



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

EE40LT

AUTOMAATNE SATELLIITSIDEANTENNI PANEELI
HÄÄLESTUSSÜSTEEM FOTOGRAMM-MEETRIA
MÕÕTERAAMILE

BAKALAUREUSETÖÖ

MEHHATROONIKA ÕPPEKAVA

Üliõpilane: Mikk Vachtmeister

Üliõpilaskood: 142920MAHB

Juhendaja: Heigo Mõlder

Tallinn 2017

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Lõputöös kasutatud kõik teiste autorite tööd ja seisukohad ning materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Heigo Mõlderil juhendamisel

“.....” 201.....

Töö autor:

/ allkiri /

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele

“.....” 201.... a.

Juhendaja:

/ allkiri /

Lubatud kaitsmisele

“.....”201... a.

..... õppekava lõputööde kaitsmiskomisjoni esimees:

/ allkiri /

TTÜ inseneriteaduskond

BSc LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

2017. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Mikk Vachtmeister, 142920MAHB

Õppekava: Mehhatroonika, MAHB02/13

Eriala: Mehhatroonika

Juhendaja: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi teadur, Heigo Mölder

Konsultant: Nooremteadur, Marek Jarkovoi

LÕPUTÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) Automaatne satelliitsideantenni paneeli häälestussüsteem fotogrammeetria mõõteraamile

(inglise keeles) Automatic communication satellite antenna panel adjusting system for photogrammetry measuring frame

Töös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Ülesande püstitus, nõuded ja kirjeldus, olemasolevate lahenduste analüüs.	13.03.17
2.	Kinnituslahenduste analüüs	20.03.17
3.	Ajam, ajamikinnitus, juhtimine	17.04.17
4.	Häälestusseadme 3D mudel	24.04.17
5.	Majanduslik analüüs, tuleviku arendustegevused, vormistamine	08.05.17

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:

Paraboolantenni reflektori paneelide mõõtmisprotsessi ajalise määramatuse vähendamine, mehaanilise reguleerimissüsteemi asendamine automaatse lahendusega.

Töö keel: Eesti keel

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt: 15.05.2017 **Töö esitamise tähtaeg:** 25.05.2017

Üliõpilane: Mikk Vachtmeister /allkiri/..... kuupäev:.....

Juhendaja: Heigo Mölder /allkiri/..... kuupäev:.....

SISUKORD

EESSÕNA	6
SISSEJUHATUS	7
1. ÜLESANDE PÜSTITUS JA MÕÕTMISPROTSESSI KIRJELDUS	9
1.1. Mõõteprotseduuri kirjeldus	9
1.1.1. Reflektorpaneelid.....	10
1.1.2. Mõõteraam.....	12
1.1.3. Fotogramm-meetria seadmed	13
1.1.4. Paneeli häälestamine mõõteraamil	16
1.2. Lõputöö eesmärk.....	20
1.3. Nõuded häälestussüsteemile	21
2. OLEMASOLEVATE LAHENDUSTE ANALÜÜS.....	23
2.1. Paraboolantennide häälestamine.....	23
2.2. Mikropositsioneerimine	25
3. KINNITUSLAHENDUSTE ANALÜÜS.....	27
3.1. Avata kinnitusviisid	28
3.2. Läbi ava kinnituvad lahendused.....	29
3.2.1. Automaatsed lahendused	29
3.2.2. Mehaanilised lahendused.....	31
3.3. Kinnitusvahendi lahendus	32
4. AJAM HÄÄLESTUSEADMELE	37
4.1. Paneeli deformeerimiseks vajalik jõud	37
4.2. Lineaarsete ajamite tüübid	38
4.3. Ajami valik	40
5. HÄÄLESTUSSÜSTEEMI JUHTIMINE	42
5.1. Ajami juhtimise algoritm	43
5.2. Juhtseadmete ja info edastamisviiside analüüs ja valik	45

5.2.1. Andmete edastamine.....	45
5.2.2. Mootori kontrollid ja draiver	47
5.3. Riistvara ühendamine	47
6. AUTOMAATSE HÄÄLESTUSSEADME 3D MUDEL.....	49
6.1. Ajami ja klambri integreerimine.....	49
7. PROJEKTI MAKSUMUS JA TASUVUSANALÜÜS.....	51
8. TULEVIKU ARENDUSTE GEVUSED	54
8.1. Prototüübi ehitamine.....	54
8.2. Kompaktsema juhtimissüsteemi disain ja tervikliku tarkvara loomine	54
8.3. Juhtmevaba süsteemi arendamine.....	55
KOKKUVÕTE	56
SUMMARY	58
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	60
LISA1 HÄÄLESTUSSEADME KOOSTEJOONIS.....	62

EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema tuleneb Eesti masinaehitusettevõtte Vertex Estonia AS vajadusest muuta efektiivsemaks satelliitsideantennide paneelide mõõtmist fotogramm-meetria süsteemiga. Lõputöö autor töötas ettevõttes projektjuhina vahemikus 18.01.2016 - 10.03.2017, puutudes korduvalt kokku fotogramm-meetria mõõtesüsteemiga ja paneelide mõõtmisega. Lõputöö on valminud teadur Heigo Mõlderil ja nooremteadur Marek Jarkovoi juhendamisel. Algandmetega aitas Vertex Estonia personal.

SISSEJUHATUS

Vertex Estonia AS on Tallinnas asuv Eesti masinatööstusettevõtte, mis toodab suuri paraboolantenne ja teraskonstruktsioone mitmetele rahvusvahelistele turgudele. Peamiseks tegevussuunaks on satelliitside maajaamade antennide ning kosmoseuurimise maapealsete raadioteleskoopide valmistamine.

Antennide valmistamise juures on kõige kõrgemad nõuded seatud reflektorpaneelidele, kuna antenni muud osad alluvad suurel määral klassikalistele masinaehitus printsiipidele. Antenni paneelidele on klientide poolt seatud kõrged täpsuse nõuded, paneelide pinna hälve, mida ettevõttes valmistatakse, jääb alla 0,08 mm-i. Selleks, et sellist kõrget täpsust tagada ja kontrollida, on ettevõttes paneelide mõõtmiseks kasutusel fotogramm-meetria mõõtesüsteem.

Ettevõttes on paneelide mõõtmise juures suurimaks probleemiks paneelide häälestamine mõõteraamil, kui teised protseduurid mõõtmisel on kindlad ja toimuvad 99% juhtudest 1 korra, siis paneeli häälestamist võib operaator läbi viia kuni 12 korda. Seega on häälestamise automatiseerimine hädavajalik, et paneelide mõõtmisaega lühendada.

Lõputöö on jaotatud kaheksasse peatükki. Esimeses peatükis kirjeldatakse hetkel kasutuses olevat süsteemi ja tuuakse välja selle kitsaskohad. Esitatakse lahenduse ideeline kontseptsioon ning kirjeldatakse süsteemile esitatavad nõuded. Teises osas tutvutakse olemasolevate ja teemaga haakuvate lahendustega. Kolmandas peatükis analüüsitakse erinevaid võimalusi, kuidas kinnitada paneel mõõteraamile. Neljandas peatükis valitakse aplikaatsiooni sobiv ajam. Analüüsitakse erinevate energialiikidega ajamite plusse ja miinuseid ning teostatakse *FEM* arvutused määramaks paneelide mõõteraamil deformeerimiseks vajalikku jõudu. Viiendas peatükis valitakse sobivad komponendid teostamiseks häälestussüsteemi juhtimist. Kirjeldatakse, kuidas toimib süsteemi juhtimine ning esitatakse häälestusseadme juhtalgoritm ja komponentide plokk skeem. Kuuendas peatükis esitatakse lõplik lahendus automaatselt häälestusseadmest. Projekteeritakse lõpuni sõlmed, mis seovad omavahel tervikuks klambri ja ajami ning põhjendatakse tehtuid valikuid. Sellele järgneb projekti majanduslik analüüs, kus tuuakse välja projekti

