



**TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL**  
INSENERITEADUSKOND  
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**PARABOOLANTENNI JUHTIMINE LÄBI  
PROGRAMMEERITAVA LOOGIKAKONTROLLERI**

**CONTROLLING A PARABOLIC ANTENNA WITH A  
PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Andres Raag

Üliõpilaskood: 134882AAAB

Juhendaja: Toomas Vaimann

Kaasjuhendaja: Kristjan Pütsep

Tallinn 2021

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

"....." ..... 2021

Autor: Andres Raag .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 2021

Juhendaja: Toomas Vaimann .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....2021

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

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

Mina, Andres Raag (*autori nimi*)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Parabolantenni juhtimine läbi programmeeritava loogikakontrolleri (*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on Toomas Vaimann, (*juhendaja nimi*)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikoguse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

18.05.2021 (*kuupäev*)

---

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

## LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Andres Raag

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Paraboolantenni juhtimine läbi programmeeritava loogikakontrolleri

*Kuupäev:*  
18.05.2021

46 lk

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja:* Toomas Vaimann, Kristjan Pütsep

*Töö konsultant:* Kristjan Pütsep, Anton Rassõlkin

*Sisu kirjeldus:*

TalTech tudengisatelliidiprogrammi maajaama paraboolantenni tutvustus ja selle juhtimissüsteemi välja töötamine kasutades programmeeritavat loogikakontrollerit. Sobiva programmeeritava loogikakontrolleri valimine püstitatud valikukriteeriumite alusel.

Juhtimisprogrammi ettevalmistamine ja juhiste jätmine vana juhtimisprogrammi välja vahetamiseks. Juhtimisprogramm on koostatud tarkvara TwinCAT 3 abil ning valmis on saadud juhtimisprogrammi loogika osa.

*Märksõnad:* PLC, programmeeritav loogikakontroller, paraboolantenn, juhtimisprogramm, TwinCAT 3, sagedusmuundur.

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Andres Raag	<i>Type of the work:</i> Bachelor
<i>Title:</i> Controlling a parabolic antenna with a programmable logic controller	
<i>Date:</i> 18.05.2021	<i>46 pages</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor of the thesis:</i> Toomas Vaimann, Kristjan Pütsep	
<i>Consultant:</i> Kristjan Pütsep, Anton Rassõlkin	
<i>Abstract:</i> Description of the parabolic antenna of TalTech student satellite programme. Development of a control programme for the parabolic antenna using a programmable logic controller. Choosing a suitable programmable logic controller according to the requirements defined in the thesis.  Preparing the new control system for the replacement of the old control system. It is important to leave instructions for the replacement. The control programme is developed using TwinCAT 3 software. By the end of this thesis, the logic part of the control system is finalized.	
<i>Keywords:</i> Programmable logic controller, parabolic antenna, control system, control programme, TwinCAT 3, variable frequency drive.	

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	<b>Paraboolantenni juhtimine läbi programmeeritava loogikakontrolleri</b>
Lõputöö teema inglise keeles:	<b>Controlling a parabolic antenna with a programmable logic controller</b>
Üliõpilane:	<b>Andres Raag 134882AAAB</b>
Eriala:	<b>Elektrotehnika</b>
Lõputöö liik:	<b>Bakalaureusetöö</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Toomas Vaimann</b>
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt)	<b>Kristjan Pütsep</b>
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	<b>20/21 õppeaasta</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>18.05.2021</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

---

Kaasjuhendaja (allkiri)

## **1. Teema põhjendus**

Teemaga on vaja tegeleda kuna TalTechi satelliidi jälgimiseks ehitatud antenni juhtimine on hetkel problemaatiline ning vajab uuendamist. Teema on oluline Mektory satelliidi meeskonnale.

2019 aasta septembris paigaldati Mektory katusele 5-meetrise läbimõõduga paraboolantenn mille asendit on võimalik muuta tänu kahele mootorile. Nende mootorite juhtimine on aga problemaatiline ning antud lõputöö ülesandeks on antenni täpne, lihtne ja ohutu juhtimine läbi PLC kontrolleri.

## **2. Töö eesmärk**

Töö eesmärgiks on paraboolantenni mootorite juhtimiseks tarviliku PLC programmi kirjutamine.

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

- Mis on PLC kontrolleri ning kuidas käib selle programmeerimine,
- Olemasoleva antenni parameetrid ning nõuded, mida on vaja täita,
- Laboritingimustes PLC kontrolleri katsetamine ning juhtimisalgoritmi välja töötamine.

## **4. Lähteandmed**

Vajalikud andmed saadakse olemasolevast dokumentatsioonist, satelliidiga seotud meeskonnalt ning lõputöö juhendajatelt.

## **5. Uurimismeetodid**

Töö tulemuseni jõutakse uurides süviti Beckhoff PLC kontrolleri programmeerimise programmi TwinCAT 3. Selle jaoks on vaja lugeda manuaale ning õpetusi. Samuti tuleb kasutada Exceli programmi andmete töötlemiseks.

Programmi välja töötamine nõuab vastavalt olemasolevatele andmetele plokk skeemi või algoritmi koostamist ning selle alusel PLC programmi kirjutamist. Töös esineb palju katsetamist ning ka mõõtmisi.

## **6. Graafiline osa**

- Paraboolantenni joonis,
- PLC kontrolleri joonis ja seletus,
- Antennimootorite juhtimise programm.

## **7. Töö struktuur**

1. Sissejuhatus
  - 1.1. Lõputöö eesmärk
2. Paraboolantenni seadmete tutvustus
3. PLC kontrolleri tutvustus
4. Laboratoorne töö
  - 4.1. Andmete kogumine
  - 4.2. PLC kontrolleri programmi välja töötamine
5. Ideid tulevikuks/süsteemi paremaks tööks
6. Kokkuvõtte

## **8. Kasutatud kirjanduse allikad**

Lõputöö on kirjutatud kasutades raamatuid, teadusartikleid ja seadmete manuaale:

- Automaatika alused / Jaan Võrk (2008),
- Application of PLC in industrial automation / Margus Müür, Elmo Pettai, Urmo Lepiksoo (2011),
- Juhtimissüsteemi loomine TTÜ satelliidi maajaama paraboolantennile / Rasmus Tomsen (2018),
- Kasutatava kontrolleri manuaal.

## **9. Lõputöö konsultandid**

Prof. Anton Rassõlkin - sagedusmuunduri seadistamine.

Kristjan Pütsep – tööstuskontrolleri seadistamine ja programmeerimine.

## **10. Töö etapid ja ajakava**

- Kirjanduse läbitöötamine, lähteandmete kogumine ja tehnilise ülesande paika panek. (07.12.2020),
- Seadme juhtsüsteemi teoreetiline kirjeldus ja algoritm. (11.01.2021),
- Töö esimene versioon valmis ja esitatud juhendajale läbilugemiseks. (31.01.2021),
- Juhtsüsteemi loomine (tööstuskontrolleri programmeerimine) ja seadme käivitamine. (08.02.2021),
- Seadme verifitseerimine ja nõuetele vastavaks tunnistamine. (08.03.2020),
- Töö teine versioon valmis ja esitatud juhendajale läbilugemiseks. (31.03.2021),
- Lõputöö teoreetilise osa täiendamine ja kokkuvõtte kirjutamine. Juhendajalt saadud viimase tagasiside põhjal töö täiustamine ja viimistlemine. (30.04.2021),
- Töö lõplik versioon valmis. Lõputöö esitamine kaitsmiseks. (15.05.2021).



# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....	4
ABSTRACT .....	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	6
SISSEJUHATUS .....	10
1 MAAJAAMA TEHNILINE KIRJELDUS.....	12
1.1 Paraboolantenni kirjeldus.....	12
1.2 Asünkroonmootori kirjeldus.....	15
1.3 Sagedusmuunduri kirjeldus .....	16
2 PLC KIRJELDUS JA VALIK.....	19
2.1 PLC kirjeldus .....	19
2.2 PLC juhtimisprogrammi lähteandmed .....	21
2.3 PLC valikukriteeriumid .....	22
2.4 PLC mudelite võrdlus ja valik.....	22
2.5 Katsesend.....	23
3 JUHTIMISPROGRAMMI KOOSTAMINE.....	25
3.1 TwinCAT 3 tarkvara kirjeldus.....	26
3.2 Programmeerimine TwinCAT 3 tarkvaras .....	30
3.3 Juhtimisprogrammi diagrammid.....	33
4 EDASISED ARENGUSUUNAD.....	38
4.1 PLC sisendite ja väljundite aadressid .....	38
4.2 Sagedusmuundurite konfiguratsioon .....	39
4.3 Puudujäägid juhtimisprogrammi koostamisel .....	40
4.4 Paraboolantenni täiustamine .....	42
KOKKUVÕTE .....	43
SUMMARY .....	44
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	45

## SISSEJUHATUS

TalTech tudengisatelliidi projekt sai alguse 2014. aastal ning projekti käigus otsustati luua ka maajaam. Maajaam otsustati ehitada Mektory hoonesse, mis asub aadressil Raja 15, Tallinn. Maajaama ülesandeks on satelliitidelt piltide, videote ja muude andmete vastu võtmine ning satelliitidele uute ülesannete saatmine. Projekti raames on välja arendatud ja orbiidile saadetud kaks satelliiti - Koit ja Hämarik. Maajaama põhiülesanne on neid satelliite parabolantenni abil jälgida ning võimaldada andmesidet satelliitide ning maajaama vahel. Samuti võimaldab maajaam osutada teiste satelliitidega andmeside teenust ajal, kui side Koidu või Hämarikuga pole võimalik. [1]

Lõputöö ülesanne on luua juhtimissüsteem TalTech tudengisatelliidi projekti kuuluva Mektory maajaama parabolantennile. Uue juhtimissüsteemi loomine on vajalik, kuna antenni liigutavate mootorajamite eelnevat juhtimissüsteemi, kus lülitatakse kontaktorite abil sagedusmuundureid otsustati täiendada kasutades programmeeritavat loogikakontrollerit (PLC - *Programmable Logic Controller*). Lõputöö ülesanne on välja töötada parabolantenni juhtimisprogramm programmeeritava loogikakontrolleri jaoks. Lõputöö sisaldab ka antud juhtimissüsteemile sobiva PLC valikut. Eesmärk on luua juhtimisprogramm, mis suudab juhtida antenni mootorite tööd kasutades ära sagedusmuundurite võimekust elektrimootorite juhtimisel.

Lõputöö on jaotatud neljaks peatükiks, millest esimeses peatükis tutvustatakse parabolantenni tööpõhimõtteid ja selgitatakse, millised on parabolantenni eelised teiste antennide ees. Lisaks kirjeldatakse Mektory maajaamas olevat parabolantenni ning selle juhtimiseks kasutatavaid mootoreid ja sagedusmuundureid.

Teises peatükis selgitatakse, mis on PLC ja tuuakse välja PLC valikukriteeriumid. Valikukriteeriumite alusel võrreldakse erinevate tootjate PLC-sid ning valitakse välja sobiv PLC parabolantenni juhtimissüsteemi loomiseks. Samuti tutvustatakse juhtimissüsteemi arendamisel olulist rolli mänginud katsestendi.

Kolmandas peatükis kirjeldatakse parabolantenni juhtimisprogrammi loomisprotsessi. Lugejale tutvustatakse valitud PLC programmeerimiseks kasutatavat tarkvara TwinCAT 3 ning kirjeldatakse uue PLC projekti loomist ning juhtimisprogrammi arendamise protsessi. Kolmandas peatükis on lisaks lõputöö raames koostatud programmijuppide algoritmide diagrammid ning nende seletused.

Viimases ehk neljandas peatükis esitatakse uue juhtimissüsteemi konfigureerimiseks vajalikud andmed ning tuuakse välja vajalikud tegevused juhtimisprogrammi edasiseks arendamiseks. Samuti arutletakse antennisüsteemi edasise võimaliku täiustamise üle. Tuuakse välja soovitused ning ideed, mis aitaks maajaamal satelliitide jälgimise ülesandeid paremini täita.

# 1 MAAJAAMA TEHNILINE KIRJELDUS

Satelliitide Koit ja Hämarik jälgimiseks on Mektory hoonesse püstitatud TalTech tudengisatelliidiprogrammi maajaam. Maajaama kuulub paraboolantenn koos kõigi seadmetega ning paraboolantennile juhtimisprogrammi koostamiseks on vajalik tutvuda kõigi antenni juhtimisel kasutatavaid seadmeid.

## 1.1 Paraboolantenni kirjeldus

Satelliidid kasutavad andmete edastamiseks raadiolaineid. Satelliitide poolt edastatud andmete vastu võtmiseks kasutatakse antenne. Satelliitside toimub pikkadel distantsidel, sellest tulenevalt saadetud raadiolained hajuvad ning edastatav signaal nõrgeneb. Andmete piisava kvaliteedi tagamiseks on vajalik signaali võimendamine antenni abil. Satelliitside puhul kasutatakse tavapäraselt paraboolantenne.

Paraboolantenn on antennitüüp, mis koosneb paraboloidse kujuga reflektorpinna ning kiirgurist. Reflektorpinna ehk passiivlemendi eesmärgiks on koondada kõik reflektorpinna langevad paralleelsed raadiolained (raadiolained, mis on liikunud pika distantsi satelliidist antennini võib lugeda praktiliselt paralleelseks) reflektorpinna fookuses asuvasse kiirgurisse. Kiirguri ehk aktiivlemendi eesmärgiks on vastu võtta temale peegeldunud raadiolained ning saadud info edastada seadmele, mis on võimeline saadetud infot töötlema.

