



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

SATELLIIDIAN TENNI KATSESTEND

SATELLITE ANTENNA TEST BENCH

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Siim Kallisaar

Üliõpilaskood: 204194AAAM

Juhendaja: Anton Rassõlkin, abiprofessor tenuuris
Kaasjuhendaja: Toomas Vaimann, vanemteadur

Tallinn, 2021

(Tiitellehe pöördel)

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:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 2021

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”2021 .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Siim Kallisaar (*autori nimi*)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
Satelliidiantenni katsestend

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on Anton Rassõlkin

(juhendaja nimi)

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

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

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

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

21.12.2021 (*kuupäev*)

¹ 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

<i>Autor:</i> Siim Kallisaar	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Satelliidiantenni katsestend	
<i>Kuupäev:</i> 21.12.2021	<i>50 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)</i>
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja(d):</i> abiprofessor tenuuris Anton Rassõlkin, vanemteadur Toomas Vaimann	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i>	
<i>Sisu kirjeldus:</i> Töö eesmärgiks oli luua toimiv katsestend Taltech'i Mektory katusel oleva satelliidiantenni juhtimiseks, mis parandaks eelnevad vead. Töö koosneb olemasoleva juhtimissüsteemi analüüsist, uue juhtimissüsteemi väljatöötamisest, kasutuseloleva sagedusmuunduri sisendite-väljundite kaardistamisest koos katsestendi tehnilise kirjelduse koostamisega, katsestendi seadistamiseks käsijuhtimisel kontrollimiseks ning katsestendi seadistamiseks automaatjuhtimisel kontrollimiseks läbi välise kontrolleri.	
<i>Märksõnad:</i> satelliidiantenn, sagedusmuundur, katsestend, Beckhoff, Omron, juhtimissüsteem, imitatsioonimudel, juhtimisskeem, automaatjuhtimine, käsijuhtimine.	

ABSTRACT

<i>Author:</i> Siim Kallisaar	<i>Type of the work:</i> Master's
<i>Title:</i> Satellite antenna test bench	
<i>Date:</i> 21.12.2021	50 pages (the number of thesis pages including appendices)
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Tenured Assistant Professor Anton Rassõlkin, Senior Research Scientist Toomas Vaimann	
<i>Consultant(s):</i>	
<i>Abstract:</i> <p>The purpose of this thesis was to create a working test bench for controlling the satellite antenna located on the roof of Mektory building and repairing the current system's issues.</p> <p>The thesis consists of analysing the current control system, developing a new control system, mapping the inputs and outputs of the frequency converter in use while creating the technical specification of the test bench, setting up the test bench for manual control and for automatic control through an external controller.</p>	

Keywords: satellite antenna, frequency converter, test bench, Beckhoff, Omron, control system, imitation model, control scheme, automatic control, manual control.

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Satelliidiantenni katsestend**
Lõputöö teema inglise keeles: **Satellite antenna test bench**
Üliõpilane: **Siim Kallisaar, 204194AAAM**
Eriala: **Energiamuundus- ja juhtimissüsteemid**
AAAM02/18
Lõputöö liik: **magistritöö**
Lõputöö juhendaja: **Anton Rassõlkin**
Lõputöö kaasjuhendaja: **Toomas Vaimann**
(ettevõtte, amet ja kontakt)
Lõputöö ülesande kehtivusaeg: 2021/2022 2021/2022 Sügis
(kehtivusaja annab juhendaja)
Lõputöö esitamise tähtaeg: **21.12.2021 kell 15:00**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Elektrimootorite juhtimine on tööstustes ja mujalgi enam ja enam kasutusel. Võimalikke kasutusvaldkondi on erinevaid. Üheks selliseks on elektrimootori juhtimine antenni asendi sätestamiseks ning kaugjuhtimise teel asendi muutmine. Luues esmalt katsestendi saab andurid ning mootorite juhtimise kalibreerida ning juhtmooduli seadistada. See tähendab omakorda kohapealse kalibreerimise aja vähendamist, tagades süsteemi kiirema valmimise.

Tallinna Tehnikaülikooli Mektory õppehoone katusel on antenn, mis peaks suhtlema kahe satelliidiga, mis on Tallinna Tehnikaülikooli poolt orbiidile saadetud. Paraku on käesoleva antenni juhtimissüsteem projekteeritud alaväärselt, mistõttu kui liikumise lõpulülitini jõutakse, katkestatakse ka juhtimissüsteemi (sagedusmuunduri) toide. See tähendab omakorda, et kaugjuhtimise võimalikuks muutmiseks tuleb antenn füüsiliselt oma asendisse tagasi keerata.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on luua toimiv katsestend Taltechi Mektory katusel oleva satelliidiantenni juhtimiseks, mis parandaks eelnevad vead.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Analüüsida lühidalt olemasoleva juhtimissüsteemi toimivust.

Välja töötada uus juhtimisskeem.

Kasutatava sagedusmuunduri sisendite-väljundite kaardistamine ning stendi tehnilise kirjelduse koostamine.

Katsestendi seadistamine toimimaks käsijuhtimisel.

Katsestendi seadistamine toimimaks automaatjuhtimisel läbi välise kontrolleri.

4. Lähteandmed

Lähteandmetena on plaanis kasutada seadmete ning andurite juhendeid, olemasoleva satelliidiantenni skeemi, juhendaja kogemust antud antenniga seoses.

Milliseid andmeid plaanid kasutada püstitatud eesmärkide lahendamiseks? Kust või kelle käest saad andmed?

5. Uurimismeetodid

Töö tulemusteni plaanin jõuda füüsilise katsestendi koostamisega. Selle tarbeks tuleb eelnevalt kasutada õppetöö käigus omandatud planeerimis- ning skeemide koostamise oskust, eelneva mudeli analüüsimist, sagedusmuunduri ning teiste komponentide kasutusjuhendite analüüsiga.

6. Graafiline osa

Graafiline osa sisaldab:

- 1) Elektriskeeme
- 2) Fotosid
- 3) Seadmete kasutusjuhenditest jooniseid

Parema loetavuse tagamiseks jäetakse graafiline osa töö põhiosasse.

7. Töö struktuur

Loetelu töö peatükkidest koos alapeatükkide, punktide ja alapunktidega.

- Sissejuhatus ja ülevaade
- Eelneva satelliidiantenni juhtimissüsteemi analüüs
- Uue juhtskeemi planeerimine katsestendi jaoks
- Sagedusmuunduri sisendite-väljundite kaardistamine ning tehnilise kirjelduse koostamine
- Käsijuhtimise seadistamine
- Automaatjuhtimise seadistamine

8. Kasutatud kirjanduse allikad

1. [Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://satellite.ttu.ee/satelliidiprogramm/index.html#/satellite>
2. R. Tomsen, „Juhtimissüsteemi loomine TTÜ satelliidi maajaama paraboolantennile, “ Tallinn, 2018.
3. D. Kurasjov, „TalTech tudengisatelliidi maajaama paraboolantenni elektrivarustuse projektdokumentatsioon,“ Tallinn, 2020.
4. [Võrgumaterjal] Saadaval:
https://assets.omron.eu/downloads/manual/en/v3/i570_mx2_users_manual_en.pdf
5. [Võrgumaterjal] Saadaval:
https://download.beckhoff.com/download/document/ipc/embedded-pc/embedded-pc-cx/cx8190_en.pdf

9. Lõputöö konsultandid

Ei ole

10. Töö etapid ja ajakava

- Tehnilise dokumentatsiooniga tutvumine, lähteandmete kogumine, kirjanduse läbi töötamine (30.09.2020)
- Vana juhtimissüsteemi analüüs, uue juhtimisskeemi väljaarendamine, katsestendi füüsiline montaaž (31.12.2020).
- Seadme käivitamine, sagedusmuunduri seadistamine (28.01.2021).
- Automaatjuhtsüsteemi loomise materjalide läbi töötamine (15.10.2021).
- Töö esimene versioon valmis ning esitatud juhendajale läbilugemiseks (19.11.2021).
- Lõputöö täiendamine ja kokkuvõtte kirjutamine, tuginedes juhendaja antud tagasisidele (13.12.2021).
- Töö lõplik versioon valmis. Lõputöö esitamine kaitsmiseks (21.12.2021)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT	5
EESSÕNA.....	12
SISSEJUHATUS	13
1. EELNEVA SATELLIIDIANTENNI JUHTIMISSÜSTEEMI ANALÜÜS	15
2. UUE JUHTSKEEMI PLANEERIMINE KATSESTENDI JAOKS	26
3. SAGEDUSMUUNDURI SISENDITE-VÄLJUNDITE KAARDISTAMINE, TEHNILISE KIRJELDUSE KOOSTAMINE	29
4. KATSESTENDI KÄSIJUHTIMISE SEADISTAMINE.....	37
4.1 Juhtpaneeli kasutamine	37
4.2 Mootori seadistamine.....	38
4.3 Kasutaja juhtpaneeli ning juhtimise seadistamine	40
5. KATSESTENDI AUTOMAATJUHTIMISE SEADISTAMINE.....	46
KOKKUVÕTE	57
SUMMARY	59
KASUTATUD KIRJANDUS.....	60
LISAD	62

EESSÕNA

Lõputöö teema valikul soovisin lisaks teoreetilisele osale saada juurde täiendavalt praktilist kogemust. Kuna samal ajal tekkis võimalus olla abiks Mektory hoone katusel oleva satelliidiantenni täiustamisprojektis, langes lõputöö teema valik katsestendi koostamisele. Otsustasin ühendust võtta oma varasema õppejõu Anton Rassõlkiniga, kes oli antud projektiga seotud. Peale mõningast arutelu saime ülesande paika ning kokkulepped kooskõlastatud.

Lõputöö valmis osaliselt koroonapiirangute tingimustes, kuid koostöös Tallinna Tehnikaülikooliga oli võimalus käia NRG hoone laboris katsestendi füüsiliselt koostamas. Terve lõputöö koostamise ajal oli autoril juhendajaga e-kirjade ja suhtluskeskkondade vahendusel ühendus.

Soovin edastada tänuavaldused Anton Rassõlkinile, Ants Kallastele ja Toomas Vaimannile, kes aitasid minu lõputöö koostamiseks vajaliku andmete, informatsiooni ja nõuga. Lisaks soovin tänada Tallinna Tehnikaülikooli töötajaid, kes piirangute ajal tekitasid võimalused ülikooli laboris töötada. Minu siiras tänu Teile kõigile!

SISSEJUHATUS

Elektrimootorite juhtimine on tööstustes ja mujalgi enam ja enam kasutusel. Võimalikke kasutusvaldkondi on erinevaid. Erinevate valdkondade ning ülesannete tõttu peab nende juhtimine olema samuti erinev. Tähelepanuväärne on täpsuse vajadus – kui mõningatel otstarvetel on juhtimise täpsus väheoluline (näiteks lõikesae käitamine), siis on palju otstarbeid, kus suur täpsus on väga tähtis. Lisaks on mõistlik luua katsestendid objektidele, mis on füüsiliselt liiga suured, et neid oleks võimalik kohapeal katsetada. Üheks selliseks on elektrimootori juhtimine antenni asendi sätestamiseks ning kaugjuhtimise teel asendi muutmise. Kõnealuse lõputöö raames käsitletava katsestendi antenni täpsus peab olema alla ühekraadise kõrvalekalde, mistõttu on vaja väga täpset juhtimissüsteemi.

Tallinna Tehnikaülikooli Mektory õppehoone katusel on antenn, mis peaks suhtlema kahe satelliidiga, mis on Tallinna Tehnikaülikooli poolt orbiidile saadetud. Paraku on käesoleva antenni juhtimissüsteem projekteeritud alaväärselt, mistõttu kui liikumise lõpulülitini jõutakse, katkestatakse ka juhtimissüsteemi toide. See tähendab omakorda, et kaugjuhtimise võimalikuks muutmiseks tuleb antenn füüsiliselt oma asendisse tagasi keerata.

Käesoleva lõputöö raames on autoril esmalt tutvuda olemasoleva juhtimissüsteemi töötamispõhimõtetega ning kasutusel olevate seadmete tehniliste parameetrite ning võimekusega. Täiendavalt plaanib autor välja töötada uue juhtimisskeemi eelmainitud antennile, mis sisaldab lisaks lõpulülitele ka teekonnalüliteid. See võimaldab jätkata antenni juhtimist peale teekonnalüliti rakendumist. Käesoleva töö autor on huvitatud praktiliste probleemide lahendamisest, mis kannavad otsest eesmärki.

Lõputöö põhiosa on jaotatud viide peatükki. Esimeses peatükis analüüsitakse olemasolevat satelliidi juhtimissüsteemi, sealjuures on toob töö autor välja kasutatud seadmed. Teises peatükis planeerib töö autor uue juhtimisskeemi, mis on mõeldud spetsiaalselt ehitatava katsestendi jaoks. Kolmandas peatükis kaardistab töö autor kasutuseloleva sagedusmuunduri sisendid-väljundid ning koostab katsestendi tehnilise kirjelduse. Neljandas peatükis kirjeldatakse katsestendi seadistamist käsijuhtimise jaoks koos algparameetrite määramisega. Viiendas peatükis seadistatakse automaatjuhtimine välise kontrolleri abil, kasutades selleks Beckhoffi programmeeritavat loogikakontrollerit.

Lõputöö eesmärgi täitmiseks uurib töö autor kasutuselolevate seadmete kasutus- ning seadistusjuhendeid, olemasoleva antenni skeemi ning konsulteerib juhendajaga, kellel on sagedusmuundurite seadistamisel palju kogemusi.

1. EELNEVA SATELLIIDIAN TENNI JUHTIMISSÜSTEEMI ANALÜÜS

Eialgu ehitamisele läinud juhtimissüsteemiga juhitakse Taltechi Mektory hoone katusel asuvat paraboolantenni. Antud antenn on osa Taltech'i kosmoseprogrammi TTU100 maajaamast, kuid mille juhtimissüsteem ei olnud lõplikult välja ehitatud. Satelliidiantenn on nähtaval pildil Pic 1.



Pic 1. Taltech Mektory hoone katusel asuv paraboolantenn [2]

TTU100 on Tallinna Tehnikaülikooli poolt rahastatav tudengiprojekt, millega pakutakse tudengitele praktilisi väljundeid insenerialastel tegevustel. Antud programmi raames on hetkel orbiidile edastatud paar satelliiti. Esialgse, CubeSAT programmi standardi järgi on ettenähtud satelliidi suurus 10x10x10cm ning kaal mitte üle 1,33kg. Paraku, kuna selliseid satelliite ehitavad enamasti tudengid, näitab statistika, et suur osa nendest ei hakka tööle. Seetõttu on tähtis, et arendusel kasutataks häid insenertehnilisi tavaid, teostatakse võimalikult palju eeltestimist ning veendutakse süsteemide toimivuses. [1]

ADCS (*Attitude Determination and Control System*) on kosmoseseadme tähtis osa, mis vastutab seadme õige positsioneerimise ning orbiidi eest. Enamasti on antud osal oma protsessor, andur ning täiturid, mis ei ole mõjutatud ülejäänud satelliidi süsteemidest. Anduritest on kasutusel näiteks päikeseandurid (mida saab kasutada päikesepaneelilt tuleva infona), güroskoop, magnetandurid, tähtede jälgimiskaamera ja palju muud. Need seadmed on mõeldud satelliidi juhtimiseks täiturite, näiteks magnetpoolide või hoorataste kaudu. [1]

Joonis 1 on näha mõningate 2021 aasta esimeses pooles käivitatud satelliitide ACDS konfiguratsioone.

