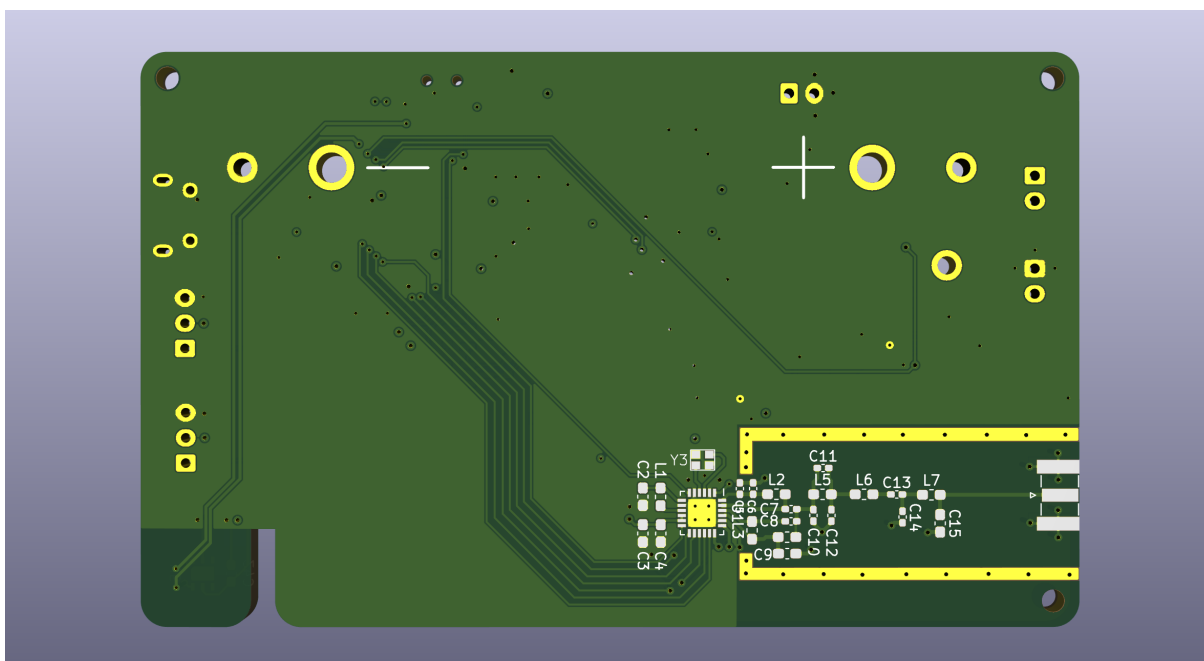
Joonis C.5: Sensorid/Väljundid



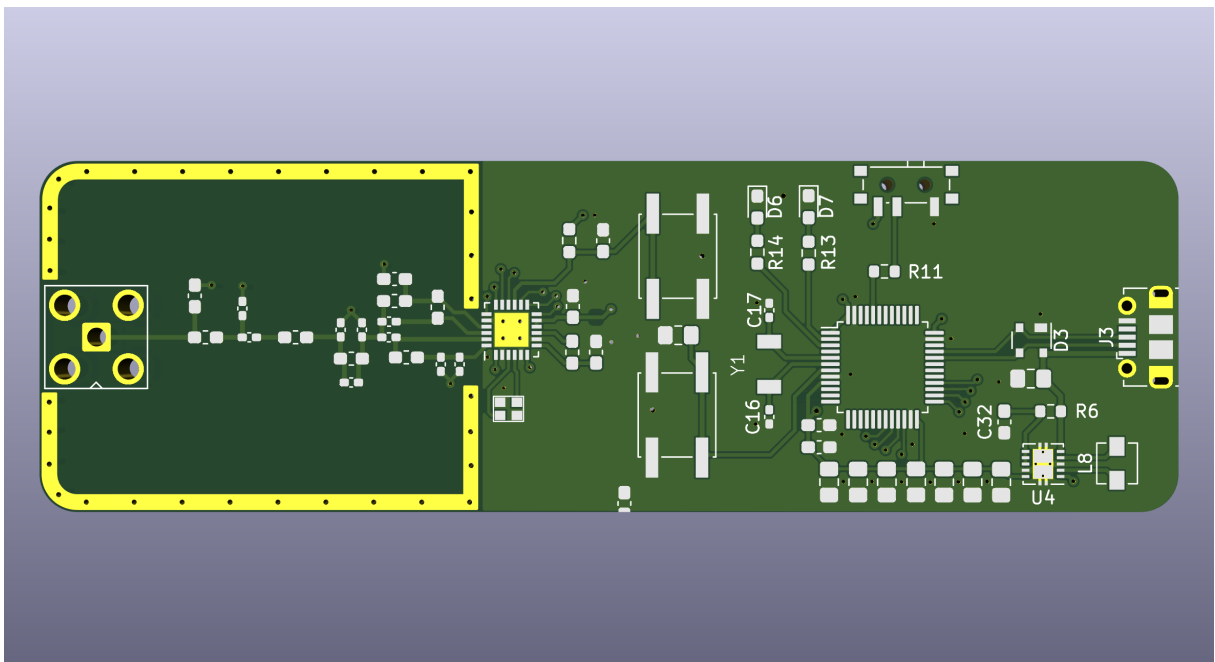
Joonis C.6: Raadiomooduli MCU



Joonis C.7: Kontrolleri esikülg



Joonis C.8: Kontrolleri tagakülg



Joonis C.9: Raadiomooduli plaat

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Marcus-Oliver Jaaniste

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

“LoRa’l põhinev kaugjuhtimis- ja kontrollisüsteem taimekasvatuses”

mille juhendajad on Heiki Kasemägi ja Jaanus Kalde

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’i 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.

Marcus-Oliver Jaaniste

20.05.2024