Paraboolantennid on paraboloidse pinnavormiga antennid, mille serv on tavapäraselt ringikujuline, kuid on olemas ka ellipsi ning ristküliku kujulisi paraboolantenne. Olenemata paraboolantenni kujust on suure hulga raadiolainete ühte punkti koondamisel võimalik võrreldes teiste antennitüüpidega saavutada väga häid võimendusnäitajad. Antenni võimendustegur  $G$  on antenni üks tähtsamaid karakteristikuid, mis näitab, kui palju signaali võimendatakse. Mida suurem on võimendustegur, seda selgem on vastuvõetav signaal. Paraboolantenni ligikaudne võimendus arvutatakse valemiga (1.1) [2]. Antud valemist nähtub, et paraboolantenni võimendustegur on sõltuvuses antenni diameetri ning raadiolaine lainepikkuse suhtest. Kuna antenni diameeter on võrreldes raadiolaine lainepikkusega tunduvalt suurem, on paraboolantennidel tavapäraselt kõrged võimendusnäitajad. Käesolevas lõputöös käsitletava antenni ligikaudne arvutuslik võimendus on valemi (1.1) abil ligikaudu 52 dB.

$$G = 10 \log_{10} \left( \frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 e_A \quad (1.1)$$

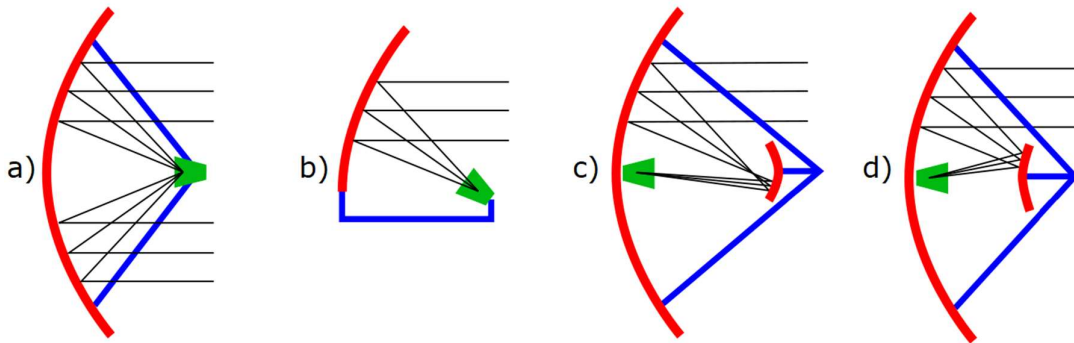
Kus  $G$  – võimendus, dB,

$d$  – ringi kujulise parabooli diameeter, m,

$\lambda$  – raadiolaine lainepikkus, m,

$e_A$  – peegeldi pinna efektiivsust iseloomustav tegur mis jääb tavaliselt 0,55 ja 0,70 vahele.

Joonisel 1.1 on välja toodud paraboolantennide tüübid kiirguri asetuse järgi. Jooniselt on näha, et kõikide antenni konstruktsioonide puhul jääb kiirgur ning selle kinnituseks kasutatavad konstruktsioonid reflektorpinna ette ning blokeerivad teatud osa signaalist. See vähendab paraboolantenni üldist efektiivsust, kuna kiirgurisse jõuab vähem raadiolaineid. Kadunud signaali osakaalu on võimalik vähendada reflektorpinna suurendamisega ning vastuvõtja kinnistuskonstruktsioonide pindala vähendamisega.



Joonis 1.1. Paraboolantennide tüübid a) aksiaalantenn b) offset antenn c) *cassegrain* antenn d) *gregorian* antenn [3]

Joonisel 1.2 on kujutatud Mektory maajaama 5-meetrise läbimõõduga aksiaalantenn. Sattelliidid Koit ja Hämarik on andmete edastamiseks maajaamale projekteeritud kasutama mikrolainete X-riba vastavalt 10,460 GHz ja 10,465 GHz sagedusega mikrolaineid [4] [5]. Antud sagedustel on maajaamal võimalik kiire andmete vastuvõtmine, kuna raadiolainete sageduse kasvades kasvab ka ajaühikus saadetavate bittide arv. Andmete vastuvõtmise kiirus on oluline, kuna satelliitide ülelend maajaama nägemisulatuses on lühike. Seetõttu on vajalik andmete vastuvõtmise ajaaken maksimaalselt ära kasutada. [1]



Joonis 1.2. Paraboolantenn Mektory hoone katusel [6]

Kuna paraboolantenn on suundantenn, on vajalik suunata antenn satelliidi suunas. Antenni suunamise täpsuse ning juhtimise seisukohalt on oluline teada, kui suur võib olla antenni kõrvalekalle satelliidi suunast [7]. Antud maksimaalse kõrvalekalde nurga arvutamiseks kasutatakse valemit (1.2) [2]. Valemi (1.2) põhjal arvutades on Mektory paraboolantenni lubatud maksimaalne kõrvalekalde nurk  $0,40^\circ$ . Kõrvalekalde vältimiseks peab paraboolantenni juhtprogramm teadma täpselt satelliidi asukohta ning suutma antenni sujuvalt satelliidi trajektooriga hoida.

$$\psi = 70 \frac{\lambda}{d} \quad (1.2)$$

Kus  $\psi$  - kõrvalekalde nurk,  $^\circ$ ,  
 $\lambda$  - raadiolaine lainepikkus, m,  
 $d$  - ringi kujulise parabooli diameeter, m.

Käesolevas lõputöös käsitletava paraboolantenni suunamine toimub kahe tiguülekanedega varustatud mootorajamiga. Üks mootor võimaldab pöörata antenni horisontaalselt ehk asimuudi suunal kahes suunas kuni  $360^\circ$ . Pidev pöörlemine pole võimalik, kuna antennile kinnituvad juhtmed ei võimalda lõputut pöörlemist. See võib tekitada probleeme, juhul kui satelliidi trajektoori jälgimiseks on vajalik ületada juhtimisprogrammi poolt sätestatud asimuudi suunaline pöörlemise piirang. Teine mootor liigutab antenni vertikaalselt ehk elevatsiooni suunal kuni  $180^\circ$ . Mõlema liigendi asendit jälgivad kaks absoluutset pöördkooderit, andes süsteemile pidevalt infot antenni täpse asendi kohta. Absoluutne pöördkooder annab iga võlli asendi kohta kordumatu digitaalse koodi. Täiendavaks turvalisuseks on kasutusel ka lõpulülid, mis tuvastavad,

kui antenn on liiga kaugemale pööranud ning annavad süsteemile tagasiside edasise liikumise keelamiseks. [8]

## 1.2 Asünkroonmootori kirjeldus

Asünkroonmootorid (Joonis 1.3) on kõige levinumad vahelduvvoolul töötavad elektrimootorid maailmas. Võrreldes alalisvoolumootoritega on asünkroonmootoritel lihtne konstruktsioon, mis tagab töökindluse, madala hinna ja lihtsa hooldatavuse [9]. Asünkroonmootor koosneb liikumatust staatorist ning pöörlevast rootorist. Pöörlemine saavutatakse staatorimähistes tekitatud pöörleva magnetvälja abil, mille tulemusena indutseeritakse elektrivool rootorimähises. Asünkroonmootori puhul on staatoris pöörleva magnetvälja kiirus ja rootori pöörlemise kiirusest suurem. Seda kiiruste vahet nimetatakse libistuseks ning see suurus muutub vastavalt mootori koormuse muutusele. Libistuse arvutatakse valemiga (1.3).

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1.3)$$

Kus  $s$  - libistus,  
 $n_s$  - sünkroonkiirus, p/min,  
 $n$  - rootori kiirus, p/min.

Asünkroonmootori pöörlemiskiirus arvutatakse valemiga (1.4).

$$n_0 = \frac{60f}{p} \quad (1.4)$$

Kus  $n_0$  - staatori magnetvälja pöörlemiskiirus, p/min,  
 $f$  - elektrimootori toitepinge sagedus, Hz,  
 $p$  - mootori pooluste arv.

Valemist (1.4) on näha, et mootori pöörlemiskiiruse muutmine on võimalik kas pooluste arvu või sageduse muutmisega. Pooluste arv on igal elektrimootoril kindel suurus, seega ei ole olemasoleva mootori kiiruse muutmine sel meetodil võimalik. Elektrimootori toitepinge sagedust muutes on võimalik saavutada mistahes soovitud pöörlemiskiirus. Kuna vooluvõrgust saadav vahelduvpinge on konstantse sagedusega, on sageduse muutmiseks vajalik sagedusmuundur. Asünkroonmootori ja sagedusmuunduri kombinatsiooni kasutamine märkimisväärsed eelised võrreldes alternatiividega. [10]



Joonis 1.3. Kolmefaasiline asünkroonmootor Siemens 1AV2083C [11]

Tabelis 1.1 on näha Kolmefaasiline asünkroonmootori Siemens 1AV2083C karakteristikud. See mootor on ka kasutuses Mektory maajaama paraboolantenni juhtimisel.

Tabel 1.1 Kolmefaasilise asünkroonmootori Siemens 1AV2083C karakteristikud [12]

Ühendusviis	Tähtühendus
Nimipinge	400 V
Nimivool	1,65 A
Võimsus	0,55 kW
Võimsustegur	0,66
Pöörlemiskiirus	935 p/min
IE klass	IE2
IP klass	IP55

### 1.3 Sagedusmuunduri kirjeldus

Sagedusmuunduri (Joonis 1.4) ülesanne on muuta vooluvõrgust saadava vahelduvpinge sagedust vastavalt vajadusele. Sagedusmuunduri kasutamisel on võimalik mootori sujuv käivitamine, täpne juhtimine ja sujuv peatamine. Sagedusmuundur koosneb kolmest osast mis on kujutatud joonisel 1.5. Alaldi (a) muundab dioodsilla abil vahelduvpinge alalispingeks. Kondensaator (b) filtreerib saadud alalispinge

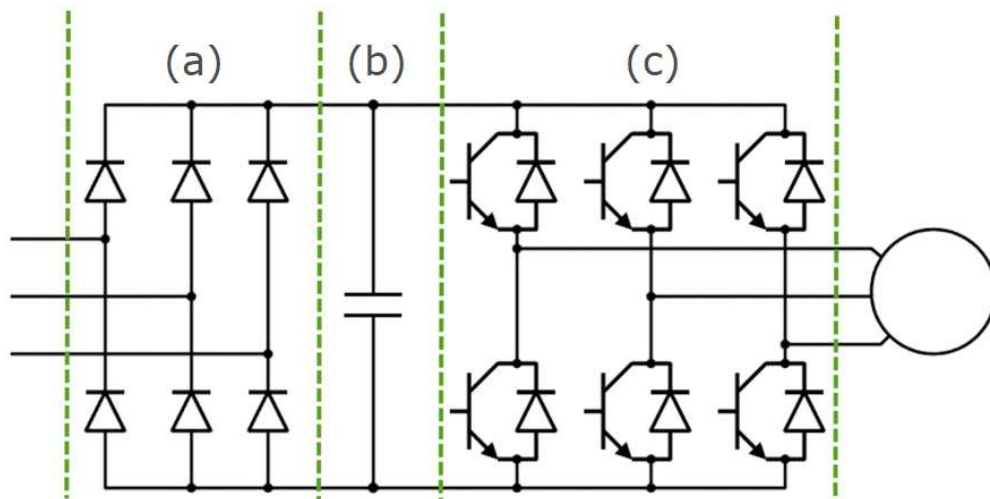


ebatasasustest. Inverter (c) koosneb transistoritest ning muundab alalispinge transistoride kiire lülitamisega vahelduvpingeks. [13]

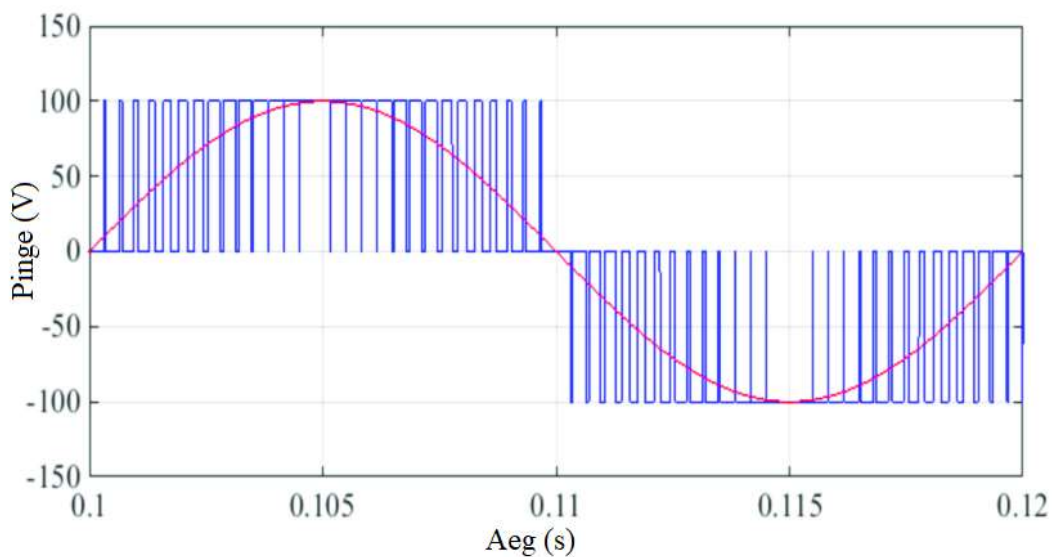


Joonis 1.4. Sagedusmuundur Omron 3G3MX2-A4004 [14]

Sagedusmuundurist saadav vahelduvpinge ei ole siinuseline vaid koosneb konstantse amplituudiga ning varieeruva kestusega pingepulssidest. Sellist juhtimismeetodit nimetatakse pulsilaisumodulatsiooniks (PWM – *pulse width modulation*). Joonisel 1.6 on siniselt kujutatud sagedusmuundurist tuleva ühe faasi pingepulssid ning punaselt on kujutatud pingepulsside keskmine väärtus. Pikendades või lühendades pingepulsi kestust on võimalik tõsta või langetada pinge keskmist väärtust. Pinge keskmise väärtuse liigutamise kiirus positiivselt poolt negatiivsele võimaldab varieeruva sagedusega vahelduvpinge tekitamist. [15]



Joonis 1.5. Sagedusmuunduri elektriskeem [16]



Joonis 1.6. Ideaalne PWM signaal [15]

Tabelis 1.2 on näidatud sagedusmuunduri Omron 3G3MX2-A4004 karakteristikud. See sagedusmuundur on kasutusel kasutusel Mektory maajaama paraboolantenni elektrimootorite juhtimisel.