University (Country)	Satellite	Sensors									Actuators		
		Accelerometer	Sun sensor	Gyroscope	Magnetic sensor	IR sensor	Star tracker	Horizon sensor	Earth sensor	Temperature sensor	LEO GPS	Magnetorquer (3 pieces)	Reaction wheel (3 pieces)
Technical University of Denmark (Denmark)	DTU _{sat}		OK		OK							OK	
	DTU _{sat-2}		OK		OK				OK				
Aalborg University (Denmark)	AAU _{sat-1}											OK	
	AAU _{sat-2}		OK	OK	OK							OK	OK
	AAU _{sat-3}		OK	OK	4				3	OK	9		
Tohoku University and Hokkaido University (Japan)	RISING-2		4	OK			2					OK	OK
Chinese Academy of Sciences (China)	TZ-1		3		2							OK	OK
Space Technologies Research Institute (Turkey)	RASAT		4		2		OK			2			OK
Politecnico di Torino (Italy)	AraMiS		OK	OK	OK							OK	OK
Consortium of 7 engineering colleges (India)	STUDSAT			3	3							OK	
Tallinn University of Technology (Estonia)	TTU100		OK	OK	OK	OK						OK	OK

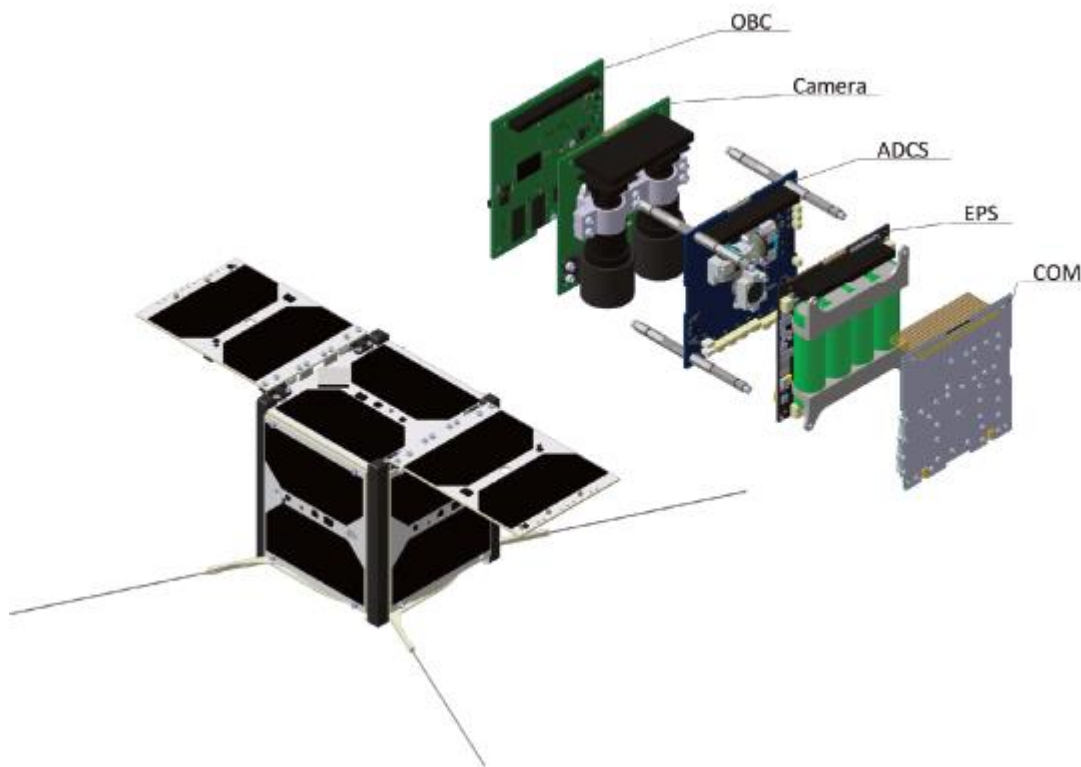
Joonis 1. ACDS konfiguratsioonid 2021. aasta esimeses pooles käivitatud satelliitidele [1]

TTU100 satelliitide ülesandeks on Maa jälgimine, kasutades nähtavat valgust ning infrapunakaameraid, lisaks demonstreerida uusi Maajälgimissüsteeme. Optiliste katsete jaoks

kasutab satelliit LED- ja laserdioode, et signaale edastada. Üks põhjuseid ADCS kasutamiseks on kaamera ning raadiosignaali suunamine õigetesse asenditesse. Täiendavateks ülesanneteks on:

- Satelliidi pöörlemise taastamine $50^\circ/s$ pealt $0,15^\circ/s$ peale seitsme päeva jooksul.
- Kommunikatsiooni ning andmekogumissüsteemide täpsus peab täpsematel juhtudel olema 3 kraadi
- Süsteemil peab olema võimalik kaugjuhitavalt parameetrid muuta
- Süsteemi peab olema võimalik kaugjuhitavalt programmeerida [1]

Satelliidi näidis koos oma komponentidega on nähtav Joonis 2.



Joonis 2. TTU100 satelliit oma komponentidega: OBC (On-Board Computer), ADCS, EPS (Electronic Power System), COM (Communication) [1]

Tudengisatelliidi maajaama ülesandeks on sidepidamine satelliidiga. Maajaam edastab satelliidile juhtkäske ning võtab vastu telemeetriainfot ja satelliidi pardal oleva kaameraga tehtud kosmosefotosid. Maajaamas paiknevad tarkvara-raadiojaam ning 435.450 MHz ja 10.460..10.465 GHz amatöörradio-sagedusalade antennisüsteemid. Maajaama arvuti juhhib antennide suunamist satelliidile ja raadiojaama tööd. [3]

Side maajaamaga toimub satelliitidel kahel viisil – 435.450 MHz sagedusel (kummalgi satelliidil) ja 10.460 GHz (Koit ehk 2019-038R) ja 10.465 GHz (Hämarik ehk 2020-061AS) sagedusel. 435.450 MHz sagedusel toimub kahepoolne side – satelliit saadab oma põhiandmed ja infot

alamsüsteemide seisundi kohta, maajaam saadab omakorda vastu info järgmise missiooni jaoks – millest järgmisena pilti teha ja millist katset järgmisena käivitada. 10.460-10.465 GHz sagedustel on võimalik alla laadida suuremat infokogumit – satelliitide poolt orbiidil tehtud pilte. Andmeside kiirus ei ole piisavalt suur, et saaks valimatult kõik pildid alla laadida, seetõttu peab satelliidil olev pilditöötlemise süsteem otsustama, millised pildid on väärtuslikumad ja millised jätta järjekorras tahapoole. Satelliidi sideprotokoll on AX 25. [4]

Satelliitidel on ka optilise side katse jaoks paigaldatud LED'id ja laser-dioodid. Satelliidid saavad suunata need Eestist üle lendamise ajal Maa poole. Maajaama juhtiv meeskond püüab samal ajal teleskoobiga satelliidi liikumist jälgida. Kui satelliit vilgutab LED'e ja laserdioode, on võimalik teleskoobiga neid Maalt näha. Nii saab optiliste vahenditega satelliidilt infot maale saata. Distantiks satelliidi ja maajaama vahel on vähemalt 500km, seega on väikese satelliidi saadetud optilist signaali raske püüda. Kui maajaamas teleskoobi külge ehitatud sensorid aga näevad LED'ide ja laser-dioodide vilkumist, saab seda info edastuse kiirust tõsta maksimaalse mõõdetavani. Selliselt hindab TalTech satelliidi meeskond optilise andmeside erinevaid mooduseid ja püüab vastata küsimusele – kas orbiidilt maale saadetud optiline signaal on parem teha koherentse valgusega – ehk laseriga – või mittekoherentse valgusega – ehk LED'idega. [4]

Madalal Maa orbiidil lendab satelliit ööpäevas üle Eesti umbes 10 korda, millest päevasel ajal 4-5. Ühe orbiidi periood on ligikaudu 90 minutit. See võimaldab saada suuremal hulgal andmepakette satelliidilt ja anda paremat tagasisidet missiooni käekäigu kohta. [5]

Kõnealune antenn on üsna suur ja kogukas, olles parabooli diameetriga 5 meetrit, kõrgusega 6 meetrit ning kogukaaluga ligikaudu 8 tonni. Liigendtelgesid on kaks, millest esimene on pöördetelg, võimaldades pöörata kuni 360 kraadi. Teoorias oleks võimalik olnud süsteem välja ehitada selliselt, et tagada pidev pöörlemine, praktikas valiti soodsam, kaablitel olev variant, mistõttu pööramisele paneb täiendava piirangu kaablite kasutus. Teine liigendtelg on antenni jala ning paraboolantenni taldriku vahel, mis võimaldab liikumist 180 kraadi ulatuses (Joonis 3).



Joonis 3. Paraboolantenni mõõtmed [6]

Paraboolantenn koosneb lisaks juhtimissüsteemile ka elektrilisest osast ning mehhaanilisest osast. Juhtimissüsteem koosneb nii riistvaralisest kui tarkvaralisest lahendusest. See hõlmab nii programmeeritavat loogikakontrollerit, sagedusmuundureid, turvaahelat, piirlüliteid kui sagedusmuunduri seadistust ja programmeeritava loogikakontrolleri programmeerimist. Elektriline osa koosneb puldist käsijuhtimise tarbeks, automaatika- ja elektrikilbist, elektrikaabeldusest, kontaktoritest jne. Mehhaaniline osa koosneb ülekandega elektrimootoritest ning antenni füüsilistest komponentidest.

Kuna käesoleva töö raames keskendub töö autor juhtimissüsteemi katsestendi paremale planeerimisele, vaadatakse ainult varasema lahenduse juhtimissüsteemi osa. Antenni juhtimiseks planeeriti kasutatada kahte asünkroonmootorit Siemens – ühte asimuudi suunal ning teist

elevatsiooni suunal, kusjuures mõlemad mootorid on ühendatud tiguülekanega, mille ülekanesuhe on 1:12,5.

Enamkasutatavamaks jõuallikaks maailmas on asünkroonmootor. Lühisrootoriga asünkroonmootor ei vaja peaaegu mingit hooldust. Asünkroonmootori põhiosadeks on staator ja rootor, kus staator on mootori paigalseisev osa ning rootor mootori pöörlev osa. [7]

Asünkroonmootori rootoris paiknevas lühismähises tekitatakse vool induktiooni teel. Selleks peab rootori pöördumine olema veidi madalam kui magnetväli. Antud suurust iseloomustatakse libistusega. Libistust arvutatakse valemiga 1.1.

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (1.1)$$

Libistust võib tõlgendada ka rootori suhtelise mahajäämusena sünkroonkiirusega pöörlevast staatori magnetväljast. Rotor pöörleb mittesünkroonselt ehk asünkroonselt, millest tulebki tema nimetus. Standardse asünkroonmootori nimelibistus on mõni protsent, kusjuures suurem libistus on väiksematel mootoritel.

Staatorimähistest, täpsemalt pooluspaaride arvust sõltub mootori pöörlemiskiirus. Sünkroonkiirus ehk magnetvälja pöörlemiskiirus arvutatakse valemiga 1.2.

$$n_0 = \frac{60f}{p} \quad (1.2)$$

Kus n_0 on magnetvälja pöörlemiskiirus, f on sagedus ja p on pooluspaaride arv. Sellest tulenevalt on magnetvälja pöörlemiskiirus otseselt sõltuv sagedusest, kuna pooluspaaride arv on mootori valikuga määratud. [7]

Kasutuses oleva mootori karakteristikud on toodud Tabelis 1.

Tabel 1. Siemens 1AV2083C kolmefaasilise asünkroonmootori karakteristikud [8]

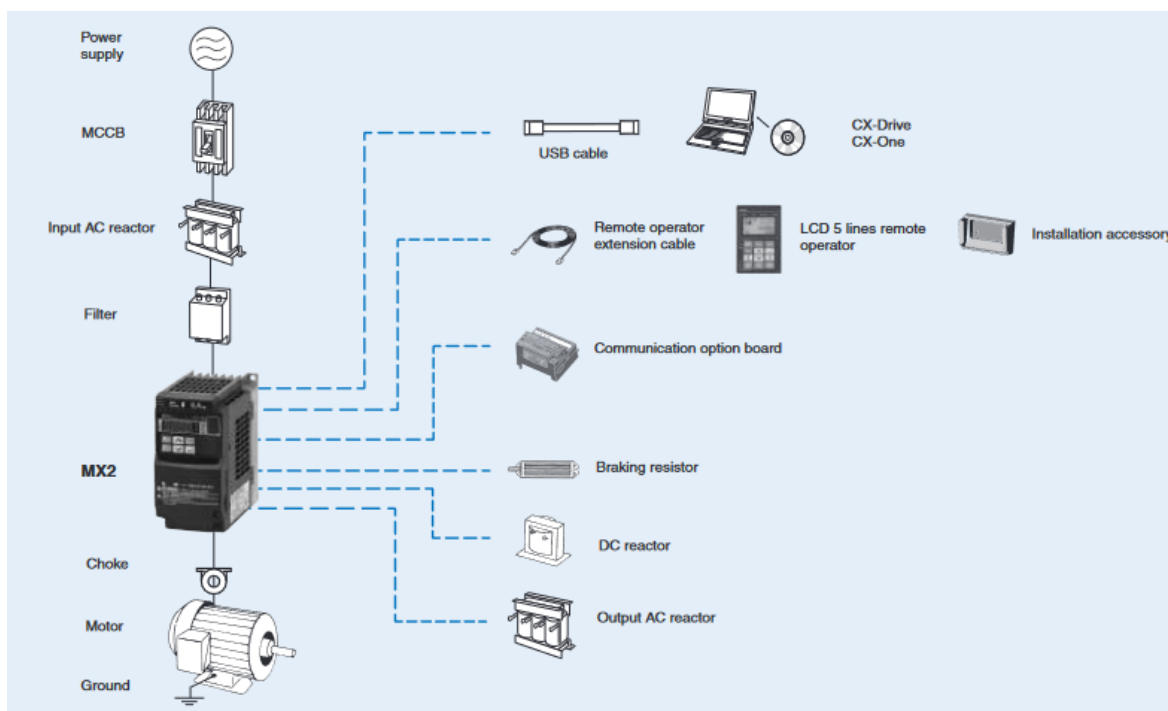
Ühendusviis	Tähtühendus
Nimipinge	400 V
Nimivool	1,65 A
Võimsus	0,55 kW ehk 550W
Võimsustegur $\cos\phi$	0,66
Nominaalne pöörlemiskiirus	935 p/min
IE klass	IE2
IP klass	IP55

Ohutusahela puhul kasutatakse elektriühenduse katkestamiseks piirlüliteid Comepi EM1G14ZU ja ABB LS32M45B11, hädastopp nuppu ja lahutuskontaktoreid, et süsteemil ei oleks võimalik keerata end asendisse, mis võiks tekitada kahjustusi või ei ole taotluslik. Ehitusviisist tingituna on mõlemal suunal pöördeulatus piiratud.

Olemasolevas kilbis on kummagi asünkroonmootori jaoks sagedusmuundur Omron 3G3MX2-A4004, mida juhitakse Modbus RTU kaudu, kuid mille juhtimisühendused on tegemata. Kõnealuse sagedusmuunduri parameetrid on kirjas Tabelis 2, ühendusskeem joonisel 4.