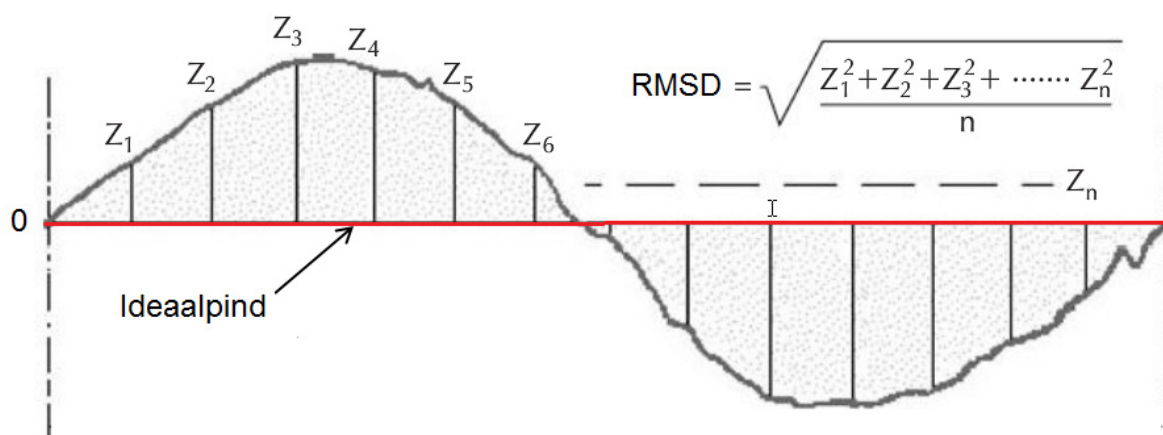
maksumus ja võimalik tasuvusaeg. Lõputöö viimane osa annab lühiülevaate võimalikest arengusuundadest ja tegevustest, millega on vaja edaspidi tegeleda.

1. ÜLESANDE PÜSTITUS JA MÕÕTMISPROTSESSI KIRJELDUS

1.1. Mõõteprotseduuri kirjeldus

Satelliitside antennide reflektorpaneelide pinnahälvete mõõtmiseks kasutatakse ettevõttes Vertex Estonia AS (edaspidi Vertex) fotogramm-meetria tehnoloogiat. Mõõtmine teostatakse Vertexi paneelide mõõtmise laboris. Paneelide mõõtmisel on kaks põhilist mõõtmisprotseduuri: nullpunktide joondus ja RMSD¹ väärtuse mõõtmine. Käesolev lõputöö keskendub eelkõige paneelide nullpunktide joondusele, kuid antakse lühiülevaade ka mõõtetulemuse saamiseks kasutatavatest fotogramm-meetria seadmetest.

Root mean square value deviation (RMSD) – ruutkeskmise hälve on mõõtetehnikas kasutusel selleks, et mõõta erinevusi mingi etteantud (ideaalse) suuruse ja tegelikkuses saadud tulemuse vahel. [1] Seel 1.1 on kirjeldatud, kuidas leitakse RMSD väärtus.



Sele 1.1 RMSD väärtuse leidmine (Z_1, Z_2, \dots, Z_n on pinna hälbed ideaalsest pinnast)

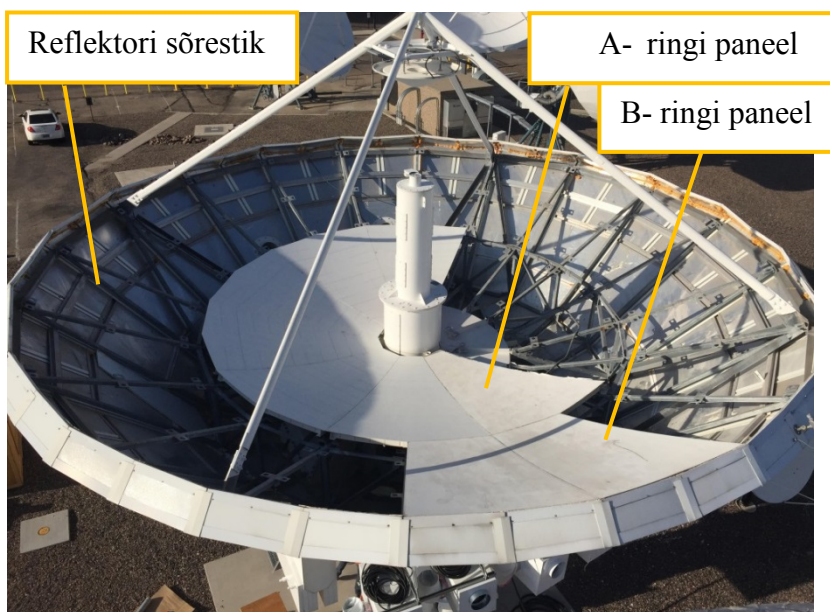
¹ Ettevõttes ja peamiselt USA kirjanduses on levinud nimetus ka lihtsalt RMS, mis terminoloogiliselt ei ole õige. RMSD e ruutkeskhälve kirjeldab erinevusi etteantud suurusest e hälbed, samas kui RMS e ruutkeskväärtus näitab lihtsalt mõne suuruse ulatust.