Tabel 1.2 Sagedusmuunduri Omron 3G3MX2-A4004 karakteristikud [17]

Nimipinge	400 V
Nimivool	2,1 A
Maksimaalne mootori võimsus konstantse momendiga	0,4 kW
Maksimaalne mootori võimsus varieeruva momendiga	0,75 kW
Väljundsagedus	0-400 Hz
Väljundpinge	0-480 V
Kommunikatsioonipordid	Serial RS-485, USB

## 2 PLC KIRJELDUS JA VALIK

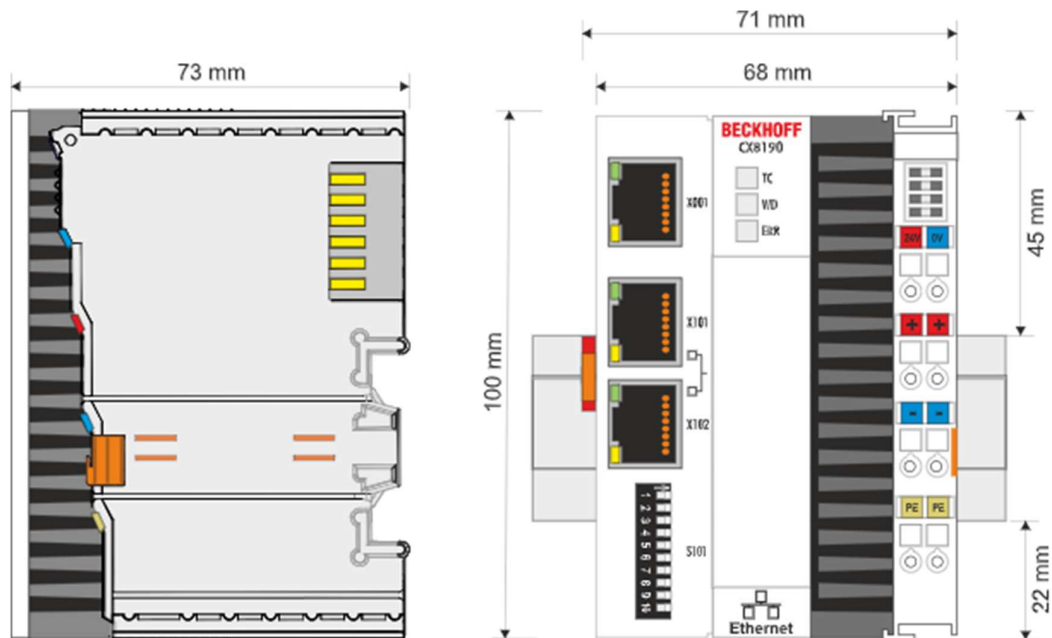
### 2.1 PLC kirjeldus

PLC ehk programmeeritav loogikakontroller on oma olemuselt väga väikeste mõõtmetega arvuti. PLC-de kasutamine on levinud tööstuses ja automaatikasüsteemides, sest nad on loodud töötama tolmustes keskkonnatingimustes. PLC-l on olenevalt tootjast olemas järgmised komponendid:

- Toitemoodul mis varustab PLC-d toitepingega. Toitemoodul ise saab toite vooluvõrgust ning muundab omakorda elektrivõrgust saadava vahelduvvoolu toitepinge PLC-le sobivaks alalisvooluks. Mõne tootja puhul on toitemoodul juba keskjuhtimismoodulisse sisse ehitatud. Kõik tootjad ei paku oma lahendustes loogikakontrolleriga integreeritud toitelahendust ning sel juhul tuleb süsteem varustada välise toiteploki.
- CPU ehk keskjuhtimismoodul on PLC protsessor. Protsessor tegeleb kõikide arvutustega ja salvestatud programmi juhtimisega. Programmi juhtimiseks on vajalik kõikide sisendite pidev jälgimine ning sisendite muutustest ja programmist sõltuvalt väljundite muutmine. PLC programmi programmeerimine teostatakse tavaliselt PLC tootja poolt pakutava spetsiaaltarkvaraga. Programmeerimiseks on vajalik, et programmeerimisarvuti ning PLC keskjuhtimismooduli vahele on tekitatud andmeside.
- Signaalimoodulid on sisend- väljundmoodulid, mille külge ühendatakse süsteemi sisendite ja väljundite kaablid. Sisendid ja väljundid saavad olla kas digitaalsignaali (*DI – Digital Input* ja *DO – Digital Output*) või analoogsignaali (*AI – Analog Input* ja *AO – Analog Output*). Signaalimoodul muudab sisenenud signaalid PLC protsessori jaoks aru saadavateks suuruseks. Analoogsignaali puhul jääb signaali väärtus teatud vahemiku vahele. Kui kasutatakse vooluga juhtimist, siis on vahemik tavaliselt 4 - 20 mA. Pingega juhtimise puhul jääb analoogväärtus tavaliselt kas 0 - 10 V või 0 - 24 V vahele. Erinevate tootjate puhul on vahemikud erinevad. Digitaalsignaali muudetakse teatud diskreetseks väärtuseks ehk signaal on kas aktiivne või mitteaktiivne.
- Andmesidemoodul võimaldab süsteemil kasutada erinevaid levinud protokolle näiteks PROFIBUS, Modbus, Ethernet. Seega toob andmesidemoodulite kasutamine endaga kaasa võimaluse kasutada suurt hulka erinevaid seadmeid.

[18]

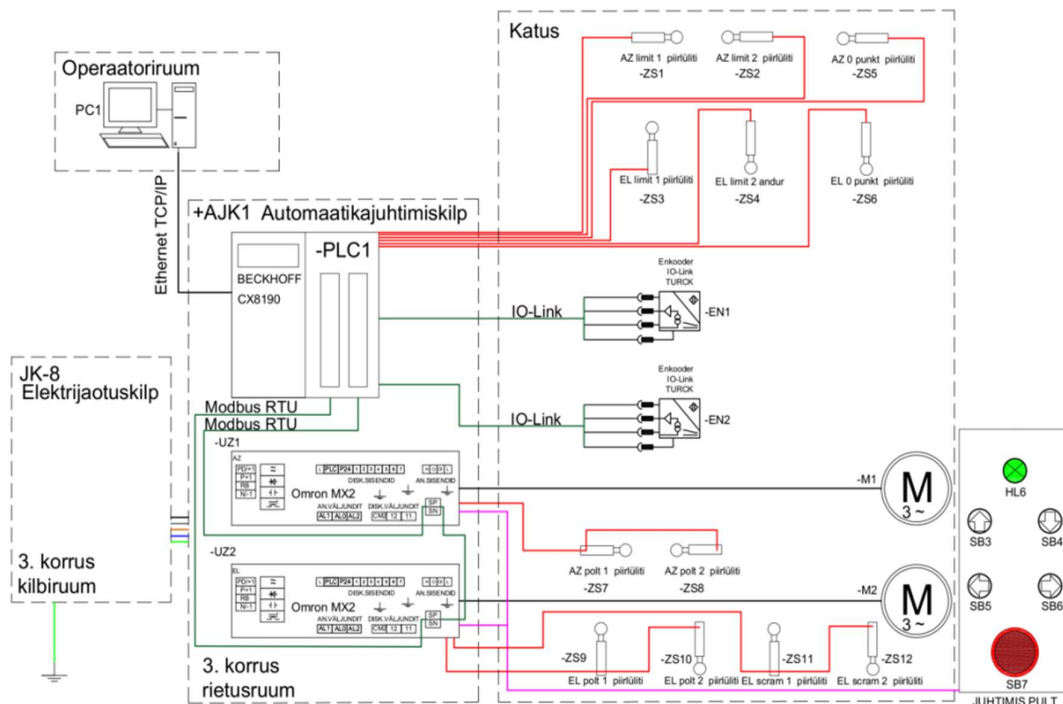
PLC suureks eeliseks on nende kasutamisega kaasnev paindlikkus. PLC poolt juhitava protsessi muutmiseks ei ole vaja teha aeganõudvaid kaabeldustöid [19]. Muutused saab teha tarkvaraliselt, juhtimisprogrammi ümber programmeerides. PLC-d on ehituselt robustsed, kuna nad peavad olema võimelised taluma tööstustes sageli esinevaid vibratsioone ning tolmu. Vastavalt vajadusele saab PLC keskjuhtimismoodulile juurde lisada erinevaid moduleid, mille lisamine on tehtud lihtsaks tänu sisseehitatud siinidele. Joonisel 2.1 on kujutatud PLC Beckhoff CX8190 mis kinnitub lihtsasti DIN liistule ning külgsuunas on kollaselt kujutatud klemmid, mille abil saab kergesti ühendada lisamoduleid.



Joonis 2.1. Beckhoff CX8190 külgs- ja otsevaates [20]

## 2.2 PLC juhtimisprogrammi lähteandmed

Juhtimisprogrammi koostamiseks on vajalik koguda lähteandmed. Lähteandmete kogumisel on põhiliselt lähtutud Dmitri Kurasjovi magistritööst „TalTech tudengisatelliidi maajaama paraboolantenni elektrivarustuse projektdokumentatsioon“. Nimetatud magistritöös on korrastatud Mektory maajaama elektrisüsteem ja koostatud uus dokumentatsioon. Joonisel 2.2 on kujutatud paraboolantenni juhtimissüsteemiga seotud seadmed. [8]



Joonis 2.2. Seadmestiku struktuurskeem [8]

Järgnevalt on üles loetud seadmed, mis on olulised PLC juhtimisprogrammi koostamiseks:

- Programmeeritav loogika kontrolleri,
- Kolmefaasiline asünkroonmootor Siemens 1AV2083C, 2tk (Tabel 1.1),
- Sagedusmuundur Omron 3G3MX2-A4004, 2tk (Tabel 1.2),
- Opereerimisarvuti,
- Piirlüliti Comepi EM1G14ZU, 6tk,
- Piirlüliti ABB LS32M45B11, 4tk,
- Pöördkooder IO-link Turck, 2tk,
- Ülekandesüsteem DB125B, 2tk. [8]

Struktuurskeemil (Joonis 2.2) on kujutatud kõik seadmed, mis on süsteem juhtimisel olulised ja mis peavad sobituma valitud PLC-ga. Olemasolevate seadmete ning lähteandmete põhjal tekivad PLC valimiseks konkreetsed nõuded ja piirangud. Siemensi asünkroonmootorite käivitamise ja kontrolli üle vastutavad kaks Omroni sagedusmuundurit. Sagedusmuundur on ühendatud PLC-ga kasutades ModBus RTU protokoll RS-485 standardit. Modbus protokoll on ülema ja alama seadme vaheline kindlate sõnumitega suhtlev protokoll, mis suudab kiiresti liigutada andmeid mõlemas suunas [21]. Kahe asünkroonmootori poolt pööratavate parabolantenni liigendite täpset asendit jälgivad kaks pöördkoodrit tootjalt Turck. Need pöördkoodrid kasutavad PLC-ga suhtlemiseks IO-link protokoll. IO-link on sensorite ja aktuaatorite universaalseks ühendamiseks loodud tehnoloogia [22]. Struktuurskeemil on näidatud kuus piirlüliti, mis vajavad PLC-ga ühendumiseks kuut digitaalset sisendit. Opereerimisarvuti ja PLC vahel toimub suhtlus kasutades Etherneti. Perspektiivsete võimaluste lisamise eesmärgil jäetakse tavapäraselt PLC-l vabaks teatud arv sisendeid ja väljundeid.

## **2.3 PLC valikukriteeriumid**

PLC valikukriteeriumi üheks aluseks on operatsioonideks vajalike sisendite ja väljundite olemasolu ning võimalus nende arvu laiendusmoodulitega suurendada. TalTech tudengisatelliidi projekti raames piisab kontrollerial kaheksast digitaalsest sisendist ja kuueteistkümnest digitaalsest väljundist. Samuti on vajalik ühendatavus kontrolleri ja kõikide süsteemi seadmete vahel.

Parabolantenni juhtimissüsteemi jaoks on vajalikud Ethernet, Modbus RTU ning IO-link. Kontrolleri valikul on oluline ka silmas pidada süsteemi jätkusuutlikkust ning kontrolleri või laiendusmoodulite saadavust tulevikus juhul, kui esineb seadme välja vahetamise vajadus. Kuna projekti eelarve on piiratud, on oluliseks faktoriks ka PLC komplekti hind.

## **2.4 PLC mudelite võrdlus ja valik**

Tabelis 2.1 on välja toodud kolme tootja PLC mudelid, mida kaalutakse parabolantenni juhtimissüsteemi loomiseks ning nende vastavused valikukriteeriumitele.

Esimeseks võimaluseks on laia mudelivalikuga ABB AC500 PLC seeria, mis sisaldab erineva otstarbega keskjuhtimismoduleid ja kõigi keskjuhtimismoodulitega ühilduvaid

signaali- ja andmesidemooduleid. IO-link seadmetega ühendamine pole aga võimalik, seega ABB AC500 seeria PLC ei vasta varasemalt esitatud tingimustele. [23]

Teise variandina kaalutakse maailma suurimat PLC-de tootja, Siemens, Simatic S7-1500 seeria keskuhtimismoodulit, mis koos laiendusmoodulitega täidavad seatud tingimusi täielikult. Lisaks keskuhtimismoodulile on vajalik valida sisend-, väljund-, IO-link- ja Modbus moodulid. [24]

Viimase valikuvariandina on Beckhoffi CX8100 seeria PLC-d, mida tootja kirjeldab kui väga avatud programmeerimisvõimalustega kompaktsed kontrollid. Beckhoffi PLC suudab täita kõik tingimused ning seda väiksema hinna juures kui Siemens Simatic S7-1500 seeria PLC. Sellest tulenevalt osutub valituks Beckhoffi PLC.