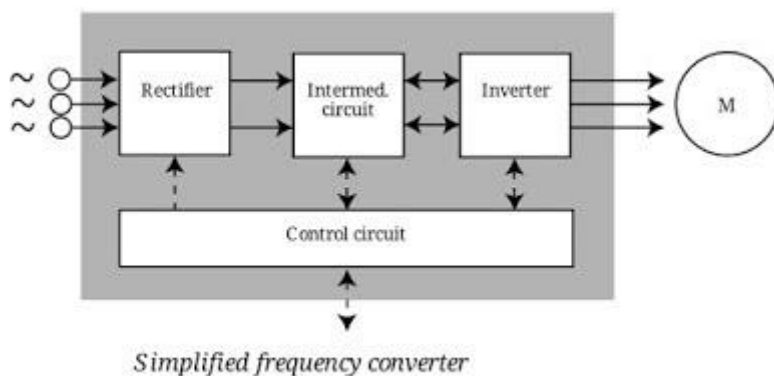
Tabel 2. Omron 3G3MX2-A4004-E parameetrid [9]

Parameeter	Väärtus
Väljundvõimsus	0,4kW (pidev moment), 0,75kW (muutuv moment)
Väljundvool	1,8A (pidev moment), 2,1A (muutuv moment)
Maksimaalne väljundpinge	Propotsionaalne sisendpingega, 0...480V
Maksimaalne väljundsagedus	400Hz
Sisendparameetrid	380-480V sisendpinge, 50-60Hz sagedus



Joonis 4. Omron MX2-tüüpi sagedusmuundurite süsteemi konfiguratsioon [9]

Sagedusmuunduri kasutamine on üks parimatest meetoditest, millega juhtida ajamite (elektrimootorite) parameetreid ning juhtida signaale. Sagedusmuundur koosneb alaldist, alalisvoolululist, vaheldist ja juhtsüsteemist (Joonis 5).



Joonis 5. Sagedusmuunduri tööpõhimõtte plokkskeem [10]

Sõltuvalt sagedusmuunduri valikust, on nii sisend kui väljund ühefaasilise või kolmefaasilised. Alaldi koosneb dioodsildadest, et vahelduvvool muuta alalisvooluks. Alalisvoolu vahelüli on sisuliselt kui LC-filter, sisaldades nii induktiivsust kui mahtuvust. See on eriti vajalik alalisvoolu pulseerimise vähendamiseks. Vaheldiga muudetakse alalisvoolu pinget ja sagedust sobiva väärtuse peale, juhtides sellega vastavat ajamit.

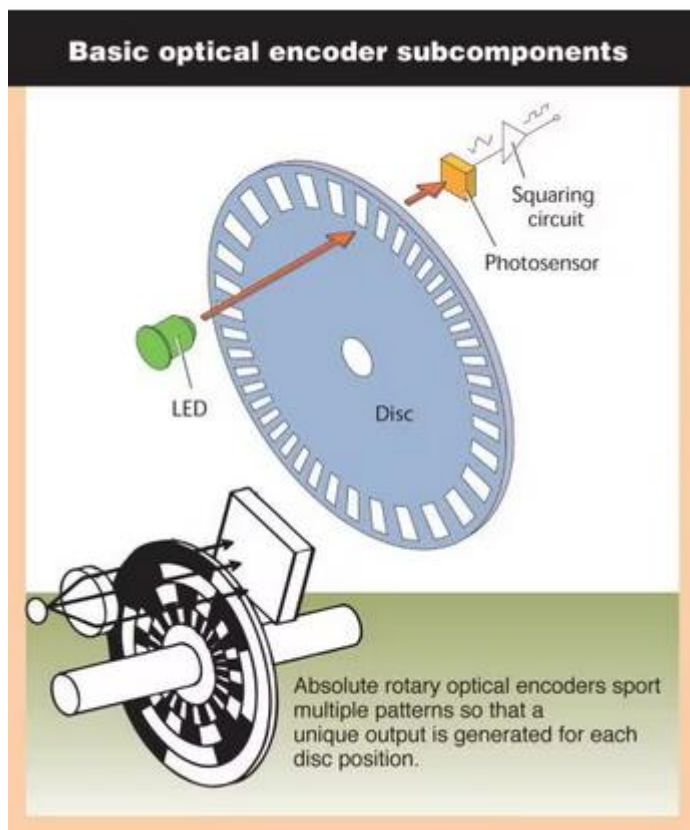
Sagedusmuundurit on võimalik juhtida nii skalaar- kui vektorjuhtimise kaudu. Sagedusjuhtimist nimetatakse ka skalaarjuhtimiseks või avatud ahelaga juhtimiseks (Open loop control), kuna sellisel süsteemil puudub tagasiside, mistõttu sagedusmuundur ei teagi, kui kiiresti mootor tegelikult pöörleb ja kas üldse pöörleb. Küll aga tagatakse vastavalt nimiandmetele mootori liigkoormuskaitse (tavaliselt 150% nimivoolust) voolutugevuse mõõtmisega ning vajaduse korral väljalülitamisega. Järsk koormuse muutus võib põhjustada mootori väärtumise st tööpunkti nihkumist väärtuspunkti. Selle tulemusena mootor seiskub või jääb pöörlema väikesel kiirusel, millega kaasneb mähiste temperatuuri tõus. Seetõttu on sagedusjuhtimisel (skalaarjuhtimisel) probleemiks koormusele vastava momendi tekitamine ning selleks sobiva pinget rakendamine mootorile. Sageduse ja pinget reguleerimine sobib hästi valdavalt püsitalitluses töötavate mootorite puhul, kui sagedus ja pinget muutuvad suhteliselt aeglaselt. [11]

Vektorjuhtimine erineb skalaarjuhtimisest põhiliselt seetõttu, et arvestatakse mootori elektrihaelas olevaid dünaamilisi protsesse. Kasutatakse momendi ja voolu suhet, mida juhitakse magnetvoo kaudu vektoriaalselt. Magnetvoo ning momendi väärtuseid käsitletakse alguses teineteisest eraldiseisvalt ning seejärel liidetakse need kokku, saamaks mootori faasivoolu. Vektorjuhtimise peamine eesmärk on mootori väljavektori juhtimine selliselt, et oleks tagatud mootori soovitud pöördemoment ja kiirus. Samal ajal pööratakse tähelepanu kvaliteedikriteeriumile, nagu näiteks suur toimekiirus, suur kasutegur jne. [12]

Vektorjuhtimine jaguneb omakorda otseseks vektorjuhtimiseks, kaudseks vektorjuhtimiseks ja loomulikuks vektorjuhtimiseks.

Sagedusmuundurite juhtimine on planeeritud toimima läbi programmeeritava loogikakontrolleri Beckhoff CX8190, mis on ühendatud operaatorarvutiga. Antenni asendi määramiseks kasutatakse kontaktivabu pöördkoodereid Turck RI360P0-QR24M0-IOLX2-H1141.

Pöördkooder on elektromehhaaniline seade, mis jälgib võlli pöördenurka või selle muutuseid (Joonis 6).



Joonis 6. Tavapärase pöördkoodri komponendid [13]

Antud info muudetakse koodiks, mida on võimalik teiste seadmete abil dekodeerida, saades info asendite ning positsioonide kohta. Absoluutkooder kasutab iga asendi jaoks unikaalset koodi, millega määratakse kooderi absoluutne asend. [13]

Absoluutse pöördkoodri kasutus on positsiooni määramisel kriitilise tähtsusega, kuna parabolantenn oma olemuselt on suundantenn, mis peab olema suunatud satelliidi suunas. Kõrvalekalle satelliidi ning antenni suhtes peab olema minimaalne, et tagada katkestusteta ühendus andmepakettide edastamiseks. Maksimaalne kõrvalekaldenurk, arvestades lainepikkust ning parabooli läbimõõtu, on $0,4^\circ$. Mõistlik on süsteemi muuta veel täpsemaks, kasutades

kõrvalekaldenurka $0,2^\circ$. Pöördkooder peab seega olema suuteline ühe täispöördega lugema vähemalt 1800 impulssi.

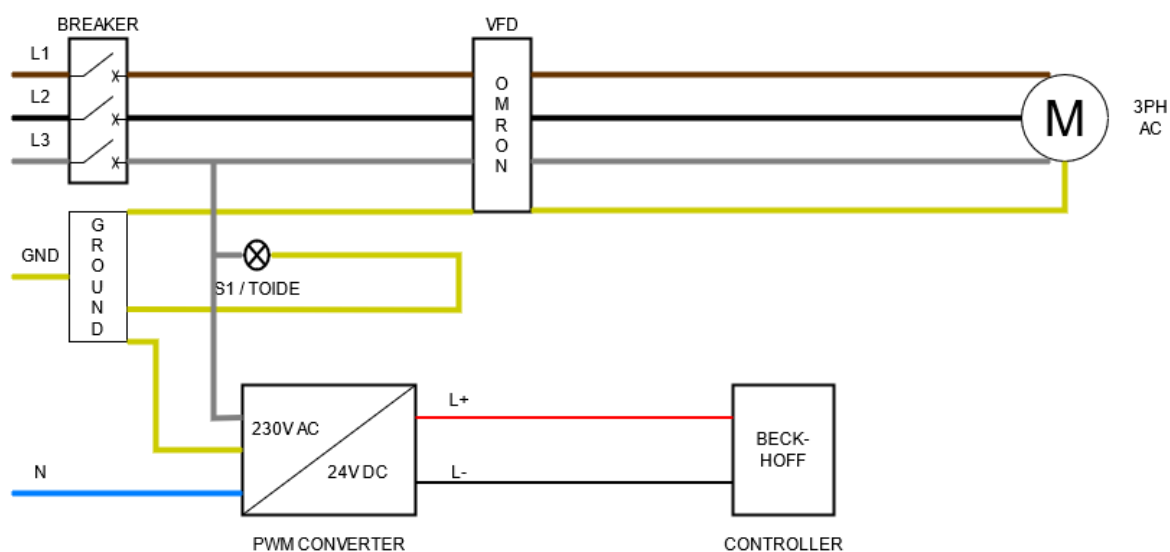
2. UUE JUHTSKEEMI PLANEERIMINE KATSESTENDI JAOKS

Uue juhtimisskeemi planeerimisel katsestendi jaoks võttis töö autor inspiratsiooni koosolekutel kokku lepitud vajaminevatest komponentidest. Paika sai pandud tööpõhimõte, et katsestendi juhtimine peaks kattuma saajaprotsendilisel lõpliku paraboolantenni juhtimisega. Igasugune erisus tähendaks, et katsestendi juhtimisel ning lõpliku seadme juhtimisel ei ole omavahelist seost. Esmalt lähenes töö autor uue juhtskeemi planeerimisele klassikaliselt, tehes situatsioonijoonise paberile.

Peale paberskeemi järgi ühenduste loomist ning testimist digitaliseeris töö autor antud joonised, joonestades need kasutades draw.io online-tarkvarapaketti. [14]

Turvaahela ühendamisel L ja PLC klemmide vahel ühendatakse sinna hädalüliti ning lõpulülite NC klemmid. Selliselt on võimalik ühega kolmest lülitist lülitada välja muunduri signaalid.

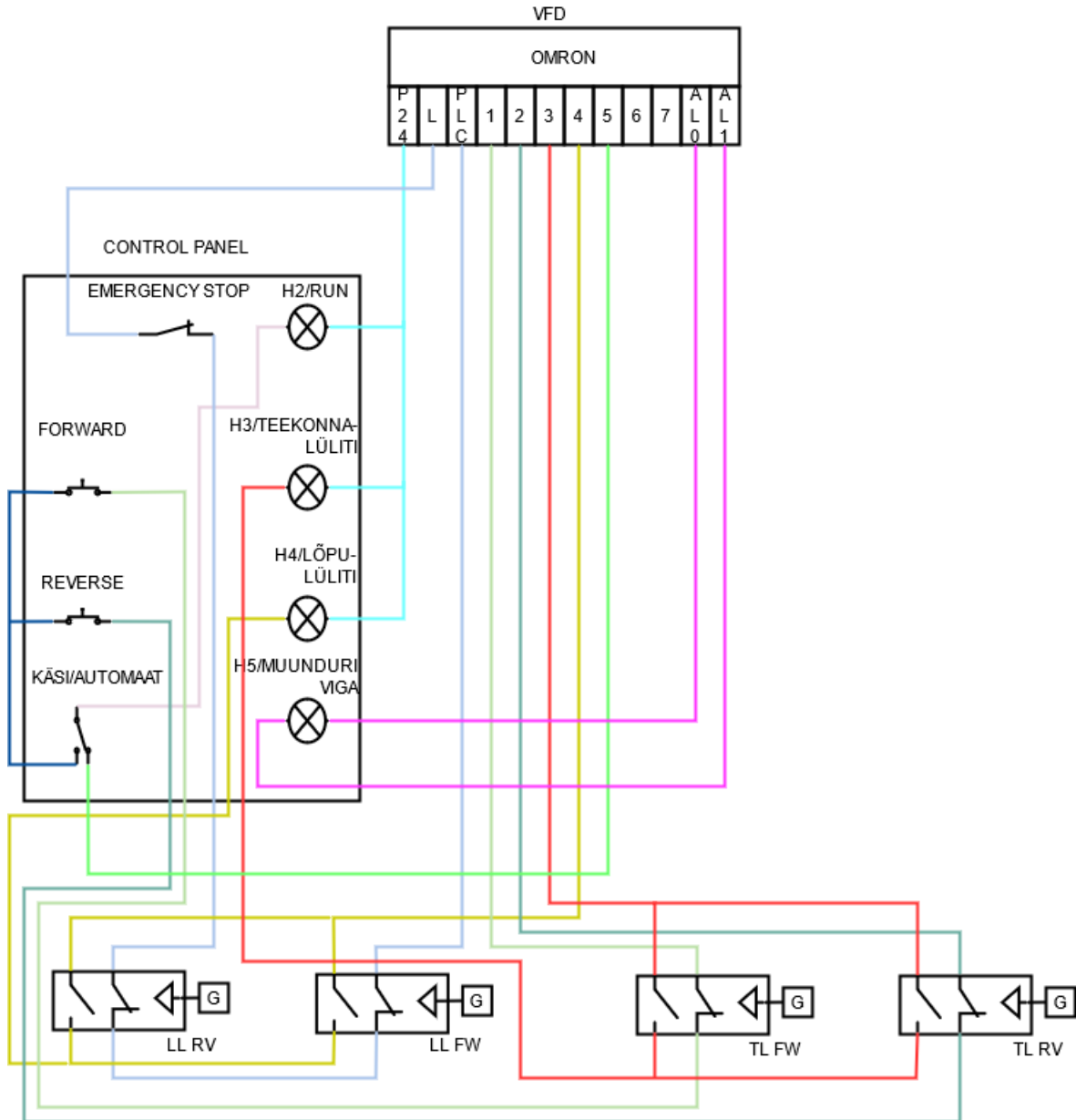
Käesolev katsestend on ehitatud ühe mootori juhtimiseks, kasutades satelliidiantenniga sama mootorit, lüliteid, kontrolleri ja sagedusmuundurit. Vooluühenduste skeem on nähtaval joonisel 7, signaaliühenduste skeem on nähtaval joonisel 8.



Joonis 7. Vooluühenduste skeem

Vooluühenduse puhul ühendatakse 16A jõupistik seinale (joonisel eraldi välja toomata), faasid tuuakse läbi kaitselüliti, mida kasutatakse ka katsestendi sisse-välja lülitamiseks. Peale kaitselülite ühenduvad kolm faasi ning maandus sagedusmuunduriga OMRON 3G3MX2-A4004-E, millest omakorda kolm faasi ning maandus ühendatakse mootoriga. Kolmandast faasist on tehtud väljavõtte toite signaallambile ning PWM pingemuundurile, mis muundab sissetuleva 230V vahelduvvoolu 24V alalisvooluks, kuna kasutatav Beckhoffi controller vajab sellist toitepinget.