Tabel 2.1. PLC mudelite võrdlus

PLC nimi	Beckhoff CX8100	Simatic S7-1500	ABB AC500
Ethernet	jah	jah	jah
Laienduste võimalus	jah	jah	jah
IO-link	jah, laiendusega	jah, laiendusega	ei
Modbus	jah, laiendusega	jah, laiendusega	jah
Väljundid DO	laiendusega 16	laiendusega 16	laiendusega 16
Sisendid DI	laiendusega 8	laiendusega 16	laiendusega 8
Hind	~1000 €	~1100 €	-

Keskuhtimismooduliks on sobivaim CX8190 (Joonis 2.1), mis on varustatud kahe Ethernet pordiga ning millele saab tänu külgedel asuvatele kontaktidele lisada vastavalt vajadusele lisamooduleid. Controllerile on püstitatud tingimuste täitmiseks vajalik lisada järgnevad laiendusmoodulid:

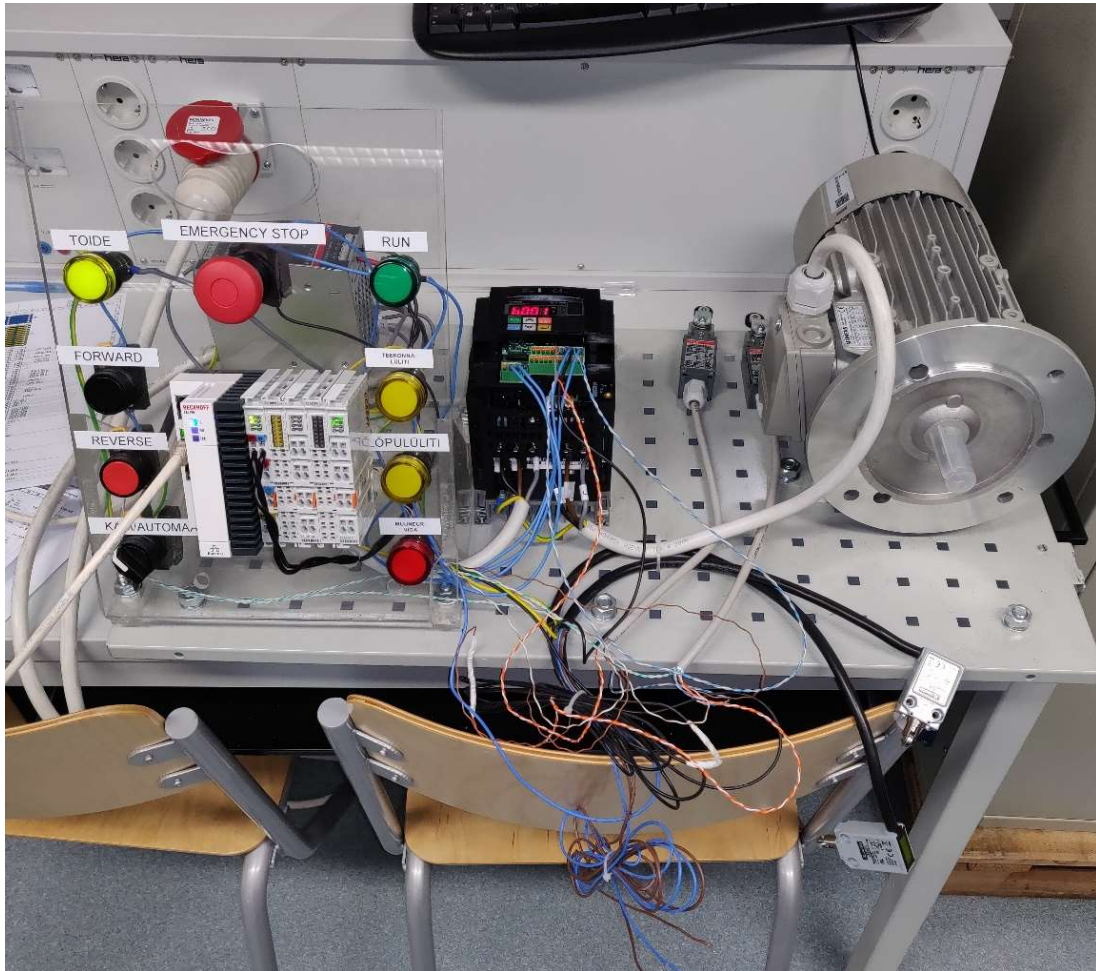
- Moodul EL1809, millega on võimalik ühendada kuni 16 digitaalset sisendit;
- Moodul EL2008, millega on võimalik ühendada kuni 8 digitaalset väljundit;
- Moodul EL6021, mis ühildub Modbus RTU protokolliga;
- Moodul EL6224, millega on võimalik ühendada kuni neli IO-link seadet. [25]

## 2.5 Katsestend

Juhtimisprogrammi koostamine viiakse läbi TalTechi energeetikamajas elektrimasinate õppelaboratooriumis kus on olemas katsestend (Joonis 2.3) identsete seadmetega mis on ka kasutusel Mektory hoone katusel oleva paraboolantennisüsteemil.

Katsestend koosneb kolme faasilisest asünkroonmootorist Siemens 1AV3083C, sagedusmuundurist Omron 3G3MX2-A4004, 24 V toiteploki ABB cp-e 24/5.0, Beckhoffi programmeeritavast loogikakontrollerist CX8190 koos moodulitega EL1809,

EL2008, EL6224 ja EL6021. Sagedusmuunduriga on ühendatud kaks Lovato lõpulülitit ja kaks ABB teekonnalülitit. Lisaks on katsestend varustatud käsitsi- või automaatjuhtmise lülitiga ning elektrimootorit päri- või vastupäeva juhtimiseks mõeldud nuppudega. Katsestendi peal on viis märguandetuld ning ohutuse tagamiseks on hädastopp nupp. Katsestendi eesmärk on kontrolleri, sagedusmuunduri ja elektrimootori ühildamine ning juhtimisprogrammi koostamine ja testimine.

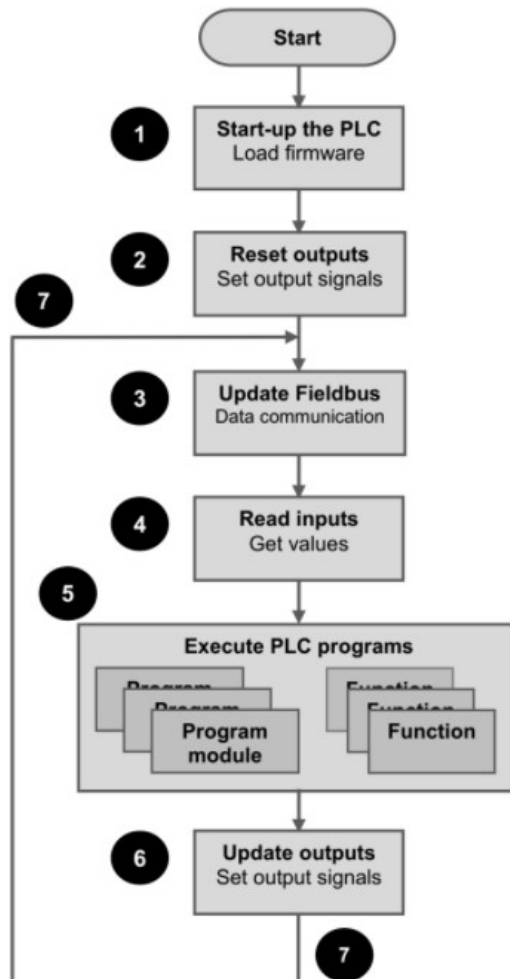


Joonis 2.3. Katsestend TalTechi energeetikamajas elektrimasinate õppelaboratooriumis



### 3 JUHTIMISPROGRAMMI KOOSTAMINE

Juhtimisprogrammi koostamiseks on vaja eelnevalt mõista, kuidas PLC töötab ja kirjutatud koodi töötleb. PLC töötab tsükliliselt ning tsükli pikkus on süsteemi arendaja määrata. Programmis TwinCAT 3 saab seda teha *SYSTEM* → *Tasks* → *Plc Task*. Tsükli pikkuse valimisel tuleb arvestada, et PLC jõuaks tsükli kestuse jooksul sooritada kõik protsessid, vastasel juhul pole tagatud süsteemi stabiilsus. Joonisel (Joonis 3.1) on kujutatud PLC esmakäivituse tsükkel (etapid 1..7) ja töötsükkel (etapid 3..7). Nagu joonisel (Joonis 3.1) näha, loeb PLC iga töötsükli alguses kõik sisendite väärtused, seejärel viib läbi sisendite väärtuste põhjal kõik arvutused, ehk töötab läbi kogu programmikoodi ja viimaks kirjutab väljundite väärtused, mis väljenduvad väljundseadmete aktiveerimises. Peale väljundite määramist algab kogu protsess uuesti etapist 3. [26]



Joonis 3.1. PLC tsüklilise opereerimise diagramm [26]

### 3.1 TwinCAT 3 tarkvara kirjeldus

Beckhoffi programmeeritavate loogikakontrollerite programmeerimiseks kasutatakse Beckhoffi poolt Visual Studio platvormile valmistatud programmeerimiskeskonda TwinCAT 3. See programm on mõeldud Beckhoffi poolt toodetud programmeeritavate loogikakontrollerite ja nende lisade ühildamiseks ja programmeerimiseks.

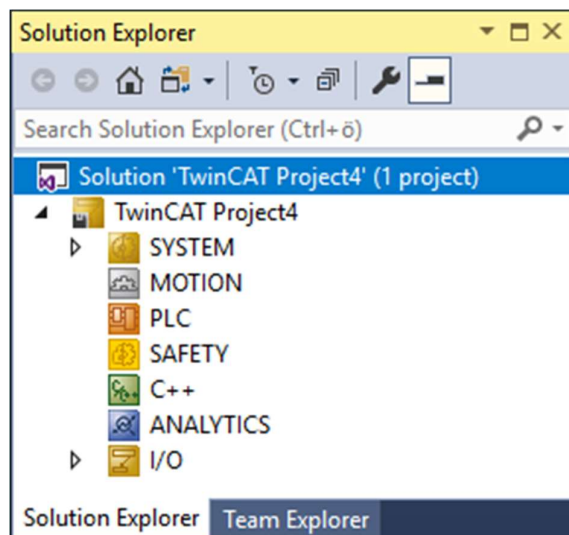
TwinCAT 3 kasutab rahvusvahelist programmeerimiskeelte standardit IEC 61131-3. See standard defineerib PLC-des kasutatavad programmeerimiskeeled ja nende arhitektuuri. Standard koosneb viiest programmeerimiskeelest:

- redelloogika – *ladder diagram (LD)*,
- funktsiooniplokkide diagramm – *function block diagram (FBD)*,
- struktureeritud tekst – *structured text (ST)*,
- lausete nimekiri – *instruction list (IL)*,
- järjestikuste funktsiooniplokkide tabel – *sequential function chart (SFC)*. [27]

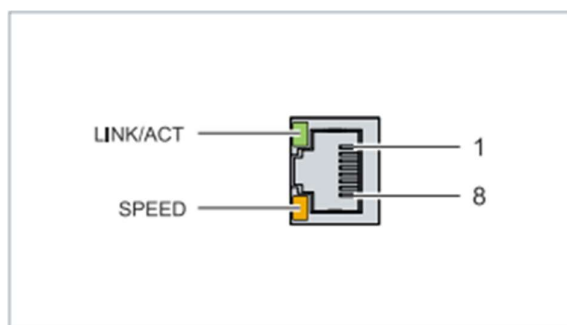
Paraboolantenni juhtimisprogrammi koostamiseks osutus valituks struktureeritud tekst, kuna see võimaldab sisendeid ja väljundeid töödelda täpsete tekstipõhiste käskude abil. Teksti põhiselt programmeerides saab teha programmikoodi inimesele kergesti loetavaks ning erinevaid protsesse kommentaaride abil selgitada. Kergesti loetavus ja programmikoodist aru saamine on vajalik tulevikus, kui tekib vajadus programmikoodi muuta või täiendada.

Juhtimisprogrammi koostamiseks sobib ka graafiline programmeerimiskeel redelloogika, kuid lihtsuse huvides on kogu programmikood kirjutatud teksti põhiselt. Uue PLC programmi loomiseks tuleb minna *File → New → project* ning valida TwinCAT XAE Project. Seda tehes avaneb uus tühi projekt (Joonis 3.2).

Beckhoffi kontrolleri CX8190 ühendamiseks programmeerimise arvutiga tuleb kontrolleri ja arvuti ühendada Etherneti kaabliga ning eduka ühenduse korral hakkavad kontrolleri RJ45 pesa LED tuled põlema (Joonis 3.3).

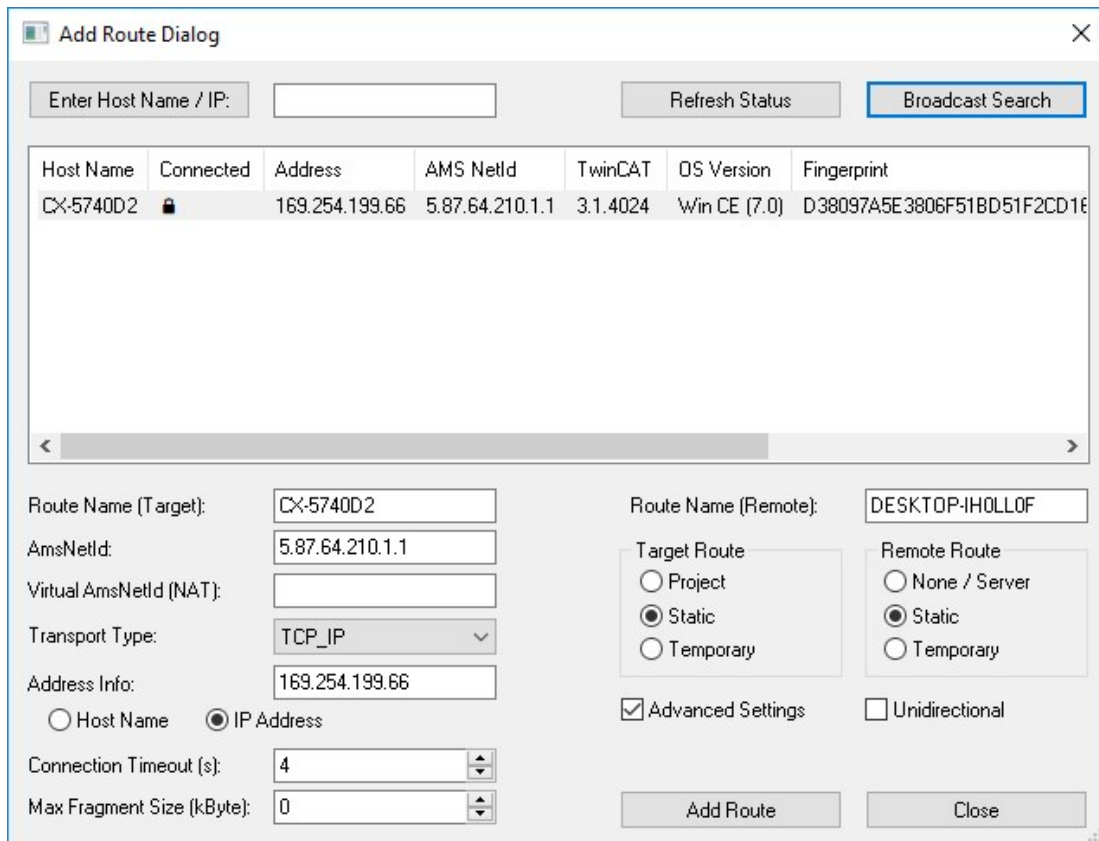


Joonis 3.2. Tühi projekt programmis TwinCAT 3



Joonis 3.3. Etherneti pesa RJ45 Beckhoffi kontrolleril CX8190 [28]

Lisaks arvuti ja kontrolleri ühendamisele tuleb ka tekitada side kontrolleri ning TwinCAT 3 programmi vahel. Kontrolleri leidmiseks tuleb TwinCAT 3 programmis *System* alt valida *general* → *Choose target* → *Search (Ethernet)* → *Broadcast search* (Joonis 3.4). Kontrolleri edukal otsingul tuvastatakse kontrolleri nimi, IP aadress, versioon ja muu vajalik info. TwinCAT 3 programm võimaldab projekti käivitamist nii lokaalselt (tarkvaraliselt) programmeerimise arvutis kui ka kontrollerist.