Jõupistikust tulev neutraaljuhe ühendatakse otse PWM pingemuundurisse, maandus ühendatakse maandustoitesse, kuhu vooluühenduste skeemil ühenduvad sagedusmuunduri, signaallambi ja pingemuunduri maandused, edaspidi ühenduvad ka lülitite maandused.



Joonis 8. Signaaliühenduste skeem

Signaaliühenduste skeemil on näha kõik teostatud signaalide ühendused. LL RV, LL FW, TL FW ning TL RV on selliselt märgistatud lülitid, kus LL tähistab lõpulülitit, TL tähistab teekonnälülitit, FW ning RV vastavalt pöörlemissuunda. Kõikide lülitite maandus (skeemil G) on ühendatud ühtsesse maandusplokki.

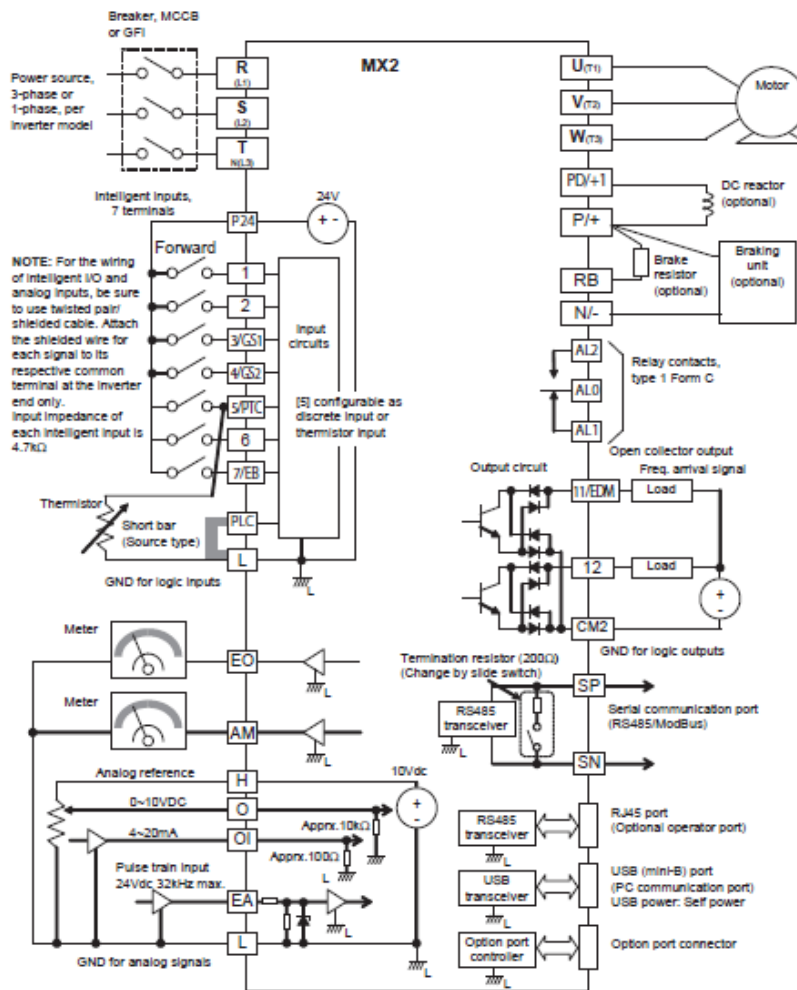
Ohtusahel on üles ehitatud sagedusmuunduri L ning PLC klemmide vahele, kuna antud klemmide vahelise ühenduse puudumisel katkestab sagedusmuundur kõik signaalid. Komponentid, mis

võimaldavad ohutusahelat rakendada, on kasutajapaneelil olev hädalüliti („Seen“) ning mõlemad lõpulülid (lülitites ühendus NC ühenduste all). Selliselt tagatakse, et esiteks on võimalik signaalide edastamine käsitsi välja lülitada ning kui antenn jõuab oma pööramisega ühele või teisele poole liiga kaugemale (läheb üle teekonnalüliti, mida autor kirjeldab allpool), rakendatakse ohutusahel. Lõpulüliti NO ühendused on ühendatud läbi signaallambi H4 sagedusmuundurisse, et kuvada kasutajapaneelil märgutuli informeerimaks operaatorit lüliti rakendumisest. Signaalide toide on ühendatud P24 ning sisendite 1-7 vahele. Signaallambid H2, H3 ja H4 on ühendatud sagedusmuunduri P24 klemmi. H2 ehk Run signaallamp süttib juhul, kui tekib ühendus klemmide P24 ja kas 1, 2 või 5 vahel. Vastavalt märgituna kas käsijuhtimisel FW surunuppu vajutades, RV surunuppu vajutades või automaatjuhtimise rakendamisel. Nii FW juhtimine kui RV juhtimine on üles ehitatud samamoodi, läbides peale surunuppu vastava teekonnalüliti NC ühendust. Selliselt, jõudes teekonnalüliti rakendumiseni, katkestatakse antud suunas signaali andmise võimalus signaalahela lahtiühendamise tõttu teekonnalülitis. Samal ajal rakendub ka signaallamp H3, mis tähistab teekonnalüliti rakendumist, kuna ühendus signaallambi ja sagedusmuunduri vahel on tehtud läbi sama teekonnalüliti NO ühenduste. Juhul, kui muunduril tekib tõrge, tekib signaal AL0 ja AL1 klemmide vahele, rakendades sellega signaallampi H5, mis sätestab muunduri viga.

3. SAGEDUSMUUNDURI SISENDITE-VÄLJUNDITE KAARDISTAMINE, TEHNILISE KIRJELDUSE KOOSTAMINE

Kasutatav sagedusmuundur on Omron 3G3MX2-A4004-E. Seade on mõeldud juhtima kuni 750W mootorit muutuva väändega juhimisel või kuni 400W püsiva väändega juhtimisel. Seade suudab juhtida mootorit kuni 480V pingega ning maksimaalse sagedusega 400Hz. Seadmel puuduvad jahutusseadmed ehk seade on isejahtuv. Seadme sisendite ja väljundite standardühendused on nähtavad all (joonis 9).

Standard connections



Joonis 9. Standardühendused Omron 3G3MX2-A4004 [15]

Alustuseks üldine ühendamine toite ja mootoriga:

- Toide on 3-faasiline ning peab jooksma läbi kaitselüliti, et võimaldada rikke kõrval seadme kohene väljalülitamine
- Kaitselülitist tulevad faasid tuleb ühendada sagedusmuunduri klemmidele R/L1, S/L2 ja T/L3.
- Mootori ühendamine toimub sagedusmuunduri klemmidele U/T1, V/T2, W/T3. Faasid vastavalt toite faasidele.
- Sagedusmuunduril on sillatud maandusklemmid, kuhu tuleks ühendada nii mootori maandus kui toite maandus.

Lisaks mootorile on võimalik üldistesse väljunditesse ühendada alalisvoolu reaktor (klemmid PD/+1 ja P/+) vähendamaks harmoonikute teket ning parandamaks kasutegurit, reostaatpidur (klemmid P/+ ja RB) mootori kiiruse vähendamiseks juhul, kui mootori kiirus on suurem sagedusmuunduri sätestatust ja/või pidurdusüliti (klemmid P/+ ja N/-) reostaatpiduri juhtimiseks.

Alloleval fotol (Pic 2) on näha kasutatava sagedusmuunduri sisendeid ja väljundeid. Sisseehitatud elektromagnetilise relee juhtimiseks on digitaalsete väljundite klemmid AL0, AL1 ja AL2. Need on vastavalt ühine relee klemm, relee kontakt NO (normally open) ja relee kontakt NC (normally closed). Tehasesätetes on antud relee mõeldud juhtimaks häire signaali, kuid seda releed on võimalik kasutada ka näiteks elektromagnetilise hõõrdepiduri juhtimiseks, mis antud projekti raames võimaldab peale asendini jõudmist võlli seisata ning seda tugevalt soovitud asendis hoida. See võimaldab omakorda antennil liikuda ainult vastavalt käsule, mitte ilmastikuoludele.

RS485 Modbus Slave juhtimisel kasutatakse klemme SP ja SN. Nende klemmide kaudu saab väline kontrolleri suhelda sagedusmuunduriga ning selle kaudu juhtida mootorit. Antud juhtimise kasutamiseks tuleb muuta liuglüliti asendit, mis on seotud 200Ω takistiga. Samuti on sagedusmuunduri juhtimiseks olemas RJ45 pesa, USB-mini B pesa arvutiga ühendamiseks ning lisaseadmete ühenduspesa.



Pic 2. Sagedusmuunduri sisendid ja väljundid

Digitaalsete sisenditena peaks olema klemmid L ning PLC sillatud, et olla sourcing sisend. Sellisena on tarvis sisendid seadistada. Antud kahe klemmi vahele on mõistlik ühendada lõpulüliti ning hädaseiskamise lüliti, mis lülitavad sagedusmuunduri signaalid välja, vältides rikkega tekkivat kahju.

Ülejäänud digitaalsed sisendid 1-7 on ühendatud sisendiga P24, mis annab 24V 100mA signaalvoolu.

Vaikimisi väärtused:

- 1 – Forward/Stop
- 2 – Reverse/Stop

- 3 – External trip
- 4 – Reset
- 5 – Multi-step speed reference 1
- 6 – Multi step speed reference 2
- 7 – Jog

Samas on võimalik sätetest muuta võimalikke sisendsignaale. Saadaval on 68 erinevat võimalust, mis on nähtavad Tabel 3. Tabelis on ära toodud sätte sümbol, valiku kood sagedusmuunduril, funktsioon ning sagedusmuunduri juhendi lehekül, millelt saab antud sätte kohta täiendavalt informatsiooni.

Tabel 3. Sagedusmuunduri Omron 3G3MX2-A4004-E programmeeritud digitaalsisendid [15]

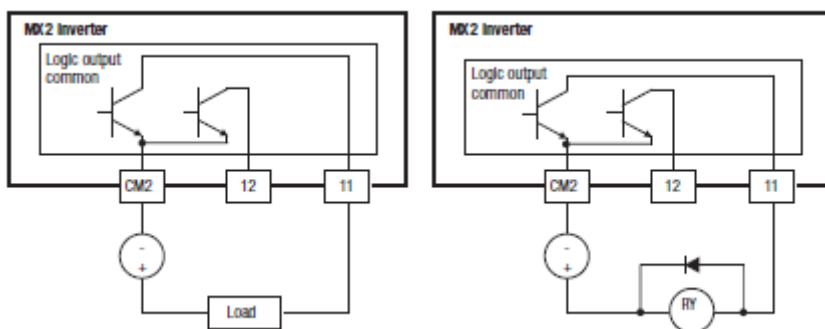
Symbol	Code	Function	Page
FW	00	Forward Run/Stop	205
RV	01	Reverse Run/Stop	205
CF1	02	Multi-step speed setting binary 1	96
CF2	03	Multi-step speed setting binary 2	96
CF3	04	Multi-step speed setting binary 3	96
CF4	05	Multi-step speed setting binary 4	96
JG	06	Jogging	99
DB	07	External DC injection braking	105
SET	08	Set 2nd control	206
2CH	09	2-step acceleration/deceleration	115
FRS	11	Free-run stop	207
EXT	12	External trip	208
USP	13	Unattended start protection	208
CS	14	Commercial switch	209
SFT	15	Soft lock	130
AT	16	Analog input switching	93
RS	18	Reset	210
PTC	19	PTC thermistor Thermal Protection	211
STA	20	3-wire start	212
STP	21	3-wire stop	212
F/R	22	3-wire forward/reverse	212
PID	23	PID enabled/disabled	109
PIDC	24	PID integral reset	109
UP	27	UP/DWN function accelerated	213
DWN	28	UP/DWN function decelerated	213
UDC	29	UP/DWN function data clear	213
OPE	31	Forced operator	214
SF1-SF7	32-38	Multi-step speed setting bit 1 to 7	96
OLR	39	Overload limit switching	128
TL	40	Torque limit enabled	137, 215
TRQ1	41	Torque limit switching1	137, 215

TRQ2	42	Torque limit switching 2	137, 215
BOK	44	Brake confirmation	147, 215
LAC	46	LAD cancel	216
PCLR	47	Position deviation clear	157
ADD	50	Frequency	217
F-TM	51	Forced terminal block	218
ATR	52	Torque command input permission	180
KHC	53	Integrated power clear	142
MI1- MI7	56-62	Drive programming input 1 to 7	219
AHD	65	Analog command held	220
CP1-CP3	66-68	Position command selection 1 to 3	186, 221
ORL	69	Zero return limit signal	187, 222
ORG	70	Zero return startup signal	187, 222
SPD	73	Speed/position switching	187, 223
GS1	77	STO1 input (Safety related signal)	223
GS2	78	STO2 input (Safety related signal)	223
485	81	Starting communication signal	314
PRG	82	Drive program start	223
HLD	83	Retain output frequency	108, 224
ROK	84	Permission of Run command	224
EB	85	Rotation direction detection (phase B)	179
DISP	86	Display limitation	224
NO	255	No allocation	-

EA ja EO on impulsside sisend ja väljund, saab kasutada nii impulsside kui PWM jaoks.

H, O OI ja L on analoogsisendid. H, O ja L kasutatakse pinge potentsiomeetri jaoks, H, OI ja L kasutatakse voolu potentsiomeetri jaoks

11, 12, CM2 kasutatakse kahe loogikaväljundi jaoks. Käesoleva sagedusmuunduri loogikaväljund talub voolutugevust kuni 50mA, mistõttu suurema voolutarbe vajadusel soovitatakse kasutada sagedusmuunduri väljundit juhtimaks eraldiseisvat releed. Relee puhul on rangelt nõutud diodi ühendamine, et seadet kaitsta väljalülitamisel tekkiva pingepiigi eest. Mõlemal juhul soovitatakse väljundi jaoks kasutada eraldi toiteseadet (Joonis 10).



Joonis 10. Sagedusmuunduri loogikaväljundite ühendusskeemid kuni 50mA voolutarbe ning üle 50mA voolutarbe korral [15]

Antud loogikaväljunditele on samuti võimalik rakendada erinevaid väljundsignaale. Täpsemalt 48 eri variatsiooni (Tabel 4). Tabelis on ära toodud sätte sümbol, valiku kood sagedusmuunduril, funktsioon ning sagedusmuunduri juhendi lehekülg, millelt saab antud sätte kohta täiendavalt informatsiooni.