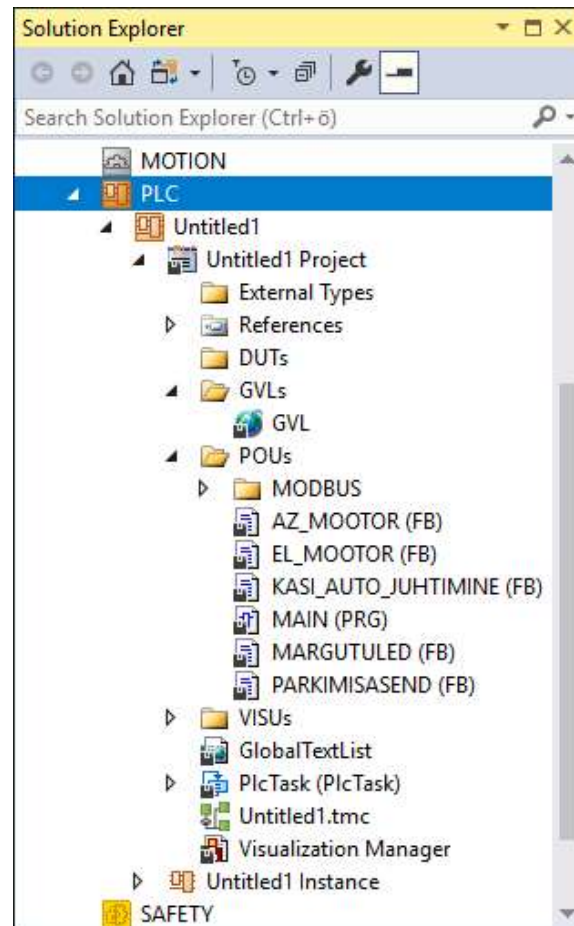


Joonis 3.4. Kontrolleri otsing Etherneti võrgust programmis TwinCAT 3

TwinCAT 3 võimaldab jagada juhtimisprogrammi protsessid eraldiseivateks alamprotsessideks ehk funktsiooniplokkideks. Selline jaotus tagab võimaluse käsitleda igat protsessi eraldiseisvalt ning teistest sõltumata, mis teeb programmeerimise lihtsamaks ning juhtimisprogrammi arusaadavamaks. Programmi alamprotsesse nimetatakse POU-deks (*Program Organisational Unit*).

PLC alammenüüsse saab lisada tühja standardprojekti ning seda tehes tekitatakse kõik programmeerimiseks vajaminevad alamkaustad ning failid (Joonis 3.5). Standardprojekti on olemas globaalne muutujate nimekiri GVL (*Global Variable List*), kuhu on sisse kantud kõik kasutaja poolt määratud programmis kasutatavad globaalsed muutujad. Joonisel 3.5 on näha POU kaustas olevad funktsiooniplokkid mis sisaldavad endas süsteemi erinevaid protsesse. Funktsiooniplokkid programmeerimise juures tähtsad komponendid, mis sisaldavad endas koodi, millele kogu kirjutatav programm põhineb. Funktsiooniplokkide kood on kirjutatud kasutades struktureeritud teksti. Joonisel 3.6 on kujutatud funktsiooniplokk, mis paneb paika paraboolantenni

elevatsiooni liigendi liikumispiirangud ja annab asünkroonmootorile juhised jooksmiseks.



Joonis 3.5. PLC programmi alammenüü programmis TwinCAT 3

```

AntenniProjekt1
EL_MOOTOR*
1 FUNCTION_BLOCK EL_MOOTOR
2 VAR_INPUT // Need on selle funktsiooniploki sisendid
3   Teekond_ELRV : BOOL; // Teekonnalüliti elevatsiooniliigendil ühes otsas
4   Teekond_ELFW : BOOL; // Teekonnalüliti elevatsiooniliigendil teises otsas
5   K2sk_Liigutada_Mootorit_ELFW : BOOL; //Käsk programmilt alustada liikumine päripäeva
6   K2sk_Liigutada_Mootorit_ELRV : BOOL; //Käsk programmilt alustada liikumine vastupäeva
7   ReadCoil_InverterReady_EL : BOOL; //Kas sagedusmuundur on valmis tööks? 1: Ready 0: Not Ready
8 END_VAR
9 VAR_OUTPUT // Need on selle funktsiooniploki väljundid
10  WriteRegister_Suuna_Blokeering_EL : UINT; //00(FWD and RVS enabled) 01(Enable only FWD) 02(Enable only RVS)
11  WriteCoil_Run_EL : BOOL; // Käsk sagedusmuundurile käivitada mootor 1: RUN 0: STOP
12  WriteCoil_P66rlemisSuund_EL : BOOL; // Käsk sagedusmuundurile suuna valikuks 1: Reverse 0: Forward
13 END_VAR
14 IF K2sk_Liigutada_Mootorit_ELFW = TRUE
15   AND ReadCoil_InverterReady_EL = TRUE
16 THEN
17   WriteCoil_P66rlemisSuund_EL := 0;
18   WriteCoil_Run_EL := TRUE;
19 ELSIF K2sk_Liigutada_Mootorit_ELRV = TRUE
20   AND ReadCoil_InverterReady_EL = TRUE
21 THEN
22   WriteCoil_P66rlemisSuund_EL := 1;
23   WriteCoil_Run_EL := TRUE;
24 ELSE WriteCoil_Run_EL := FALSE;
25 END_IF
26 IF Teekond_ELRV = TRUE
27 THEN
28   WriteRegister_Suuna_Blokeering_EL := 1;
29 ELSIF Teekond_ELFW = TRUE
30 THEN
31   WriteRegister_Suuna_Blokeering_EL := 2;
32 ELSE WriteRegister_Suuna_Blokeering_EL := 0;
33 END_IF

```

Joonis 3.6. Funktsiooniplokk koos muutujatega ülemises aknas ning programmikoodiga alumises aknas

## 3.2 Programmeerimine TwinCAT 3 tarkvaras

PLC programmeerimisel on tsentraalsel kohal muutujad. Muutujad on määratud kas globaalselt globaalsete muutujate nimekirjas või lokaalselt funktsiooniploki päises. Muutuja sisaldab endas muutuja nime, andmetüüpi ja väärtust. Muutujate nime valib programmeerija ning on väga oluline, et muutujad oleksid võimalikult arusaadavalt defineeritud. See aitab vältida segadust ning teeb teiste jaoks koodist arusaamise kergemaks. Koodist aru saamist hõlbustab ka selgitavate kommentaaride lisamine. Kommentaarid algavad sümbolitega // ning sellele järgnev tekst on programmi poolt ignoreeritud.

Standardi IEC 61131-3 kohaselt on programmeerimisel võimalik kasutada andmetüüpe, mis on toodud tabelis 3.1. Parabolantenni juhtimisprogrammi koostamisel on kasutatud põhiliselt *boolean* tüüpi muutujaid, kuna kasutusel on digitaalsed sisendid ja väljundid, millel on vaid kaks võimalikku väärtust 0 ja 1. Suuremate arvväertuste jaoks on kasutatud *UINT* andmetüüpi mis omab väärtusi 0 kuni 65535.

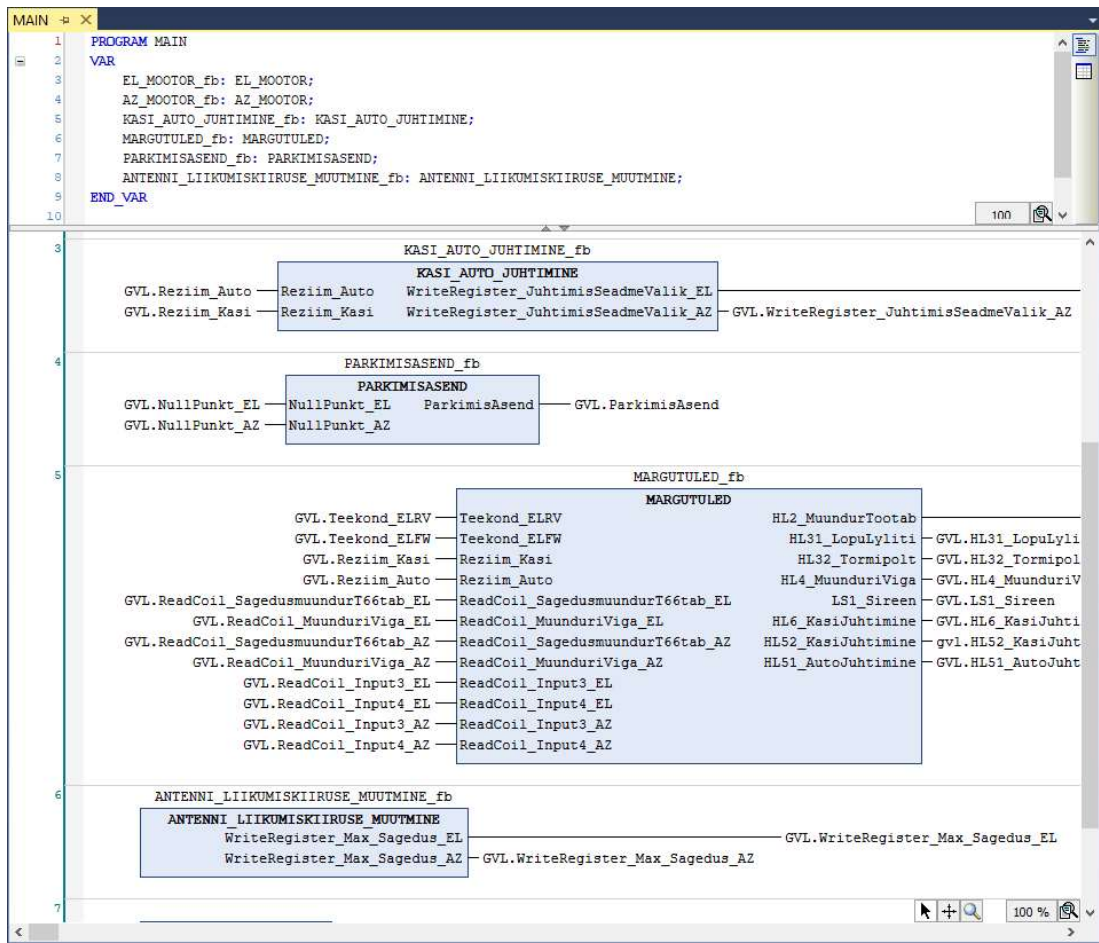
Tabel 3.1. Standardi IEC 61131-3 kohaselt PLC poolt kasutatavad andmetüübid [29]

Andmetüübi lühend	Andmetüübi seletus	Väärtuste vahemik
BOOL	Boolean value	0 or 1
SINT	Short integer	-128 to +127
USINT	Unsigned short integer	0 to 255
BYTE	Single byte bitmask	16#00 to 16#FF
INT	Integer	-32768 to +32767
UINT	Unsigned integer	0 to 65535
WORD	Two byte bitmask	16#0000 to 16#FFFF
DINT	Double integer	-2147483648 to +2147483647
UDINT	Unsigned double integer	0 to 4294967295
DWORD	Four byte bitmask	16#00000000 to 16#FFFFFFFF
LINT	Long integer	-9223372036854775808 to +9223372036854775807
ULINT	Unsigned long integer	0 to 18446744073709551615
LWORD	Eight byte bitmask	16#0000000000000000 to 16#FFFFFFFFFFFFFFFF
REAL	Single precision floating point	-
LREAL	Double precision floating point	-
TIME	Interval value	-
DATE	Date value	1601-01-01 to 9999-12-31
TIME_OF_DAY or TOD	Time of day	00:00:00.000 to 23:59:59.999
DATE_AND_TIME or DT	Date and time value	1601-01-01-00:00:00.000 to 9999-12-31-23:59:59.999
CHAR	Single byte character	\$00 to \$FF
WCHAR	Double byte character	\$0000 to \$FFFF
STRING	Single byte character string	-
WSTRING	Double byte character string	-

Tekstipõhine programmikoodi kirjutamine toimub struktureeritud tekstiga (ST). ST on struktuurilt Pascalile sarnanev kõrgetasemeline programmeerimiskeel. Programmeerimiskoodi süntaksi näide on toodud joonisel 3.6. Programmeerimiskeel ei ole tõstutundlik ning tühikute arv ei ole funktsionaalsuse seisukohalt oluline. Käsk *IF* tähendab tingimuse kontrolli ning tingimuse vastavusel *THEN* instruksioonide täitmist. Kui *IF* tingimus ei ole täidetud, kontrollitakse järgmist *ELSIF* tingimust jne. *AND* tingimus tähendab, et kõik tingimused peavad täidetud olema, *OR* tingimus nõuab vähemalt ühe tingimuse täitmist. Tingimuse väärtuse kontrollimiseks kasutatakse sümbolit = ning väärtuse määramiseks sümbolit := . iga instruksioon peab lõppema semikooloniga.

Joonise 3.6 ülemises aknas on näha selles funktsiooniplokis kasutatavad sisend- ja väljundmuutujad millele järgneb muutuja andmetüüp. Igas funktsiooniplokis tuleb määrata selles funktsiooniplokis kasutatavad muutujad. Selleks, et funktsiooniplokis olev programmikood PLC-ga tööle panna, tuleb see funktsiooniplokk MAIN POUs ära nimetada ning seejärel funktsiooniploki muutujad globaalsete muutujatega siduda (Joonis 1.1). MAIN programm on PLC põhiprogramm, mida iga PLC tsükli jooksul läbi töötatakse ning selles on esindatud kõik funktsiooniplokid.