Tabel 4. Sagedusmuunduri Omron 3G3MX2-A4004-E programmeeritud digitaalväljundid [15]

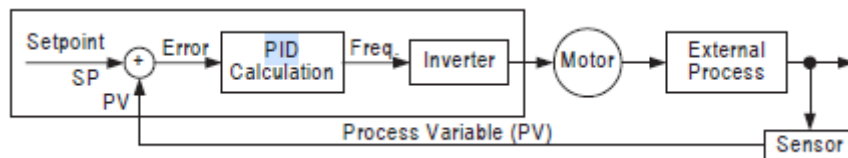
Symbol	Code	Function	Page
RUN	0	Run Signal	228
FA1	1	Constant speed arrival signal	164, 229
FA2	2	Over set frequency arrival signal	164, 229
OL	3	Overload warning	164, 231
OD	4	Excessive PID deviation	165, 232
AL	5	Alarm output	233
FA3	6	Set-frequency-only arrival signal	229
OTQ	7	Overtorque	165, 235
UV	9	Signal during undervoltage	235
TRQ	10	Torque limit	138, 236
RNT	11	RUN time over	132, 236
ONT	12	Power ON time over	132, 236
THM	13	Thermal warning	127, 237
BRK	19	Brake release	148, 237
BER	20	Brake error	147, 237
ZS	21	0 Hz signal	238
DSE	22	Excessive speed deviation	183, 239
POK	23	Position ready	183, 239
FA4	24	Set frequency exceeded 2	229
FA5	25	Set frequency only 2	229
OL2	26	Overload warning 2	231
ODc	27	Analog O disconnection detection	240
OIDc	28	Analog OI disconnection detection	240
FBV	31	PID FB status output	241

NDc	32	Network error	243
LOG1-3	33-35	Logic operation output 1 to 3	170, 244
WAC	39	Capacitor life warning signal	245
WAF	40	Cooling fan life warning signal	245
FR	41	Starting contact signal	245
OHF	42	Fin overheat warning	165, 246
LOC	43	Light load detectionsignal	164, 246
MO1-3	44-46	Drive programming output 1 to 3	246
IRDY	50	Operation ready signal	247
FWR	51	Forward run signal	247
RVR	52	Reverse run signal	247
MJA	53	Fatal fault signal	248
WCO	54	Window comparator O	141, 248
WCOI	55	Window comparator OI	141, 248
FREF	58	Frequency Command Source	248
REF	59	Run Command source	248
SETM	60	2nd motor in operation	249
EDM	62	STO (Safe Torque Off) Performance monitor (Output terminal 11 only)	249
OPO	63	Option board output	-
no	255	Not used	-

Omron 3G3MX2-A4004-E sagedusmuundurile on sisse ehitatud PID-kontroller, mis võimaldab pööramise käigus tekkivat ala- või ülepööramist kompenseerida. See võimaldab vastavalt anduri tagasisidele täiendada etteantud programmi antavat väärtust, luues sellega häiringutele parem vastuseis. Pööramise puhul näiteks arvestab sellega, et kui tuul mõjutab antenni pööramist, siis PID kontroller annab omalt poolt signaali, millega võimendatakse/vähendatakse juhtimise intensiivsust, et saavutada etteantud väärtus. PID-kontrolleri (Proportsionaal-Integraal-Diferentsiaal regulaator) matemaatiline kuju on nähtaval Joonis 11 ja funktsionaalne kuju Joonis 12. [29]

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de}{dt}$$

Joonis 11. PID-kontrolleri väljundi arvutusvalem [29]



Joonis 12. Omron 3G3MX2-A4004-E sisseehitatud PID-kontrolleri juhtskeem [15]

PID-kontrolleri puhul K_p tähistab proportsionaalset konstanti, K_i tähistab integraalset konstanti ja K_d tähistab diferentsiaalkonstanti. Kontrolleri põhimõtteks on tagada väljundi vastavus sisendile. Tavapärane mõju iga kontrolleri parameetri kohta suletud süsteemis on nähtav Tabel 5.

Tabel 5. PID-kontrolleri suletud süsteemi parameetrite mõjutus [29]

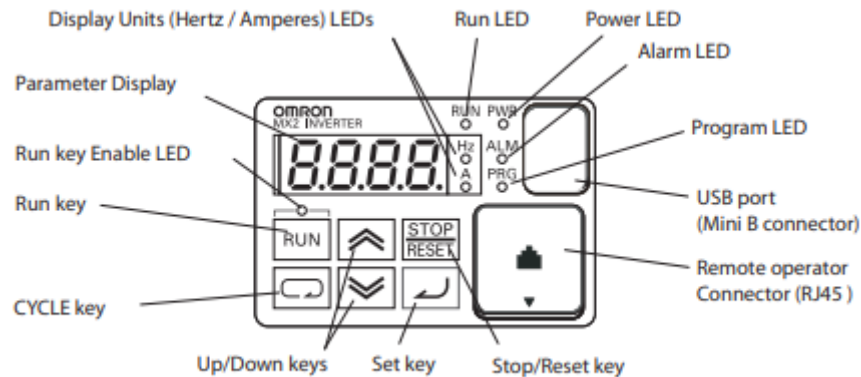
Suletud süsteemi tagasiside	Tõusuaeg	Ülereguleerimine	Stabiliseerumisaeg	Stabiliseerunud süsteemi viga
K_p	Vähendab	Suurendab	Ei mõjuta eriti	Vähendab
K_i	Vähendab	Suurendab	Suurendab	Vähendab
K_d	Ei mõjuta eriti	Vähendab	Vähendab	Ei mõjuta

Kuna vigade paranduste muudatused toimuvad jooksvalt, vähendab PID-regulaator tarbetut ülereguleerimist, tagades sellega lisaks muule ka energiasäästu. Süsteemi parimaks toimimiseks on tähtis kõigi komponentide õige tasakaal. Katse-eksitus meetodi vähendamiseks on võimalik kasutada MatLAB'i PID-seadistuse algoritmi *pidtune*, mis aitab leida optimaalsed parameetrite väärtused. [29]

4. KATSESTENDI KÄSIJUHTIMISE SEADISTAMINE

4.1 Juhtpaneeli kasutamine

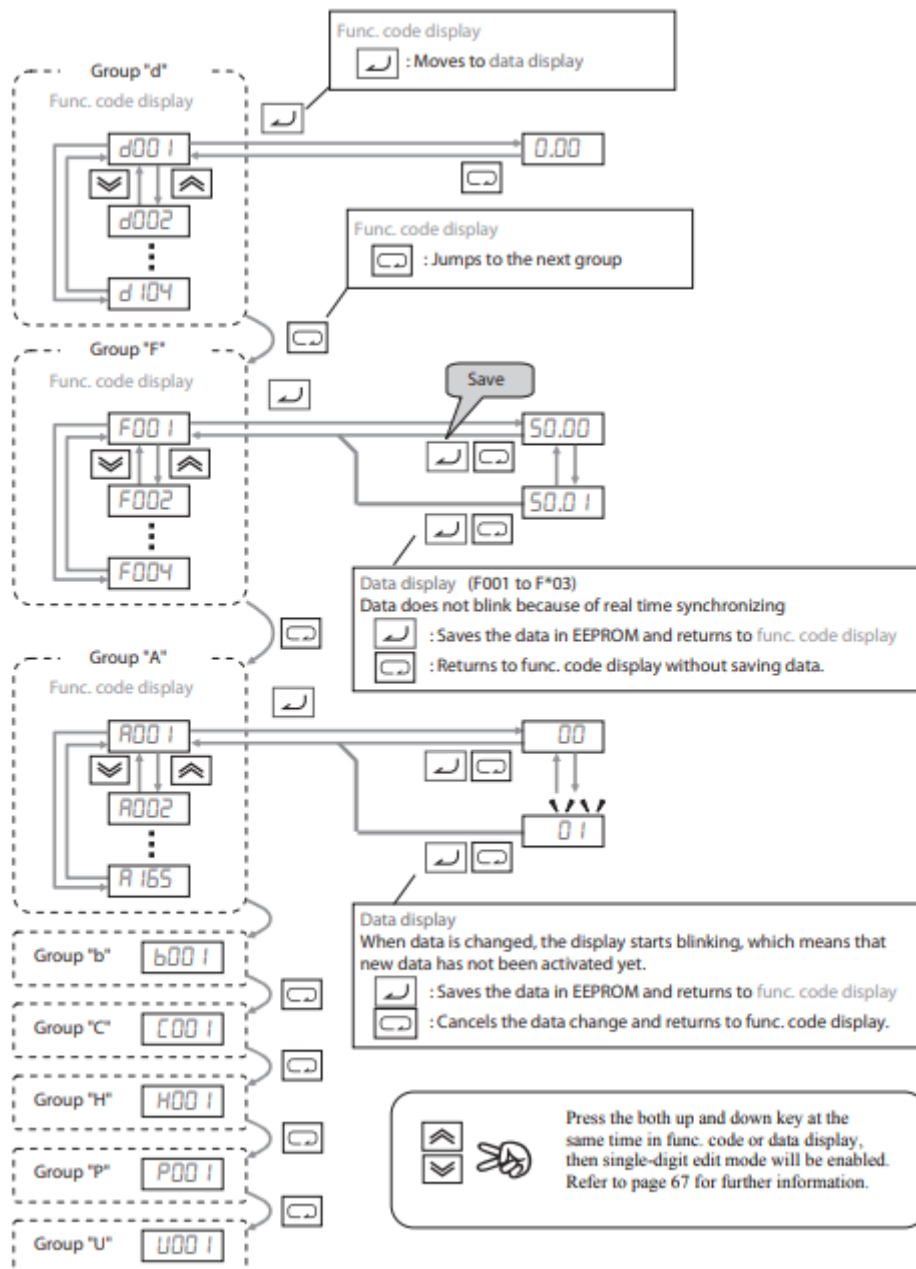
Sagedusmuunduri juhtpaneeli joonis on näha joonisel 13.



Joonis 13. Sagedusmuunduri juhtpaneel [15]

Set nupuga alustatakse parameetrite nimekirjadesse sisenemist. Cycle nupuga liigutakse parameetrite nimekirjades ringi. Üles-alla nuppudega liigutakse konkreetses nimekirjas edasi-tagasi või suurendatakse-vähendatakse väärtuseid. Kui seade on programmeerimisrežiimis ning uus väärtus on sisestatud, siis tuleb Set nupuga see kinnitada.

Peale Set nupu vajutamist ilmub ekraanile parameetrite nimekiri (näiteks d001). Üles-alla nupuga on võimalik liikuda samas nimekirjas erinevate parameetrite juurde (d001, d002 jne). Cycle nupuga on võimalik liikuda teiste parameetrite nimekirjade juurde (d001, A001, F001 jne). Graafiline kirjeldus on näha joonisel 14.



Joonis 14. Juhtpaneeli menüükaart [15]

4.2 Mootori seadistamine

Töö autor juhib tähelepanu, et kui alustada seadistamist sagedusmuunduriga, mille muudatustega ei olda kursis, tuleks esmalt sagedusmuunduri algseaded taastada.

Kasutusel oleva Omroni sagedusmuunduri puhul tuleb algseadete taastamiseks toimida järgnevalt (valikute selgitused Joonis 15):

- Valida b084 parameeter ning väärtus 00, 01, 02, 03 või 04, sõltuvalt kui suurt osa soovite taastada.

- Kui b084 parameetri väärtus valitakse 02, 03 või 04, tuleb valida lähtestamisandmed parameetri b094 alt. Väärtused on 00, 01, 02 ja 03.
- Kui b084 parameetri väärtus valitakse 02, 03 või 04, tuleb valida regioon B85 parameetri alt. Antud puhul valikus 00 ja 01, valida on tarvis 01.
- Täiendavalt, et algseadete taastamine lõpule viia, peab valima parameetri b180 ning 01.

"B" Function		
Func. Code	Name	Description
b084	Initialization selection	Select initialized data, five option codes: <ul style="list-style-type: none"> • 00 no (Clears the trip monitor) • 01 Trip data (Initializes data) • 02 Parameters (Clears the trip monitor and initializes data) • 03 Trip+Param (Clears the trip monitor and parameters) • 04 Trp+Prm+EzSQ (Clears the trip monitor, parameters and Drive program)
b094	Initialization target data	Select initialized parameters, four option codes: <ul style="list-style-type: none"> • 00 ALL • 01 Exp.COM, TERM • 02 Onlu U*** • 03 All exp.U***
b085	Initialization parameter selection	Select initial data for initialization: <ul style="list-style-type: none"> • 00 JPN • 01 EUR
b180	Initialize trigger	This is to perform initialization by parameter input with b084, b085 and b094. Two option codes: <ul style="list-style-type: none"> 00 No action 01 Initialize

Joonis 15. Algseadete taastamise parameetrialikute kirjeldus [15]

Olles teinud näiteks tehase seadete taastamise, mootori asendamise vms, tuleb esmalt paika panna mootori parameetrid ning teha esmane käivitus, veendumaks mootori ja sagedusmuunduri omavahelises sobivuses.

Esimese asjana tuleks menüüs liikuda A001 parameetri juurde ning seadistada väärtuseks 02 (väärtus 00 on väline potentsiomeeter, 01 on juhtterminal ehk I/O klemmid sagedusmuunduril, 02 on sagedusmuunduri väärtus F001, 03 on ModBus (RS485), 04 on Option, 06 on Pulse Train Frequency, 07 on EzSQ (Drive programming) ja 10 on Math). A001 parameetriga seadistatakse kiiruse väärtuse allikas.

Seejärel liikuda A002 parameetri juurde ning seadistada väärtuseks 02 (01 on juhtterminal ehk I/O klemmid sagedusmuunduril, 02 on sagedusmuunduri juhtpaneel, 03 on ModBus (RS485), 04 on Option). A002 parameetriga seadistatakse käivitus- ja peatamiskäsu allikas.

A003 parameetriga pannakse paika mootori baassagedus (kas 60Hz või 50Hz). Valida 50Hz.

A083 parameetriga pannakse paika mootori ping. Valida A400 ehk 400V (3 faasi).

b012 parameetriga pannakse paika mootori voolutugevus. Tegemist on protsendiga sagedusmuunduri maksimaalsest voolutugevusest. Sisestada 90% (1,88A jaoks).

H003 parameetriga määratakse mootori võimsus (meie puhul 0,75kW).

H004 parameetriga pannakse paika mootori pooluste arv. Kuna antud mootori kiirus on kõige lähedasemalt 1000 rpm'le, on tegemist 6-pooluselise mootoriga.

Valige parameeter F001.

Nüüd on mootor programmeeritud. Veenduge järgnevas:

- Toite LED põleb
- Run nupu üleval olev LED põleb. Kui mitte, kontrollida A002 parameetrit
- PRG LED ei põle. Kui põleb, siis väljuda parameetri muutmise Cycle või Set nupu abil
- Mootor ei ole ühendatud koormusega

Seejärel:

- Vajutage RUN nuppu. PWR kõrval olev RUN LED süttib
- Vajutage noolt üles, et tõsta sagedust. Mootor peaks hakkama pöörlema
- Vajutage STOP nuppu, et pöörlemine peatada

Kui antud testis ei märgatud anomaaliaid, on mootor edukalt seadistatud.

4.3 Kasutaja juhtpaneeli ning juhtimise seadistamine

Selleks, et kasutada FW ja RV nuppe, käsi- ja automaatjuhtimist, tuleb mõningaid parameetreid korrigeerida. **Tähtis on A002 ehk mootori käivituse allikat MITTE korrigeerida väärtusele 01 enne I/O terminali klemmide 1-7 väärtuste kontrollimist. Vastasel juhul on oht mootori ootamatule käivitumisele, mis võib tuua kaasa vigastusi või surma!**

Käsijuhtimisel kasutatakse 2-wire juhtimissüsteemi. Ehk ühe surunupuga edastatakse päripäeva töötamine, nupu vabastamisel on stop-käsklus ning teise surunupuga sama asi vastupäeva töötamisega.

Püsiva sageduse saab anda ette muutes A001 parameetri väärtuseks 02 ning F001 väärtuseks soovitud sageduse (näiteks 30Hz). F001 on võimalik sättida 0.0Hz – A004 seadistatud sagedus (50Hz antud puhul).

Forward surunupu kasutusele võtmiseks on tarvis valida parameeter C001 (esimese I/O terminali klemmi käsk) ning omistada väärtus 00.

Reverse surunupu kasutusele võtmiseks on tarvis valida parameeter C002 (teise I/O terminali klemmi käsk) ning omistada väärtus 01.

C003 ehk teekonnalülitite rakendumise käsul kasutame DC injection brakingut (valime parameetri 07).

C004 ehk lõpulülitite rakendumise käsul ei ole tähtsust, kuna samade lülitite rakendumisel rakendub ohutusahel ning signaalide edastamine katkeb. Sisestame parameetri väärtuseks 11 (Free-run stop).

C005 ehk automaatjuhtimise rakendumise käsuks peab olema parameetri väärtus 31 (Forced operator).

C006 ja C007 käsud määrata 255 (No allocation).

Lõpetuseks valida parameeter A002 väärtuseks 01, mis suunab käivituskäskud I/O terminali.

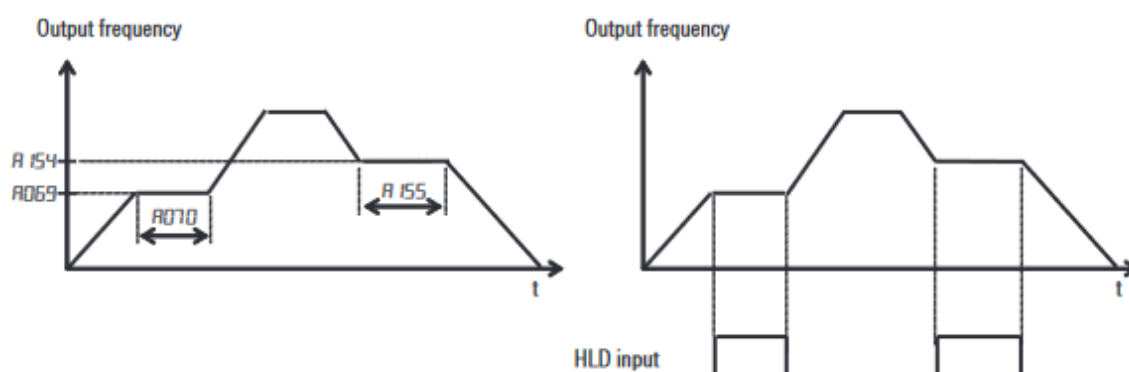
Sagedusmuunduri vea kuvamiseks tuleb veenduda, et parameetri C036 väärtus on 00 (relee kontaktid on NO (AL2 on NO, AL1 on NC)). Seejärel valida parameeter C026 ning väärtuseks määrata 05 (sagedusmuunduri alarm).

Selliselt on juhtimise põhitõed seadistatud ning saab keskenduda häälestamisele.

Kiirenduse aega reguleeritakse F002 väärtuse korrigeerimisega.

Aeglustuse aega reguleeritakse F003 väärtuse korrigeerimisega.

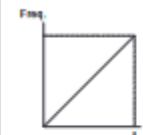
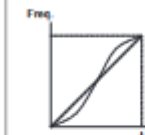
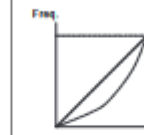
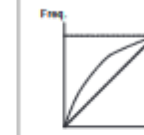
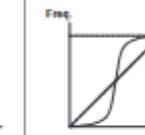


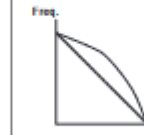
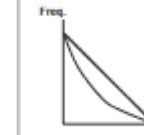

Siinkohal tuleb tähelepanu pöörata, et nii kiirendusele kui aeglustamisele on võimalik anda mitu väärtust, saavutades esmalt ühe sageduse, sellel stabiliseeruda ning seejärel liikuda edasi (Joonis 16).



Joonis 16. Kiirenduse ja aeglustuse võimalik kuju [15]

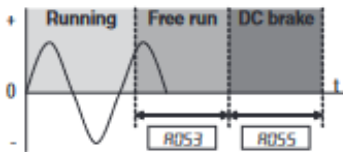
Samuti on võimalik rakendada lisaks lineaarsele tõusule-langusele erinevaid kujusid (Joonis 17).

Acceleration / deceleration pattern summary

Setting	00	01	02	03	04
Curve	Linear	S-curve	U-curve	Inverse U-curve	EL S-curve
R097 (Accel. pattern)					
R098 (Decel. pattern)					
Remarks	Standard pattern.	Effective for preventing the collapse of cargo carried by lift or conveyor for example.	Effective for the tension control of winding machine, to prevent cutting the object to be wound, for example.		Effective for lift application because of the shock less start and stop.

Joonis 17. Kiirenduse ja aeglustuse erinevad tõusu-languse kõverad [15]

DC Injection Brakingu rakendamise eesmärk on peale teekonnalüliti aktiveerimist võtta juba hoog maha, et mootor ei saaks ennast pöörata asendisse, kus jõutakse lõpulülitini ning katkestatakse kogu signaalide edastus. Määratakse vabajooksu aeg ning seejärel pidurdamise aeg (Joonis 18).



Joonis 18. Alalisvoolu pidurduse rakendumine [15]

Selleks tuleb:

- Valida parameetri A051 väärtuseks 01 (ON).
- A052 parameetriga määratakse sagedus, millest alates sellist pidurdusmeetodit rakendatakse (näiteks seadistatuna 50Hz peale, aktiveerudes 30Hz peal rakendatakse tavapärast pidurdust).
- A053 parameeter määrab pidurduse viite.
- A054 määrab pidurdusjõu protsentides.
- A055 määrab pidurdusaja. See on tähtis näiteks teisesuunalise liikumise aktiveerimise viiteks (et ei oleks liiga suur paus kahe liikumise vahel või, et ei oleks liiga väike paus, resulteerudes hõõrdeosade deformatsiooniga).

A056 annab valiku kas Edge Operation (00) või Level Operation (01).

Sellisel juhtimisstiilil ei ole väga rohkemat tarvis seadistada. Juhul, kui teekonnalüliti lülitatakse, ei ole võimalik selle suuna Run-käsklust enam aktiveerida (ühendusskeemist tingituna katkestab teekonnalüliti ahela signaali), teiseks kui lõpulüliti lülitatakse, tühistatakse kõik sagedusmuundurile saadetavad signaalid.

Kirjeldatud lahendus on töö autori poolt reaalselt koostatud katsestendil järele katsetatud ning toimib.

Esiteks katsetati mootori toimivust sagedusmuunduri peal. Selle jaoks tuli A001 parameetri väärtuseks valida 02 ning A002 parameetri väärtuseks 02. Selliselt käivitati mootor sagedusmuunduri RUN/STOP nupuga ning üles-alla nuppudega reguleeriti sagedust. Siinkohal tekkis töö autoril probleem, mistõttu tuli rakendada asünkroonmootori diagnostikat.

Kasutuselolev uhiuus Siemensi asünkroonmootor ei käivitunud sageduse suurendamisel koheselt ning peale käivitumist ei saavutanud nimisagedust, enne aeglustusperioodi minekut ning sagedusmuundurile veateate edastamist. Samuti peale seda kiilus mootori võll kinni. Peale mootori avamist oli selge, et õhupilu staatori ning rootori vahel ei olnud piisav, tekitades täiendava koormuse (Pic 3).



Pic 3. Katsestendi asünkroonmootori staatori kahjustus

Õnneks ei olnud mootori kumbki komponent sedavõrd kahjustunud, et seda ei oleks olnud võimalik taastada ja toimima saada, eriti pidades silmas antud mootori minimaalset koormatust. Peale komponentide vähest töötlust käitus asünkroonmootor täpselt nii, nagu normaaltalitusel kohane.

Teiseks katsetati ohutusahela toimivust kõigil kolmel juhul, ehk kahe lõpulülitiga ning katsestendi juhtpaneelil asuva hädastopp-lülitiga. Antud lülititest ühe rakendumisel katkestatakse ühendus sagedusmuunduri signaalide vahel. Töö autor soovib toonitada, et peale antud situatsiooni tekkimist on tarvilik antenni asend manuaalselt tagasi keerata, välja arvatud hädastopp-lüliti kasutamisel, mille seisundit saab lihtsalt ennistada. Kõnealuse olukorra lahendamisel on mõistlik igal juhul kontrollida antenni ning ühenduste seisukorda, kuna antenn liigub asendisse, milleni see ei tohi jõuda. Lõpulüliti vabastamiseks teeb töö autor ettepaneku paigaldada antenni juurde

kontaktorid, millega juhtida vastavat asünkroonmootorit ilma sagedusmuundurita. Siinkohal peab olema tähistus väga selge, et mootorit õigesse suunda liigutada.

Kolmandaks katsetas töö autor käsijuhtimist läbi juhtpaneeli. Selleks jäeti A001 parameeter samaks (02), kuna RUN-käskluse signaali muutudes hakkab sagedusmuundur lähtuma F001 parameetrist ehk mootori soovitud sagedusest. A002 parameeter seadistati 01, millega võimaldatakse käivitamiskäsklust juhtida sagedusmuunduri digitaalsisenditesse ühendatud surunuppudega. Katsetati nii päripäeva kui vastupäeva liikumist. Täiendavalt teekonnalülitite rakendumisel antud suunas liikumise mittevõimaldamist. Läbi juhtpaneeli juhtimisel katsetas töö autor ka erinevaid kiirendus- ja pidurduskarakteristikuid, et leida optimaalset lahendust. Ühelt poolt tuleb arvestada mootori nominaalset pöörlemiskiirust, teisalt aga sellega tekkivat momenti. Kuna katsestendile planeeriti kasutada 3D-prinditud reduktorit, tuli seadistada kiirendus üsna aeglaseks, sest teatavasti plastikkomponendid enamus juhtudel ei kannata suurt momenti. Kiirenduse seadistamine ei ole sedavõrd kriitiline, kuid peab olema siiski piisav, et satelliidiga suuta maksimaalselt sidet hoida. Pidurdamise puhul tulevad mängu inertsjõud, mis mõjuvad samuti tugevalt, ning mis enamasti on komponentide kahjustumise taga. Tähelepanuväärne on see, et satelliidiantenni ulatuse maksimaalseks kasutuseks peab olema teekonnalüliti ning lõpulüliti vahel vahe minimaalne. See omakorda seab täiendavad piirangud pidurdamisele. Selleks, et tagada alalisvooluimpulssidega mootori pidurdumine õigeaegselt, on vaja teha katsed reaalse süsteemi peal. Eelnevalt saab luua ligilähedase pidurdusmudeli tuginedes välja arvatud mõjuvatele jõududele ning ette nähtud pidurdusmaale. Satelliidiantenni seisukohalt on tähtis maksimaalne sideaeg satelliidiga, kuid tähelepanuta ei saa jätta süsteemi töökindlust – kui süsteemi mõni mehhaaniline komponent saab ebaõige seadistuse tõttu kannatada ning põhjustab kogu seadme rikke, on rivist väljaolekuaeg palju suurem probleem. Antud katsetused kinnitavad, et sellise lahendusega käsijuhtimine toimib ning süsteem on selleks edukalt seadistatud.

5. KATSESTENDI AUTOMAATJUHTIMISE SEADISTAMINE

5.1 Programmeeritava loogikakontrolleri tutvustus ja sagedusmuunduri seadistus

Käesoleva katsestendi automaatjuhtimine toimub läbi programmeeritava loogikakontrolleri. Programmeeritav loogikakontroller ehk PLC on levinud tööstuses ja automaatikasüsteemides oma vastupidavuse ning paljude erinevate võimaluste tõttu. Programmeeritav loogikakontroller toimib info vastuvõtmises sisendites olevatest seadmetest või anduritest, töötleb info ümber ning vastavalt eelprogrammeeritud parameetritele juhib väljundeid. [16]

Võrreldes tavapärase arvutite, mikrokontrollerite või tööstuskontrolleritega erineb PLC järgneva tõttu:

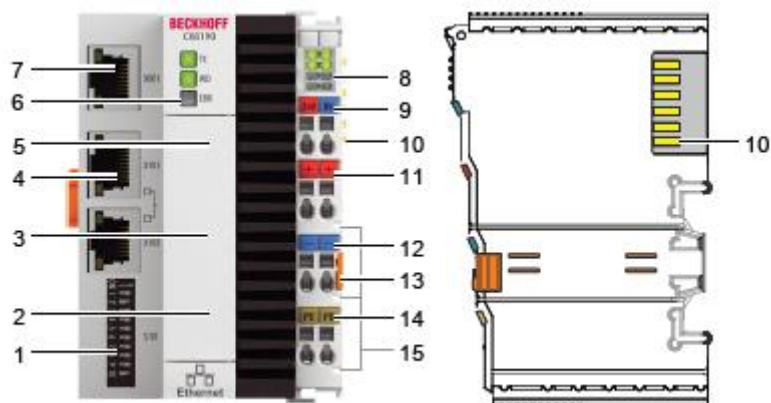
- Signaalimoodulid – PLC protsessor talletab ja töötleb programmi andmeid, kuid sisend- ja väljundsignaali moodulid ühendavad PLC ülejäänud seadmega. Antud moodulid annavad protsessorile sisendinfo ning käivitavad väljundtegevusi. Signaalid võivad olla nii digitaalsignaali kui analoogsignaali. Sisenditena on kasutusel näiteks andurid, lülitid, mõõdikud, väljunditena näiteks releed, lambid, klapid ja ajamid.
- Andmesidemoodulid – Olukordades, kus PLC peaks ühenduma teist tüüpi süsteemidega, näiteks kuvama parameetreid SCADA's, on andmesidemoodul tarvilik. Ühendusi on võimalik luua erinevate parameetrite kaudu (PROFIBUS, Modbus, Ethernet).
- HMI ehk Human Machine Interface – Kasutatakse selleks, et suhelda PLC'ga reaajas. Antud lahendus võib olla lihtne, koosnedes ainult lihtsakoelise ekraani ning klahvistikuga või olla keerukamad eraldi seadmed, et PLC parameetreid jälgida ning tarvidusel muuta. [16]

Antud katsestendil kasutatud programmeeritav loogikakontroller on Beckhoff CX8190, mille parameetrid on leitavad Tabel 6, näidiskonfiguratsioon Joonis 19 ja näidiskonfiguratsiooni legend Tabel 7.