Joonisel 3.7 on näha, et graafiline lahendus on kohmakas. See tuleneb asjaolust, et muutujate nimed on pikad ning seeläbi venitab graafilise osa pikaks. Autor kasutas esialgu lühikesi muutujate nimesid, saavutades sellega MAIN programmi viisaka välimuse kuid programmi mahu suurenedes muutus muutujate loetelu pikaks ning muutujad tuli detailsemalt nimetada, et vältimaks hilisemal lugemisel tekkida võivat segadust.

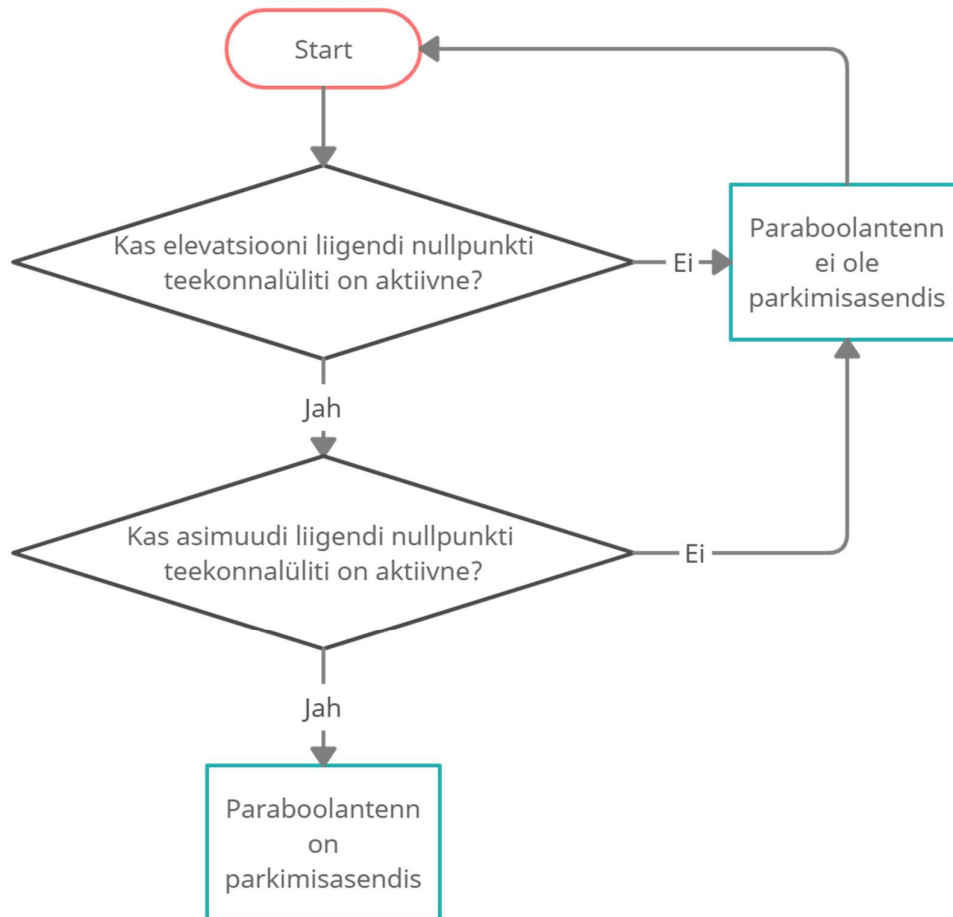


Joonis 3.7. MAIN programm sisenditega funktsiooniplokist (sinine) vasakul ja väljunditega funktsiooniplokist paremal



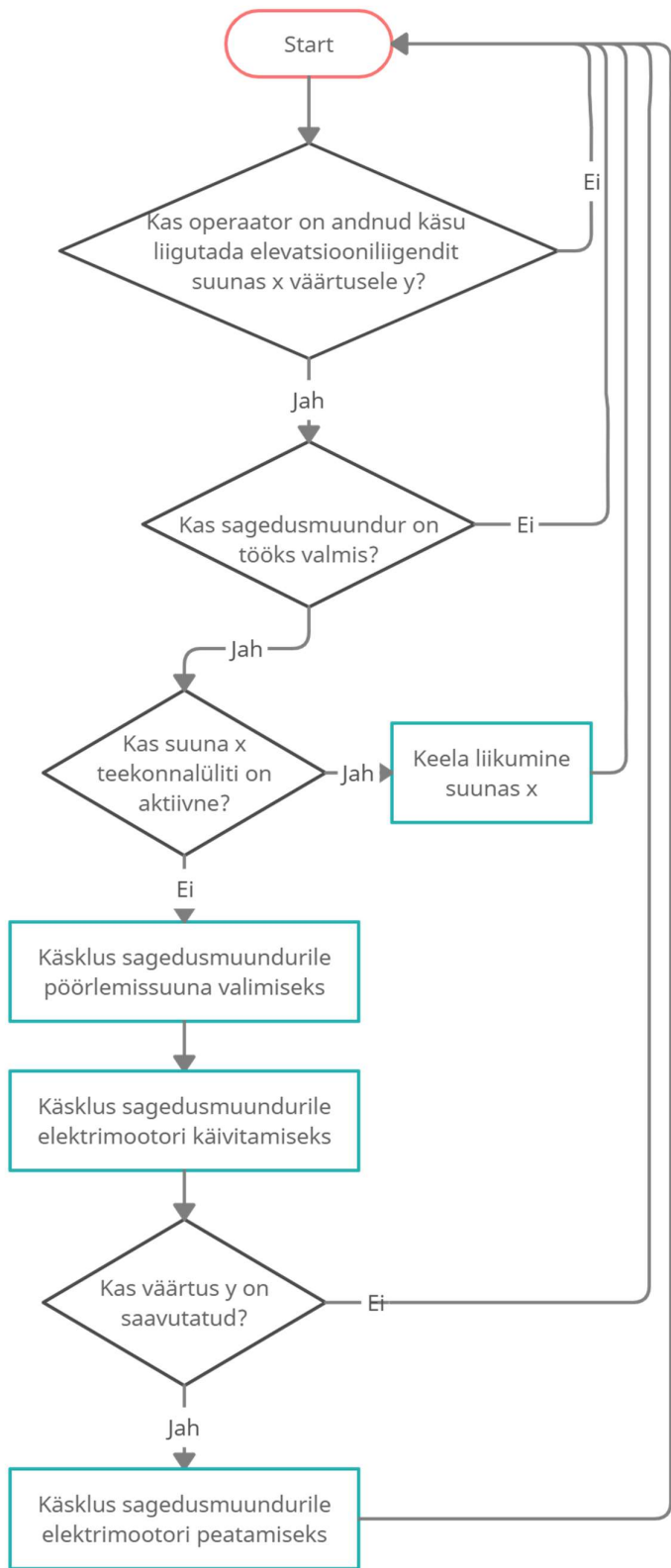
### 3.3 Juhtimisprogrammi diagrammid

Programmeerimise esimene samm on koostada protsessidest algoritmid, mis selgitavad, kuidas protsessides valikud välja näevad ja mis järjekorras valikud on teostatud. Joonistel 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 ja 3.12 on kujutatud parabolantenni juhtimissüsteemi funktsiooniplokkide jaoks koostatud diagrammid. Diagrammide koostamiseks on kasutatud veebipõhist programmi Creately.

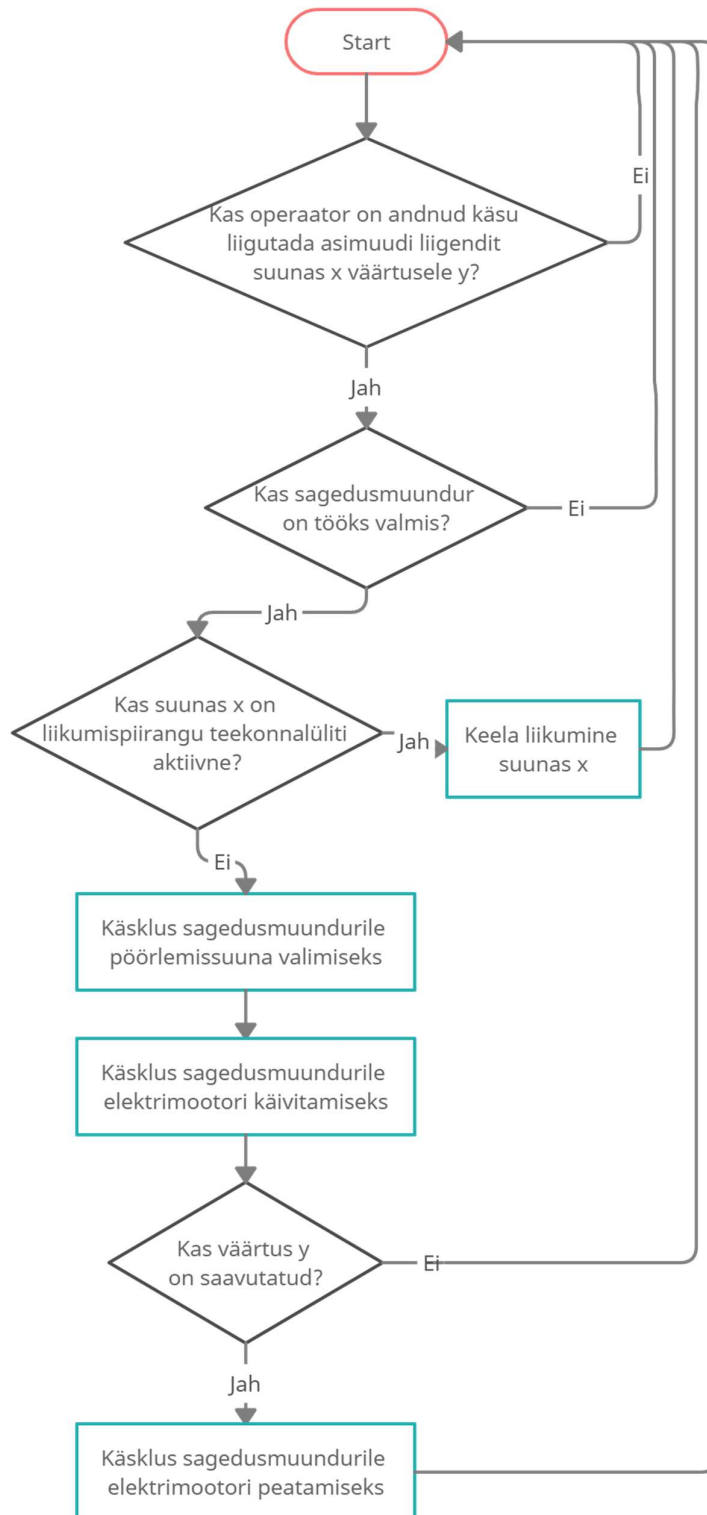


Joonis 3.8. Parkimisasendi kontrolli algoritmi diagramm

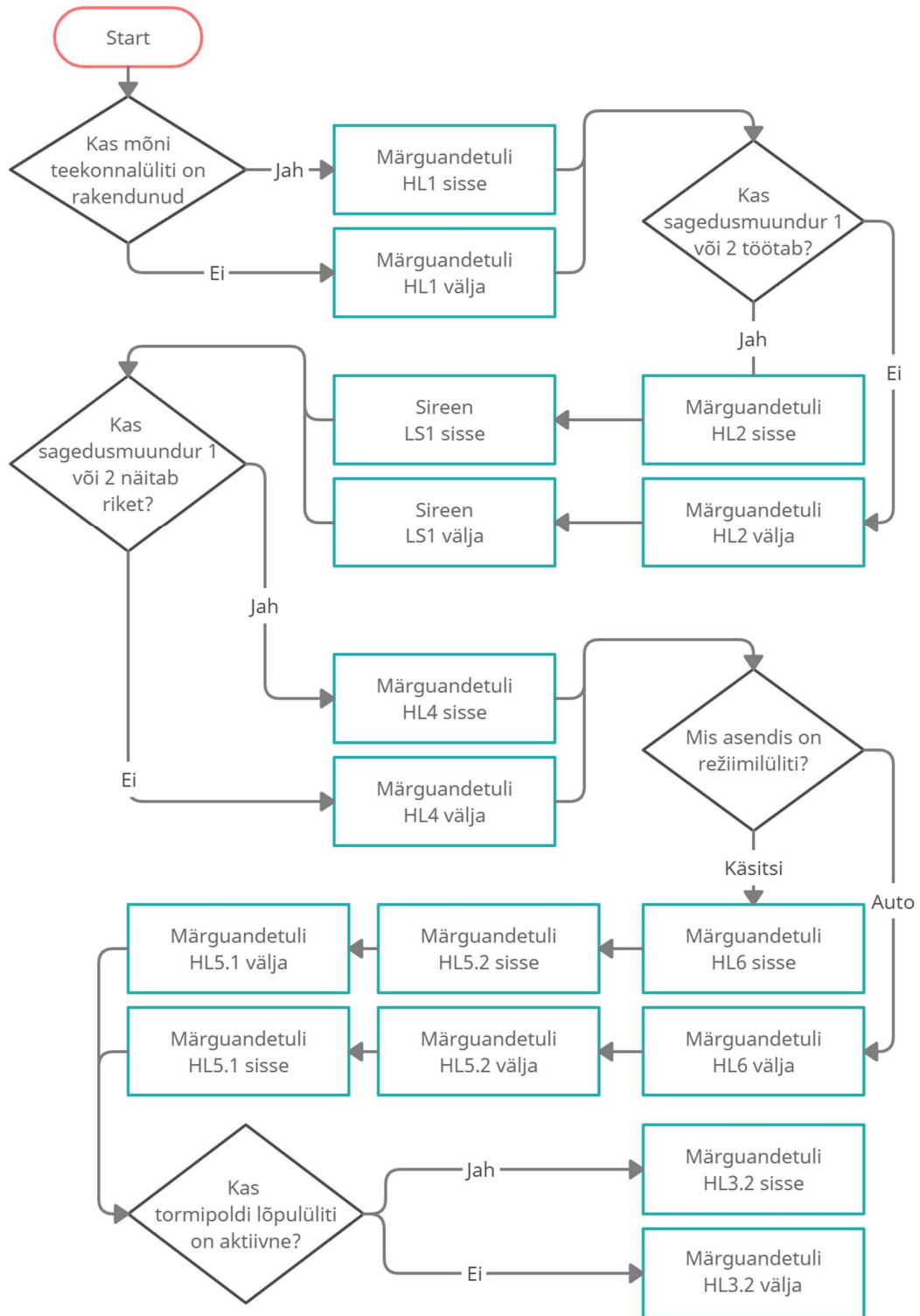
Joonisel 3.8 on näha parabolantenni parkimisasendi ehk nullpunkti tuvastamise algoritm. Kui mõlemad nullpunkti teekonnalülitid on aktiivsed, siis on parabolantenn parkimisasendis.