Tabel 6. Beckhoff CX8190 parameetrid [17]

Protsessor	ARM Cortex-A9 800MHz
------------	----------------------

Välkmälu	512Mb, laiendatav, microSD
Operatiivmälu	512Mb DDR3 RAM, ei ole laiendatav
Liidesed	1xRJ45 10/100Mbit/s, 1x bus liides (2xRJ45)
Operatsioonisüsteem	Windows Embedded Compact 7
Juhttarkvara	TwinCAT 3



Joonis 19. Beckhoff CX8190 näidiskonfiguratsioon [17]

Tabel 7. Beckhoff CX8190 näidiskonfiguratsiooni legend [17]

No.	Komponent	Kirjeldus
1	DIP-lüliti (S101)	X101/X102 Ethernet pesade IP-aadressi seadistamiseks
2	Aku pesa (kaane all)	Kella ja kuupäeva talletamiseks mõeldud aku/patareitoide
3	MicroSD pesa (kaane all)	Pesa tööstuslike MicroSD mälukaartide jaoks
4	Ethernet liidesed RJ45 (X101, X102)	Kohalike võrkudega ühendamiseks. Reaalaja võrguühenduse suutlik
5	Reset nupp	Lülitab PLC konfiguratsioonirežiimi
6	Diagnostika LED'id	Saab luua oma diagnostika teavitused WD ja ERR diagnostika LED'ide jaoks
7	Ethernet liides RJ45 (X001)	Liides PLC programmeerimiseks

8	Diagnostika LED'id, toiteallika ühendus	E-bus ja K-bus kommunikatsioonide staatuse LED'id, toiteallika ja ühenduste bus diagnostika LED'id
9	Vedruklemmid +24V ja 0V	PLC toiteühendused
10	Ühendus Bus (K-bus või E-bus)	Liides EtherCAT'i ühendustele või Bus ühendustele. Andmevahetus ja toide
11	Vedruklemmid +24V	Bus ühenduste toide +24V
12	Vedruklemmid 0V	Bus ühenduste toide 0V
13	Ühenduste vabasti	Vabastab PLC ühendussiinilt
14	Vedruklemmid PE	PLC maandusklemm
15	Voolukontaktid +24V, 0V, PE	Bus ühenduste voolukontaktid

Antud kontrolleriile on lisatud laiendusmooduleid, et tagada vajaminevad tingimused:

- EL1809, mis annab võimaluse ühendada kuni 16 digitaalset sisendit [18]
- EL2008, mis annab võimaluse ühendada kuni 8 digitaalset väljundit [19]
- EL6224, mis annab võimaluse ühendada kuni 4 IO-link seadet [20]
- EL6021, mis annab võimaluse ühenduda läbi ModBus'i protokolliga, kasutades RS422 või RS485 liidestust. [21]

Selleks, et PLC suhtleks programmeerimisarvutiga, tuleb seadmed omavahel ühendada RJ45 kaabliga. PLC suhtleb sagedusmuunduriga üle ModBus protokolliga, ühendudes PLC laienduse EL6021 ning sagedusmuunduri vahele (laienduse positiivsed klemmid sagedusmuunduri SP klemmi, negatiivsed klemmid sagedusmuunduri SN klemmi).

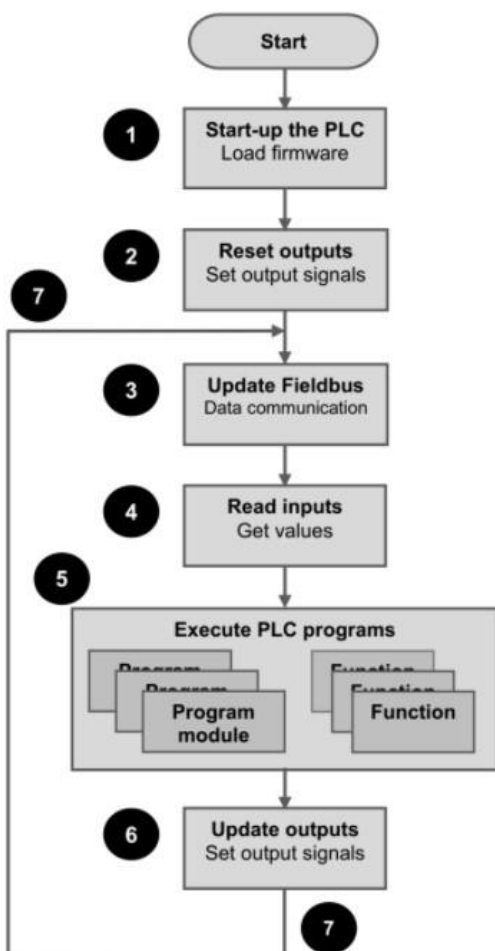
Selleks, et sagedusmuundurit oleks võimalik välise kontrolleri juhtida, tuleb teha järgnevat:

- Valida parameeter A001 väärtuseks 03, mis seadistab kiiruse sisendiks ModBusi
- Valida parameeter A002 väärtuseks 03, mis suunab käivituskäskud ModBusi kaudu juhitavaks

Sellega on katsestend vastavalt üles seatud ning ühendatud. Süsteem on valmis programmeerimiseks ning katsetamiseks.

5.2 Juhtimisprogrammi ülesehitus

Juhtimisprogrammi üleehituse loomiseks on esmalt vaja aru saada, kuidas loogikakontroller toimib ning etteantud infot protsessib. PLC toimib tsükliliselt (Joonis 20). Jooniselt on näha kahte erinevat tsüklit – käivitustsükkel toimub etappides 1...7 ning töötstsükkel etappides 3...7. Töötstsükli puhul loetakse esmalt kõik sisendite väärtused. Seejärel teostatakse etteantud arvutused, mis tuginevad sisenditelt saadud väärtustele ning kasutaja poolt koostatud programmikoodile. Viimase sammuna enne töötstsükli uuesti algamist määratakse väljundite väärtused, millega tagatakse süsteemi soovitud süsteemi talitus. [22]

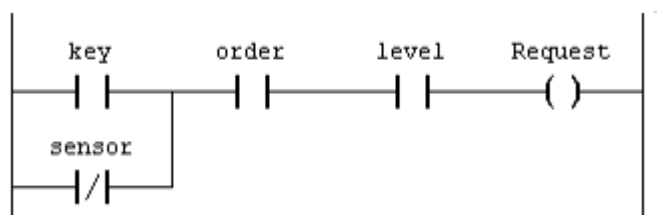


Joonis 20. PLC töötstsükkel [21]

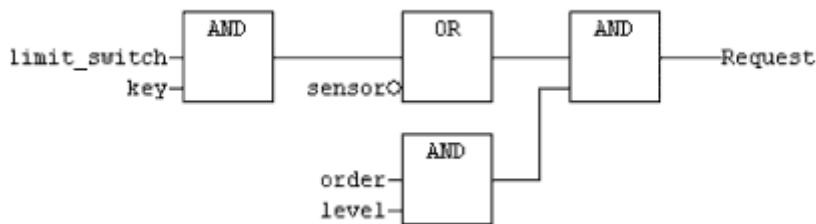
Kasutuseloleva Beckhoff CX8190 programmeeritava loogikakontrolleri jaoks kasutatakse programmeerimistarkvara TwinCAT 3, mis on loodud Visual Studio platvormile. Antud tarkvarapakett on mõeldud Beckhoffi programmeeritavate kontrollerite ja nende lisade

programmeerimiseks ja ühendamiseks. [23] Antud tarkvara töötab nii Windows 7 kui Windows 10'ga. TwinCAT 3 tugineb rahvusvahelisele programmeerimiskeelte standardile IEC 61131-3. Antud standard sätestab programmeerimiskeeled, mida kasutatakse programmeeritavates loogikakontrollerites, sätestab nende ülesehituse (arhitektuuri) ning koosneb kokku viiest programmeerimiskeelest.

- LD – *Ladder Diagram* – Redelskeem (Joonis 21)
- FBD – *Functional Block Diagram* – Funktsioonplokk skeem (Joonis 22)
- ST – *Structured Text* – Struktuurtekst (Joonis 23)
- IL – *Instruction List* – Käsunimekiri (Joonis 24)
- SFC – *Sequential Function Chart* – Järjestikuline funktsioonskeem (Joonis 25) [24]



Joonis 21. Redelskeem [24]



Joonis 22. Funktsioonplokk skeem [24]

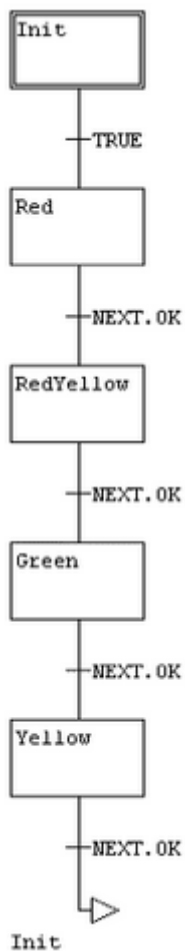
operator	operand	comment
CASE Temperatur_furnace OF		(* control heating output *)
	60..99: Heating := 80;	(* 80% *)
	100..149: Heating := 60;	(* 60% *)
	150..199: Heating := 35;	(* 35% *)
	200..250: Heating := 10;	(* 10% *)
ELSE Alarm := TRUE;		(* Set alarm *)
END_CASE;		

Joonis 23. Struktuurtekst [24]

Struktuurtekst on kõrgema taseme programmeerimiskeel, kuna etteantud käsud ei ole „masin-orienteeritud“. See on võrreldav näitels PASCAL'i ja C programmeerimiskeelega. [24]

label	operator	operand	comment
Start:	LD	Basin_level	(* Load level *)
	GE	13	(* Limit reached? *)
	JMPC	Pump_on	
	R	Pump_control	(* Pump off *)
	JMP	End	
Pump_on:	S	S Pump_control	(* Pump on *):
End:			

Joonis 24. Käsunimekiri [24]



Joonis 25. Järjestikuline funktsioonskeem [24]

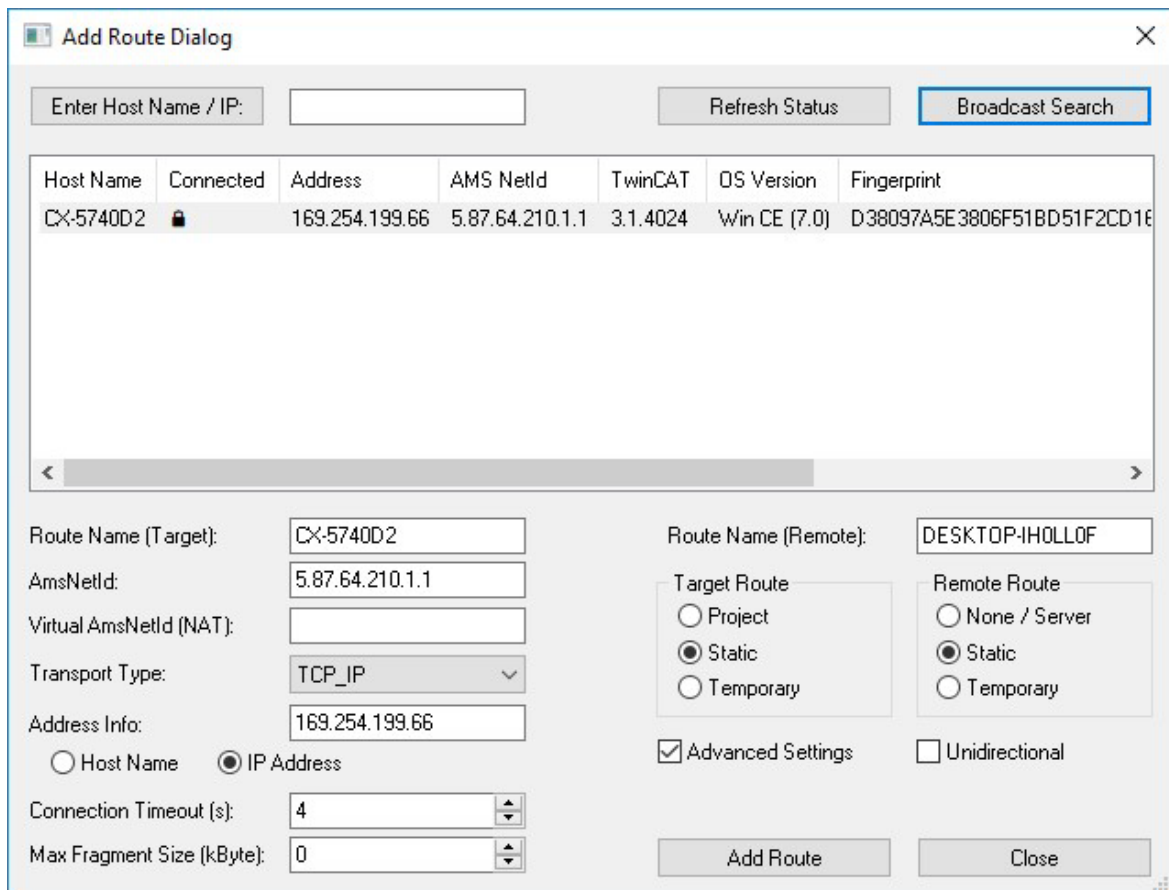
Hea juhtimisprogrammi üks põhitingimusi on kerge hallatavus ning süsteemi selgus. Selliselt on programmi kerge mõista ja lugeda, muutes tulevikus programmi täiustamise märkimisväärselt lihtsamaks. Tuginedes nendele tingimustele on üheks parimaks programmeerimiskeelest struktuurtekst, kuna see võimaldab sisendite ja väljundite töötlemist täpsete käskude abil.

Beckhoffi kontrolleri ning programmeerimiseks kasutatava juhtarvuti ühendamiseks kasutatakse RJ45 otstega Etherneti kaablit. Tähtis on siinkohal teada PLC IP aadressi või nime, samuti peab

olema TwinCAT 3 konfiguratsioonirežiimis. Juhtarvuti ja kontrolleri omavaheliseks ühendamiseks tuleb toimida järgnevalt:

- TwinCAT 3 tarkvarapaketi valik *File – New – Project* ning loo uus TwinCAT XAE projekt.
- Vasakul oleva süsteemijaotuse juures vali *SYSTEM* ning seejärel *Choose Target...*
- Vali *Search (Ethernet)...*
- Sisesta seadme nimi või IP-aadress lahtrisse *Enter Host Name/IP* ja vajuta *Enter*.
- Märkista leitud seade (kuvatakse seadme Host name, IP-aadress, versioon jne), vali *Add Route*. Peale seda ilmub sisselogimise kuva. Vaikimisi on kõigi Beckhoff CX seeria programmeeritavate loogikakontrollerite sisselogimisinfo:
 - o Kasutaja: Administrator
 - o Parool: 1
- Kui rohkemaid seadmeid ei ole soov otsida, siis valida *Close*, et sulgeda *Add Route* kuva. Uus seade on nähtav *Choose Target System* kuvas.
- Valige seade, mida soovite siduda, ning seejärel vajutage *OK*.

Alternatiivne variant on kasutada käsku *Broadcast Search*, mis otsib kõiki võrgus olevaid seadmeid, mitte konkreetset kontrolleri (Joonis 26). [26]

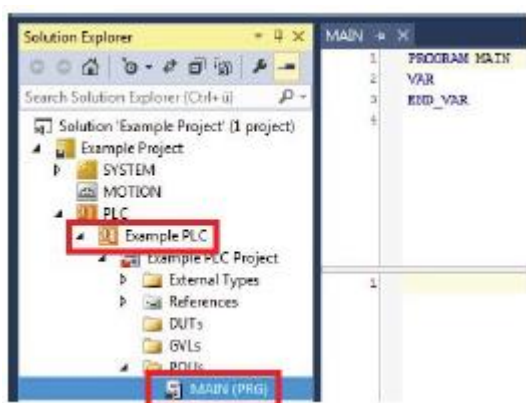


Joonis 26. TwinCAT 3 kontrolleri otsing Ethernet [26]

Nii pea, kui PLC ja juhtarvuti on omavahel ühendatud, on võimalik ühendada ka laiendusmoodulid. Selle jaoks peaks olema TwinCAT3 konfiguratsioonirežiimis ja PLC on ühendatud kui sihtsüsteem. Laiendusmoodulite otsinguks tuleb toimida järgnevalt:

- Süsteemijaotusest valida *I/O*, seejärel *Devices*.
- Kontekstimenüüst valida *Scan*.
- Valida laiendusmoodulid, mida lisada, seejärel kinnitada valik *OK* nupule vajutades.
- Kinnitada valik *Yes* nupuga, et otsida laienduste kastid ning, et võimaldada *FreeRun*.