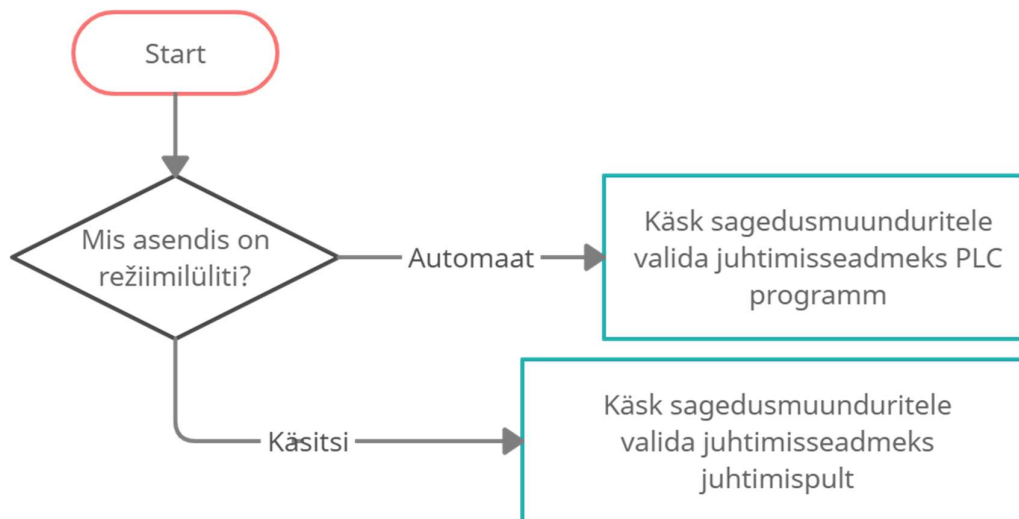
Joonis 3.9. Paraboolantenni elevatsiooni liigendi juhtimise algoritmi diagramm



Joonis 3.10. Parabolantenni asimuudi liigendi juhtimise algoritmi diagramm



Joonis 3.11. Märkutulede lülituse algoritmi diagramm



Joonis 3.12. Režiimilüliti algoritmi diagramm

Joonistel 3.9 ja 3.10 on kujutatud paraboolantenni asimuudi ja elevatsiooni liigendi juhtimise algoritm. Operaatorilt asendi muutmise käsu saamise järgselt kontrollib juhtimisprogramm, kas vastava liigendi sagedusmuundur on tööks valmis ning ega teekonnalüliti pole rakendunud. Seejärel annab juhtimisprogramm sagedusmuundurile käsu valida õige pöörlemissuund ning käivitada elektrimootor kuni soovitud paraboolantenni asend on saavutatud.

Joonisel 3.11 on välja toodud juhtimispuldil ja automaatikakilbi uksele olevate märgutulede ning katusele oleva vilkuri sisse ja välja lülitamise algoritm. Juhtimisprogramm teeb sisendite oleku järgi otsuseid ning lülitab vajalikke märguandetulesid või vilkurit vastavalt sisendite olekule sisse või välja.

Joonisel 3.12 on kujutatud automaatikakilbi uksele oleva juhtimisrežiimi pöördlüliti algoritm. Võtmega pöördlülil on vaid kaks olekut vastavalt millele lülitab juhtimisprogramm ümber seadme, mis juhib sagedusmuundureid. Käsitsi juhtimise korral toimub kogu paraboolantenni juhtimine manuaalselt läbi juhtpuldi. Automaatrežiimis olles juhtpuldi nupud ei tööta ning paraboolantenni juhtimine toimub läbi PLC juhtimisprogrammi.

## 4 EDASISED ARENGUSUUNAD

### 4.1 PLC sisendite ja väljundite aadressid

Programmeerimise käigus on PLC programmi seadetes paika pandud sisendite aadressid ja seega on oluline, et uut juhtimissüsteemi paigaldades ühendatakse PLC sisendmoodulisse EL1809 sisenevad sisendid õigetele ühendusklemmidele. TwinCAT 3 programmis näeb sisendite aadresside nimekirja liikudes *I/O → Device 3 (EtherCAT) → Term 1 (EK1200) → Term 2 (EL1890)*. Sisendite aadresside ja seletuste nimekiri on välja toodud tabelis 4.1.

Tabel 4.1. Sisendmooduli EL1809 digitaalsete sisendite aadressid

EL1809 sisendi kanal	Sisendi seletus	Sisendi tähis
1	Käsitsi juhtimise režiim	SB2.11
2	Automaatjuhtimise režiim	SB2.13
3	Elevatsiooni liigendi üks teekonnalüliti	ZS3
4	Elevatsiooni liigendi teine teekonnalüliti	ZS4
5	Asimuudi liigendi üks teekonnalüliti	ZS1
6	Asimuudi liigendi teine teekonnalüliti	ZS2
7	Elevatsiooni liigendi nullkoha andur	ZS6
8	Asimuudi liigendi nullkoha andur	ZS5

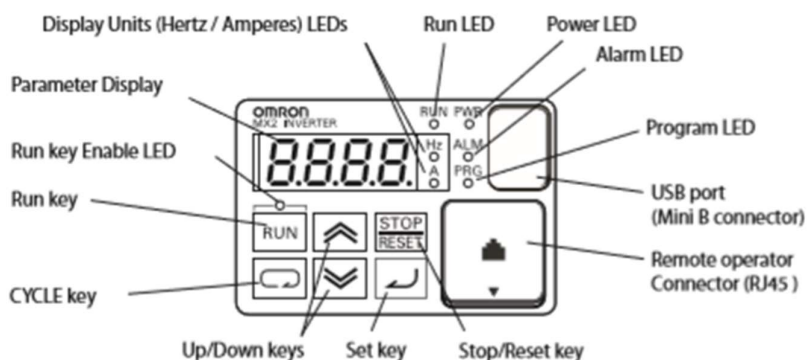
Programmeerimise käigus on samuti paika pandud väljundite aadressid. Juhtimissüsteemi vahetades peab väljundmoodulisse EL2008 ühendama väljundite kaablid vastavalt tabelile 4.2, milles on välja toodud väljundite aadressid ja seletused. TwinCAT 3 programmis näeb väljundite nimekirja minnes *I/O → Device 3 (EtherCAT) → Term 1 (EK1200) → Term 3 (EL2008)*.

Tabel 4.2. Väljundmooduli EL2008 digitaalsete väljundite aadressid

EL2008 väljundi kanal	Väljundi seletus	Väljundi tähis
1	Tuli "Käsitsi juhtimine" puldi peal	HL6
2	Tuli "Käsitsi juhtimine" kilbi peal	HL5.2
3	Tuli "Automaatne juhtimine"	HL5.1
4	Tuli "Muunduri viga"	HL4
5	Tuli "Muundur töötab"	HL2
6	Tuli "Lõpulüliti rakendunud"	HL3.1
7	Tuli "Tormipolt aktiivne"	HL3.2
8	Vilkur katusel	LS1

## 4.2 Sagedusmuundurite konfiguratsioon

Uue juhtimissüsteemi kasutusele võtmisel on vajalik seadistada sagedusmuundurid õigete seadete peale, mis võimaldavad programmeeritaval loogikakontrolleril sagedusmuundurite tööd automaatselt juhtida. Sagedusmuunduri konfiguratsiooni muutmine toimub sagedusmuunduri esiküljel olevate terminalinuppude (Joonis 4.1) kaudu [30]. Õigete seadmete leidmiseks ja määramiseks on koostatud tabel 4.3, kus on nimetatud sätte tähistus, seletus ja vajalikud suurused vastavalt asimuudi ning elevatsiooni suunal töötavatele sagedusmuunduritele UZ1 ja UZ2.

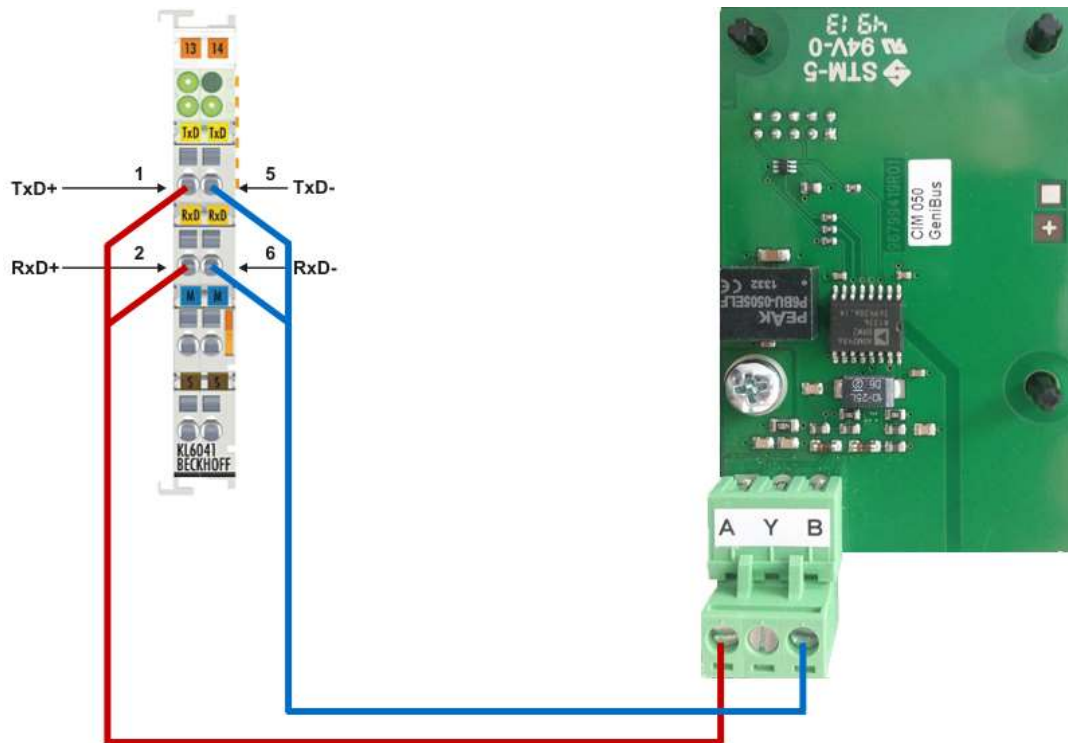


Joonis 4.1. Sagedusmuunduri Omron 3G3MX2-A4004 seadistamise terminal [30]

Tabel 4.3. Sagedusmuunduri Omron 3G3MX2-A4004 muutmist vajavad seaded [30]

Tähis	Seade seletus	Väärtus sagedusmuunduril UZ1	Väärtus sagedusmuunduril UZ2
A001	Frequency reference selection	03	03
A002	Run command selection	03	03
C071	Communication speed selection	05	05
C072	Communication station No. Selection	01	02

Sagedusmuundurite täpsem konfigureerimine peab toimuma juhtsüsteemide vahetamise järgselt. Sagedusmuundurid ühendatakse PLC mooduliga EL6021 dokumentatsiooni järgi, ühendades positiivse terminali juhtme sagedusmuunduri klemmiga SP ning negatiivse terminali juhtme klemmiga SN (Joonis 4.2) [31]. Ära tasub märkida, et sagedusmuunduril UZ2 tuleb sisse lülitada lüliti MDSW1, mis tekitab Modbus liinile lõputakistuse 200 k $\Omega$  [30]. Liini lõputakistus on vajalik vähendamaks ülekandevigu.



Joonis 4.2. Mooduli EL6021 ja Modbus seadme ühendamise skeem [31]

### 4.3 Puudujäägid juhtimisprogrammi koostamisel

Lõputöö koostamise käigus sai lõputöö autor valmis sisendeid ja väljundeid juhtiva programmi loogika osa, kuid parabolantenni juhtimissüsteemi terviklikuks valmimiseks on veel vaja teha täiendavat tööd. Kuna lõputöö tegemise hetkel ei olnud katsetamiseks olemas antenniajamites kasutatavat tiguülekanandesüsteemi ja absoluutset pöördkoodrit, mis kasutab IO-link andmesidet, ei ole see osa juhtimisprogrammis kaetud.

IO-link pöördkoodrite programmi koodiga ühildamise ja katsetamise tarvis on vaja täiustada energeetikamajas elektrimasinate õppelaboratooriumis asuvat katsestendi tiguülekanandesüsteemiga DB125B ja pöördkoodriga Turck või teostada juhtimisprogrammi seadistamine Mektory maajaamas reaalse parabolantenni peal.

Kuna Mektory maajaam peab TalTechi tudengisatelliidiprogrammi teenindamiseks pidevalt töös olema, peab terviklik juhtimisprogramm enne uute seadmete ühendamist valmis olema. Sellest järelduvalt peaks katsestendi täiendama eelpool nimetatud seadmetega ning lisama ka kaks teekonnalülitit, mida saab ühendada PLC-ga. Ohutuse tagamiseks on parabolantenni liigendite teekonna lõppu paigaldatud topelt teekonnalülitid. Esimesena rakendub PLC sisendmoodulisse EL1809 ühendatud olev teekonnalüliti ning juhtimisprogramm peatab teekonnalüliti rakendumisel automaatselt



mootori edasise liikumise. Juhtimisprogrammi tõrke või vea korral, kui mootori liikumine teekonnalüliti rakendusel mingil põhjusel ei peatu, on liigendi teekonna lõppu paigaldatud veel teine teekonnalüliti, mis on ühendatud sagedusmuunduri intelligentse terminali klemmidele ning mille rakendusel peatatakse mootori töö [30]. Olemasolevad teekonnalülitid katsestendil on ühendatud sagedusmuundurisse ning PLC-ga ühendatavaid teekonnalüliteid ei ole. Süsteemi saab terviklikuks teha lisades kaks teekonnalülitit mille saab ühendada PLC-ga.