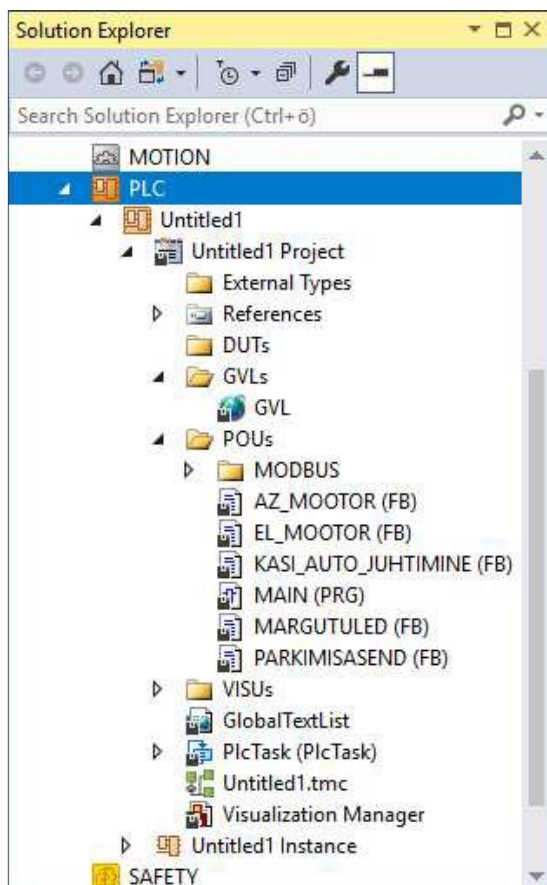
Programmeeritava loogikakontrolleri põhiprogrammi loomiseks tuleb süsteemijaotuses teha parem hiireklõps PLC peal, valida *Add New Item* ning seejärel *Standard PLC Project* (Joonis 27).



Joonis 27. TwinCAT 3 PLC põhiprogramm [25]

TwinCAT 3 on üles ehitatud üsna kasutajasõbralikult, kuna võimaldab erinevad juhtimisprogrammi protsessid jagada alamprotsessideks (POU'deks). See on taaskord üks hea moodus muuta programmi paremini loetavaks ja muudetavaks.

Tekitades uue programmi, loob TwinCAT vajalikud kaustad ning failid (Joonis 28). Standardprojektis on alati olemas GVL ehk globaalne muutujate nimekiri. Antud nimekirja on kantud kõik programmis kasutatavad globaalsed muutujad, mille kasutaja on defineerinud. Alamfunktsiooniplokid on väga tähtsad osad juhtprogrammist, kuna need sisaldavad kogu programmi koodi.



Joonis 28. TwinCAT 3 kontrolleri programmi alammenüü [26]

Programmikoodi loomisel on esmatähtsal kohal muutujad. Muutujad tuleb määrata programmeerijal ning parema loetavuse ning koodi mõistmise jaoks tuleks seda teha võimalikult selgelt. Muutujaid on võimalik defineerida kas globaalsesse muutujate nimekirja või alamfunktsiooni koodiplokkidesse. Viimase puhul on tähtis muutujate defineerimine osa päises. Vähemtähtsad ei ole ka kommentaarid, mida saab lisada igale reale. Kommentaaride lisamiseks kasutatakse TwinCAT 3's sümboloid //, kuid see võib programmi erineda (näiteks Matlabis %). Tarkvarapakett on üles ehitatud selliselt, mis ei arvesta sümbolite järgset real asuvat teksti.

Ülalnimetatud standard IEC 61131-3 sätestab lisaks programmeerimiskeeltele ka üldised andmetüübid, mida antud programmeerimiskeeled kasutavad (Tabel 8).

Tabel 8. IEC 61131-3 üldiste andmetüüpide nimekiri [27]

Märksõna kirjutamisel	koodi	Kirjeldus	Väärtusvahemik
BOOL		Boolean value	0 või 1
SINT		Short integer	-128 kuni +127

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

Kuna kõnealuse katsestendi ning TTU100 programmiga töötab aastate jooksul palju erinevaid tudengeid, on tähtis juhtsüsteemi programmi arusaadavus. Selle tõttu on väga mõistlik kasutada koodi loomiseks programmeerimiskeelt *Structured Text* (ST). Tegemist on tekstipõhise programmeerimiskeelega, mis sarnaneb C või PASCAL programmeerimiskeeltele.

Programmi loomine algab alati reaga *PROGRAM* ning lõpeb reaga *END PROGRAM*. Kuna tegemist on tsükilise protsessiga, siis peale programmi lõppu algab see otsast peale. Hea on teada, et antud programmeerimiskeelel tühikud ei oma eraldiseisvat funktsiooni (tähtsust), trüki-ja kirjatähti ei eristata ning iga määratlus eristatakse semikooloniga. [28]

Struktuurtekstis kasutusel olevaid operaatoreid võib liigitada nelja gruppi.

- Aritmeetilised operaatorid
- Suhtelised operaatorid
- Loogika operaatorid
- Bitipõhised operaatorid

Aritmeetilised operaatorid on teatud ka kui matemaatilised operaatorid, kuna sisaldavad tehteid nagu liitmine, lahutamine, korrutamine, jagamine, eksponent, moodul jne.

Suhtelised operaatorid on kasutusel kahe väärtuse võrdlemiseks. Tulemiks on *BOOL* tüüpi väärtus, ehk kas tõene või väär. Näiteks suurem kui, väiksem kui, suurem võrdne, väiksem võrdne, võrdne, ei ole võrdne.

Loogika operaatorid tuginevad *BOOL* tüüpi väärtustele ning moodustavad väärtustest loogikajada. Kasutusel on operaatorid nagu *AND*, *OR*, *XOR*, *NOT*. Nende operaatorite kaudu on võimalik luua ka *NAND*, *NOR* jne operaatoreid, mis on sisuliselt komplektpõhioperaatoritest.

Bitipõhised operaatorid on sarnased loogikaoperaatoritele, kuid tegevusi teostatakse bitipõhiselt. [28]

Koodi kirjutamisel on mõistlik kirjutada erinevate koodide alamplokid eraldi ning siduda need üheks tervikuks peaprogrammis *MAIN*.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö teema oli pakutud lõputöö juhendaja Anton Rassõlkini poolt, kes on Tallinna Tehnikaülikooli Inseneriteaduskonna Elektrienergeetika ja Mehhatroonikainstituudi abiprofessor tenuuris. Lõputöö kaasjuhendaja oli Toomas Vaimann. Töö autor valis antud lõputöö teema peaaesjalikult soovist olla abiks parema juhtimissüsteemi loomiseks Mektory õppehoone katusel oleva parabolantenni jaoks, mis on mõeldud suhtlema satelliitidega Koit ja Hämarik. Täiendavalt valis töö autor teema seetõttu, et soovis lisaks teoreetilisele osale kinnistada praktilisi oskuseid.

Elektrimootorite juhtimine on tööstustes ja mujalgi enam ja enam kasutusel. Võimalikke kasutusvaldkondi on erinevaid. Erinevate valdkondade ning ülesannete tõttu peab nende juhtimine olema samuti erinev. Tähelepanuväärne on täpsuse vajadus – kui mõningatel otstarvetel on juhtimise täpsus väheoluline (näiteks lõikesae käitamine), siis on palju otstarbeid, kus suur täpsus on väga tähtis. Lisaks on mõistlik luua katsestendid objektidele, mis on füüsiliselt liiga suured, et neid oleks võimalik kohapeal katsetada. Üheks selliseks on elektrimootori juhtimine antenni asendi sätestamiseks ning kaugjuhtimise teel asendi muutmine. Kõnealuse lõputöö raames käsitletava katsestendi antenni täpsus peab olema alla ühekraadise kõrvalekalde, mistõttu on vaja väga täpset juhtimissüsteemi.

Lõputöö käigus analüüsiti ja tutvustati olemasolevat antenni, tema otstarvet ja juhtimissüsteemi. Samuti kirjeldati erinevaid juhtimissüsteemi komponente, mille abil juhtimist reguleeritakse. Teostati uue juhtimissüsteemi ühenduste planeerimine katsestendi jaoks ning kaardistati kasutuseloleva sagedusmuunduri sisendid ja väljundid. Kirjeldati katsestendi seadistamist nii käsi- kui automaatjuhtimise jaoks ning automaatjuhtimissüsteemi loomisprotsessi.

Magistritöö raames valmis juhtimissüsteemi katsestend Tallinna Tehnikaülikooli Mektory õppehoone katusel oleva parabolantenni tarbeks. Valminud katsestendi valmimist kirjeldati alates olemasoleva süsteemi ning seadmestiku kirjeldamisest ja analüüsist kuni lõppseadistusteni. Katsestendi eesmärk on luua katsetusplatvorm automaatjuhtimise loomise jaoks, mis sisaldab samu komponente pärisseadmega. Pärisseadme suuruse ja kaalu tõttu ei ole otstarbekas juhtimist luua otse seadmel, vaid põhiprotsessid panna miniatuursemal skaalal paika.

Töö autor hindab lõputöö tulemust positiivseks, kuna katsestendi loomine annab programmeerijatele võimaluse katsetada erinevaid lahendusi enne parabolantennile implementeerimist, sealjuures määrates ära liikumiskiirangud ning juhtimisalgoritmid. Katsestend võimaldab läbi mängida erinevaid olukordi, mis võivad olla päris antennil katsetamiseks liiga

ohtlikud või seadmeid rikkuvad. Selliselt tagatakse lõppseadmel turvalise juhtimisprogrammi kasutamist.

SUMMARY

This Master's thesis topic was offered by the supervisor Anton Rassõlkin, who is a Tenured Assistant Professor in Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics, School of Engineering, Tallinn University of Technology. Co-supervisor was Toomas Vaimann. The topic was chosen by the author mainly due to the wish to be of assistance in creating a better control system for the parabolic antenna on top of the Mektory study building. The antenna is used to communicate with Taltech satellites „Koit“ and „Hämarik“. In addition to the above reason of topic selection, the author wished to include a more practical approach to the merely theoretical approaches.

The control of electric motors is used more and more in industries and other fields. There are unlimited number of uses. Due to different purposes and tasks the control systems need to be able to provide that output. The precision alteration is remarkable – in some cases, the precision is not important (i.e. control system for circular saw), then in many purposes it is essential to have an extremely precise control system. Additionally, it is reasonable to create test benches for devices and objects, that are physically too large to be tested on site. One of such solutions is controlling the asynchronous motor to set and change the parabolic antenna's position remotely. In this thesis the test bench needs to have a precision of less than one degree, which demands a very precise control system.

As parts of the thesis, the existing antenna, its purpose and control system was introduced and analysed. Also, the components of the control system were described. Wiring and connection diagrams for the test bench were developed. Inputs and outputs of the used frequency inverter were mapped. Setup of the test bench's manual and automatic control were described in addition to describing the automatic control system creation process.

The author evaluates the outcome of the Master's thesis to be positive. This test bench gives the programmers a possibility to test different solutions and codes before implementing them on the actual system. They are able to develop control algorithms and movement limits beforehand and debug possible errors which may be dangerous or destructive when such situations occur with the actual system.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] A. Rassõlkin, T. Vaimann, P. Org, A. Leibak, R. Gordon, E. Priidel, „ADCS development for student CubeSat sattellites – TalTech case study, “ Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 2021.
- [2] D. Kurasjov, „TalTech tudengisatelliidi maajaama paraboolantenni elektrivarustuse projektdokumentatsioon,“ Tallinn, 2020.
- [3] [Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://satellite.ttu.ee/satelliidiprogramm/index.html#/earth-station> [Kasutatud 08.12.2021]
- [4] [Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://satellite.ttu.ee/satelliidiprogramm/index.html#/satellite> [Kasutatud 08.12.2021]
- [5] M. Pajusalu, E. Ilbis, J. Kalde, H. Lillmaa, R. Reinumägi, R. Rantsus, M. Pelakauskas, A. Leitu, V. Allik, M. Noorma, S. Lätt, J. Envall, „Electrical power system for ESTCube-1: a fault-tolerant COTS solution,“ *63rd International Astronautical Congress*, 2012.
- [6] R. Vink, „Juhtimissüsteem Taltech-i satelliidi maajaama Ku riba antennile,“ Tallinn, 2019.
- [7] R. Lahtmets, *Elektrotehnika alused*, Tallinn, 2001.
- [8] [Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://mall.industry.siemens.com/mall/en/us/Catalog/Search?searchTerm=1LE10010DC322&tab=Product> [Kasutatud 08.12.2021]
- [9] [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://industrial.omron.eu/en/products/3G3MX2-A4004-E> [Kasutatud 08.12.2021]
- [10] [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://www.electricportal.info/2020/10/what-vfd-working-variable.html> [Kasutatud 08.12.2021]
- [11] [Võrgumaterjal] Saadaval: https://www.tthk.ee/MEH/Taiturid_6.html [Kasutatud 08.12.2021]
- [12] [Võrgumaterjal] Saadaval:
<http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/AAV0040/ASM/ASM6/ASM6.html> [Kasutatud 08.12.2021]
- [13] [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://www.machinedesign.com/automation-iiot/sensors/article/21831757/basics-of-rotary-encoders-overview-and-new-technologies> [Kasutatud 08.12.2021]
- [14] [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://app.diagrams.net/> [Kasutatud 08.12.2021]
- [15] [Võrgumaterjal] Saadaval:
https://assets.omron.eu/downloads/manual/en/v3/i570_mx2_users_manual_en.pdf [Kasutatud 08.12.2021]
- [16] [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://www.unitronicsplc.com/what-is-plc-programmable-logic-controller/> [Kasutatud 15.12.2021]
- [17] [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://www.beckhoff.com/et-ee/products/ipc/embedded-pcs/cx8100-arm-cortex-a9/cx8190.html> [Kasutatud 15.12.2021]
- [18] [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://www.beckhoff.com/et-ee/products/i-o/ethernet-terminals/el6xxx-communication/el6224.html> [Kasutatud 15.12.2021]

- [19] [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://www.beckhoff.com/et-ee/products/i-o/ethercat-terminals/el1xxx-digital-input/el1809.html> [Kasutatud 15.12.2021]
- [20] [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://www.beckhoff.com/et-ee/products/i-o/ethercat-terminals/el2xxx-digital-output/el2008.html> [Kasutatud 15.12.2021]
- [21] [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://www.beckhoff.com/et-ee/products/i-o/ethercat-terminals/el6xxx-communication/el6021.html> [Kasutatud 15.12.2021]
- [22] T. M. Antonsen, PLC Controls with Structured Text (ST), V3, Books on Demand GmbH, 2020.
- [23] [Võrgumaterjal] Saadaval: <http://www.contactandcoil.com/twincat-3-tutorial/quick-start/> [Kasutatud 18.12.2021]
- [24] [Võrgumaterjal] Saadaval:
https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tcquickstart/html/tcquickstart_iec.htm&id=4938746006154330919 [Kasutatud 18.12.2021]
- [25] [Võrgumaterjal] Saadaval:
=https://download.beckhoff.com/download/document/ipc/embedded-pc/embedded-pc-cx/cx8190_en.pdf [Kasutatud 18.12.2021]
- [26] A. Raag, „Paraboolantenni juhtimine läbi programmeeritava loogikakontrolleri,“ Tallinn, 2021.
- [27] [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://www.fernhillsoftware.com/help/iec-61131/common-elements/datatypes-elementary.html> [Kasutatud 19.12.2021]
- [28] [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://www.plcacademy.com/structured-text-tutorial/> [Kasutatud 19.12.2021]
- [29] [Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=ControlPID> [Kasutatud 19.12.2021]

LISAD

Satelliidiantenni juhtsüsteemi katsestendi kasutusjuhend – Kasutusjuhend.pdf