Tarkvaraliselt on veel vaja tööle saada Modbus RTU protokoll, mis ühendab PLC-d sagedusmuunduritega. Katsestendil on PLC ja sagedusmuundur vastavalt joonise 4.2 kohaselt ühendatud, kuid lõputöö autor ei suutnud sagedusmuunduri Omron 3G3MX2-A4004 ja terminali EL6021 manuaalidele toetudes tarkvaraliselt Modbus andmesidet tööle saada.

TwinCAT 3 programmi globaalsete muutujate nimekirjas on tehtud nimekiri Modbusiga kasutatavatest muutujatest, mida peab kas sagedusmuundurilt lugema või sagedusmuundurile kirjutama. Modbus RTU protokollil edukal ühendamisel seadmete vahel peab järgmise sammuna globaalsete muutujate nimekirjast linkima need muutujad sagedusmuundurites olevate registri ja mähiste aadressidega. Registrate ja mähiste aadressid on saadaval Omron 3G3MX2-A4004 manuaalis ning nimekiri vajalikest aadressidest on esitatud TwinCAT 3 juhtimisprogrammis (Joonis 4.3).

The screenshot shows a window titled 'ModBus\_RTU\_OMRON\_EL\*' with a list of Modbus coils and registers. The coils section includes items like '0001h Operation command', '0002h Rotation direction command', and five 'Intelligent input terminal' entries. The registers section includes '0001h Output frequency setting/monitor', '0002h Output frequency setting/monitor', '1103h Acceleration time 1', '1105h Deceleration time 1', '1202h Run command selection', and '1325h Rotation direction limit select.'.

Address	Name	Access	Bit/Value	Default	Resolution
28	MÄHISED / COILS				
29	0001h Operation command	R/W	1:RUN 0: STOP	*	
30	0002h Rotation direction command	R/W	1:REVERSE 0:FORWARD	*	
31	0007h Intelligent input terminal [1]	R/W	1:ON 0:OFF		
32	0008h Intelligent input terminal [2]	R/W	1:ON 0:OFF		
33	0009h Intelligent input terminal [3]	R/W	1:ON 0:OFF	*	
34	000Ah Intelligent input terminal [4]	R/W	1:ON 0:OFF	*	
35	000Bh Intelligent input terminal [5]	R/W	1:ON 0:OFF		
36					
37	0010h Rotation direction	R	1:REVERSE 0:FORWARD		
38	0011h Inverter ready	R	1:ready 0:not ready	*	
39	0013h RUN (Running)	R	1:running 0:not running	*	
40	0018h AL (alarm signal)	R	1:ON 0:OFF	*	
41	0046h FWR (forward rot.)	R	1:ON 0:OFF	*	
42	0047h RVR (reverse rot.)	R	1:ON 0:OFF	* *)	
43					
44	REGISTRID/ REGISTERS				
45	0001h Output frequency setting/monitor	F001 (high)	R/W 0 to 40000	0.01Hz (data resolution)	
46	0002h Output frequency setting/monitor	F001 (low)	R/W 0 to 40000	0.01Hz (data resolution)	
47	1103h Acceleration time 1	F002 (high)	R/W 0 to 360000	0.01sec	
48	1105h Deceleration time 1	F003 (high)	R/W 0 to 360000	0.01sec	
49	1202h Run command selection	A002	R/W 01 (terminal) 02 (operator) 03 (Modbus)		
50	1325h Rotation direction limit select.	b035	R/W 00 (FWD and RVS enabled) 01 (Enable only FWD)		
51			02 (Enable only RVS) *		

Joonis 4.3. Sagedusmuundurite mähiste ja registrite aadresside nimekiri

## 4.4 Paraboolantenni täiustamine

Paraboolantenni liikumisvabaduses on suurim probleem antenni asimuudi liigendi rotatsiooni limiidis  $720^\circ$ . Eelmainitud piirangu tõttu on võimalik, et valitud satelliidi jälgimine kindlal trajektoorigil ei ole täies ulatuses teostatav, juhul kui trajektoor ületab antenni  $720^\circ$  piirjoont. See lahendus on ilmselt juba projekteerimisel sisse arvestatud. Paraboolantenni ajami projekteerimisel oleks saanud kasutada radarisüsteemides laialdaselt kasutatavat pöördliigendi lahendust mis võimaldab lõpmatut pöörlemist mistahes suunas. Selline pöördliigend on kordades kallim olemasolevast lahendusest ning tagantjärgi olemasolevat lahendust muuta ei saa.

Mektory katusel oleva paraboolantenni mõlemal liikumissuunal on kasutusel oma kolmeefaasiline asünkroonmootor. Ühe mootoriga juhtimine on elektritarbimise seisukohast ökonoomne, kuluosasid on suhteliselt vähe ning ühe mootori jaoks juhtimisprogrammi koostamine ei valmista suuri raskuseid. Ühe mootoriga antenniajamil on ka puudujääke. Näiteks võivad lõtkud asünkroonmootori ja jõuülekande vahel tekitada lööke ja ebatasast liikumist. Samuti võib tugev tuul põhjustada vibratsioone ja liikumise ebatasasust. Keskkonnategurite mõjutuste mõju saab vähendada kasutades ühe liikumissuuna kohta kahte üksteise vastu töötavat asünkroonmootorit. Paraboolantenni liigutamine on võimalik asünkroonmootorite jõumomentide muutmisega. Antenni paigaloleku ajal on mootorite jõumomendid võrdsed. Selline vastumomentidega juhtimine tagab sujuva, täpse ja keskkonnast mittesõltuva liikumise. Kahe mootoriga lahendus on tunduvalt kulukam ja keerukam.

Käesoleva lõputöö autorile pole teada, kas eelmainitud ideid on paraboolantenni projekteerimisel kaalutud või mitte. Arvatavasti on planeerimisel tehtud kaalutletud otsuseid ja ülal toodud ideede kasutamine oleks üledimensioneerimine.

# KOKKUVÕTE

Bakalaureuse lõputöö teema oli pakutud lõputöö juhendaja Toomas Vaimanni poolt, kes on Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi vanemteadur. Lõputöö kaasjuhendaja oli Kristjan Pütsep. Lõputöö teema sai autori poolt valitud huvist arendada end kontrollierite programmeerimisega ning automaatsüsteemide loomisega. Ära tuleks ka märkida, et autor pole varasemalt programmeerimisega kokku puutunud ning see valmistas lõputöö koostamise vältel raskuseid.

Lõputöö käigus tutvustati TalTech satelliidiprogrammi ja selle maajaama parabolantenni. Kirjeldati parabolantenni juhtimisseadmestikku kuuluvaid seadmeid. Tutvustati programmeeritava loogikakontrolleri programmeerimist ja seadistamist programmis TwinCAT 3. Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli koostada eelmainitud antennisüsteemile juhtimisprogramm.

Bakalaureuse lõputöö raames valmis programm Beckhoffi programmeeritavale loogikakontrollerile CX8190. Valminud juhtimisprogramm koosneb funktsiooniplokkidest, mis sisaldavad parabolantenni juhtimisprotsesside programmikoodi. Koostatud juhtimisprogramm sisaldab endas eeltööd projekti ellu viimiseks. Lõputöö käigus on koostatud tulevikus juhtimissüsteemi vahetamise tarbeks nimekirjad kontrolleri sisendite ja väljundite aadressidest, mis on abiks juhtmete ühendamisel ning tabel sagedusmuundurite seadistamiseks. Kuna juhtimisprogramm ei saanud terviklikult valmis, jättis autor edasised soovitusel juhtimisprogrammi arendamiseks.

Lõputöö tulemuse hindab autor edukaks, kuna PLC juhtimisprogrammi kavandades on välja valitud TalTech maajaama parabolantenni juhtimiseks sobilik PLC vastavalt lõputöös kirjeldatud nõuetele. Juhtimisprogrammi arendades pandi paika programmi loomiseks vajalikud tingimused ning loodi tugev põhi juhtimisprogrammi edasiseks arendamiseks.

## **SUMMARY**

The subject of this bachelor's thesis was proposed by the supervisor Toomas Vaimann who is a senior research scientist in Tallinn University of Technology's department of electrical power engineering and mechatronics. The thesis is co-supervised by Kristjan Pütsep. The choice of the subject was driven by the author's desire to expand knowledge in the field of automatisisation and programming of logic controllers. It should also be noted that before starting the thesis, the author had no experience in programming and that raised some problems throughout the thesis.

In this thesis the satellite programme of Tallinn University of Technology and its parabolic antenna with its apparatus was introduced. The configuration and programming of the PLC programme in TwinCat 3 software was showcased. The objective of the thesis was to compose a control system for the aforementioned parabolic antenna.

The result of the thesis is a programme for a Beckhoff PLC CX8190. The programme contains function blocks with code for different processes of the system control. The developed programme also contains groundwork for finalizing the project. Tables with information about configuring the variable frequency drives and addresses for connecting the PLC inputs and outputs are provided in the thesis for future reference in case when the new control system for the antenna is being installed. Because the control programme was not completely finished, there are instructions and recommendations on how to continue the development of the programme.

The final results of the thesis are evaluated successful by the author because by planning and developing the control system for a parabolic antenna, a suitable PLC was chosen according to the requirements defined in the thesis. By developing the control system a strong base programme was established for further development.

# KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://satellite.ttu.ee/satelliidiprogramm/index.html#/satellite>. [Kasutatud 10 02 2021].
- [2] W. L. Stutzman ja G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, John Wiley & Sons Inc, 2012.
- [3] [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://en.wikipedia.org/wiki/Parabolic\\_antenna](https://en.wikipedia.org/wiki/Parabolic_antenna). [Kasutatud 10 02 2021].
- [4] [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://satellite.ttu.ee/satelliidiprogramm/index.html#/earth-station>. [Kasutatud 10 02 2021].
- [5] [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.esa.int/Applications/Telecommunications\\_Integrated\\_Applications/Satellite\\_frequency\\_bands](https://www.esa.int/Applications/Telecommunications_Integrated_Applications/Satellite_frequency_bands). [Kasutatud 17 02 2021].
- [6] [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.err.ee/1608071908/suuremates-korgkoolides-algab-semester-kaugoppes>. [Kasutatud 17 02 2021].
- [7] R. Tomsen, „Juhtmissüsteemi loomine TTÜ satelliidi maajaama parabolantennile,“ Tallinn, 2018.
- [8] D. Kurasjov, „TaITech tudengisatelliidi maajaama parabolantenni elektrivarustuse projektdokumentatsioon,“ Tallinn, 2020.
- [9] S.-H. Kim, *Electric Motor Control: DC, AC, and BLDC Motors*, Elsevier Science, 2017.
- [10] M. Palamar, Y. Pasternak, A. Palamar ja A. Poikhalo, „Precision tracking of the trajectory LEO satellite by antenna with induction motors in the control system,“ *9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*, p. 5, 21 09 2017.
- [11] [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/de/Catalog/Product/?mlfb=1MB1011-0DC3.-.....> [Kasutatud 14 03 2021].
- [12] [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/us/Catalog/Product/1LE10010DC322JA4>. [Kasutatud 14 02 2021].
- [13] [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/AAV3361/7.html>. [Kasutatud 13 03 2021].
- [14] [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://industrial.omron.eu/en/products/3G3MX2-A4004-E>. [Kasutatud 14 03 2021].
- [15] M. Vujacic, . M. Hammami, M. Srndovic ja G. Grandi, „Theoretical and Experimental Investigation of Switching Ripple in the DC-Link Voltage of Single-Phase H-Bridge PWM Inverters,“ *MDPI Energies*, 2017.
- [16] [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.electronicshub.org/variable-frequency-drive-vfd/>. [Kasutatud 13 03 2021].
- [17] [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.elfadistrec.ee/Web/Downloads/\\_t/ds/MX2\\_Datasheet\\_eng\\_tds.pdf](https://www.elfadistrec.ee/Web/Downloads/_t/ds/MX2_Datasheet_eng_tds.pdf). [Kasutatud 14 02 2021].
- [18] M. Müür, E. Pettai ja U. Lepiksoo, *Programmeeritavad kontrollid tööstusautomaatikas*, Tallinn, 2011.
- [19] W. Bolton, *Programmable Logic Controllers*, 2015.

- [20] [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://infosys.beckhoff.de/english.php?content=../content/1033/cx8190\\_hw/4990767627.html&id=.](https://infosys.beckhoff.de/english.php?content=../content/1033/cx8190_hw/4990767627.html&id=) [Kasutatud 27 02 2021].
- [21] D.-S. Kim ja H. Tran-Dang, Industrial Sensors and Controls in Communication Networks, 2019.
- [22] [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://io-link.com/en/Technology/what\\_is\\_IO-Link.php?thisID=76](https://io-link.com/en/Technology/what_is_IO-Link.php?thisID=76). [Kasutatud 22 02 2021].
- [23] [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://new.abb.com/plc/programmable-logic-controllers-plcs/ac500>. [Kasutatud 25 02 2021].
- [24] [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://sermax.my/img/products/industrial-products/ProgrammableLogicControllers/download/01-SIEMENS-S7-1500-Datasheet.pdf>. [Kasutatud 14 02 2021].
- [25] [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.beckhoff.com/en-us/products/ipc/embedded-pcs/cx8100-arm-cortex-a9/>. [Kasutatud 25 02 2021].
- [26] T. M. Antonsen, PLC Controls with Structured Text (ST), V3, Books on Demand GmbH, 2020.
- [27] [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tcquickstart/html/tcquickstart\\_iec.htm&id=4938746006154330919](https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tcquickstart/html/tcquickstart_iec.htm&id=4938746006154330919). [Kasutatud 04 05 2021].
- [28] [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://download.beckhoff.com/download/document/ipc/embedded-pc/embedded-pc-cx/cx8190\\_en.pdf](https://download.beckhoff.com/download/document/ipc/embedded-pc/embedded-pc-cx/cx8190_en.pdf). [Kasutatud 14 02 2021].
- [29] [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.fernhillsoftware.com/help/iec-61131/common-elements/datatypes-elementary.html>. [Kasutatud 09 05 2021].
- [30] [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://assets.omron.eu/downloads/manual/en/v3/i570\\_mx2\\_users\\_manual\\_en.pdf](https://assets.omron.eu/downloads/manual/en/v3/i570_mx2_users_manual_en.pdf). [Kasutatud 07 05 2021].
- [31] [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tcplclibgenibus/html/wiring.htm&id=4690148502665529153>. [Kasutatud 2021 05 08].