1.1.1. Reflektorpaneelid

Mõõteobjektideks on satelliitsideantennide reflektori paneelid (Sele 1.2). Peamiselt valmistatakse ettevõttes kahe erineva reflektori läbimõõduga antenn: 9 m ja 13 m. 9-meetrise antenni reflektor koosneb kahest reast paneelidest (Sele 1.3) ja 13-meetrise antenni reflektor koosneb kolmest reast paneelidest, seega põhiliselt mõõdetakse viite erinevat paneeli.



Sele 1.2 13-meetrise reflektori diameetriga parabool antenn



Sele 1.3 9-meetrise antenni reflektori montaaž

Paneele valmistatakse alumiiniumlehtedest, alumiiniumist Z-profiilidest (Z81,5x50,8x5) ja alumiiniumribadest (Sele 1.4). Kasutatakse 1,6 mm paksust alumiiniumlehte. Paneeli pinnalehed asetatakse paneelivormi ning rakendatakse vormi silindrid (Sele 1.5). Järgmiseks antakse Z-profiilidele eelpaine. Edasi laotakse ribad ja Z-profiilid koos valmistatud pahtliga vormi, kus pahtel kuivab u 30 minutit. Seejärel puuritakse läbi vormi avad ja needitakse Z-profiilid, ribad ja lehed kokku. Kui kõik võimalikud needid on vormis pandud, võetakse paneel vormist välja. Paneeli töötlus jätkub väljaspool vormi töölaual. Paneeli järeltöötlus hõlmab endas kõrgemate needipeade maha viilimist ja paneeli pinna puhastamist taldlihvijaga. Peale paneelipinna matistamist taldlihvijaga on paneel mõõtmiseks valmis.



Sele 1.4 Paneeli valmistamiseks vajalikud materjalid: Al-lehed, Al Z-profiilid, Al-ribad



Sele 1.5 Paneelide valmistamise vorm ning alumiiniumlehtede vormi ladumine

Tabelis 1.1 on esitatud 5 erineva mõõdetava paneeli andmed.

Tabel 1.1 Mõõdetavate paneelide andmed

Antenni reflektori läbimõõt, m	Ring A, B, C	Gabariidid AxB, mm	Nullpunktide arv, tk	Mass, kg
9	A	2215x1694	7	30
9	B	1870x1436	6	30
13	A	1855x1390	5	27
13	B	2524x1356	6	45
13	C	1461x1741	4	62

1.1.2. Mõõteraam

Peale paneelide valmistamist on järgmiseks etapiks paneelide mõõtmine. Esimene tööetapp, et saaks asuda mõõtma, on paneel asetada ja kinnitada mõõteraamile (Sele 1.6). Paneeli mõõteraamile kinnitamiseks kasutatakse klambreid (Sele 1.7), mis paneeli mõõteraami küljes kinni hoiavad ja reguleerimisvardaid, mis asetatakse vastu paneeli nullpunkte. Paneeli nullpunktideks nimetatakse neid punkte, mis asuvad kohas, kuhu puuritakse avad ning läbi mille kinnitatakse paneel reflektorisõrestiku külge. Nullpunktidega häälestatakse antenni montaažil välja terve reflektor.

Nullpunkti avad on ainsad, mis jäetakse paneeli valmistamisel puurimata, kuna mõõtmisel kasutatavat reguleerimisvarrast ei saa kasutada läbi ava. Seega peale paneeli mõõtmist läheb see uuesti tootmisalasse, kus puuritakse nullpunktidesse avad. Käesoleva lõputöö üks eesmärkidest on võimalusel lahendada häälestussüsteem nõnda, et avad saaks koos teiste operatsioonidega enne mõõtmist puurida.



Sele 1.6 Mõõteraam



Sele 1.7 Klambrid, millega kinnitatakse paneel mõõteraami külge

Paneeli mõõteraamile paigutamine on hetkel kasutuses oleva süsteemi üks miinustest, kuna reguleerimisvardad peavad asuma täpselt paneeli nullpunktide taga, siis võtab raske paneeli paika saamine aega, sest ava ette ei puurita, vaid tehakse kärniga märke, kus nullpunkt asub.

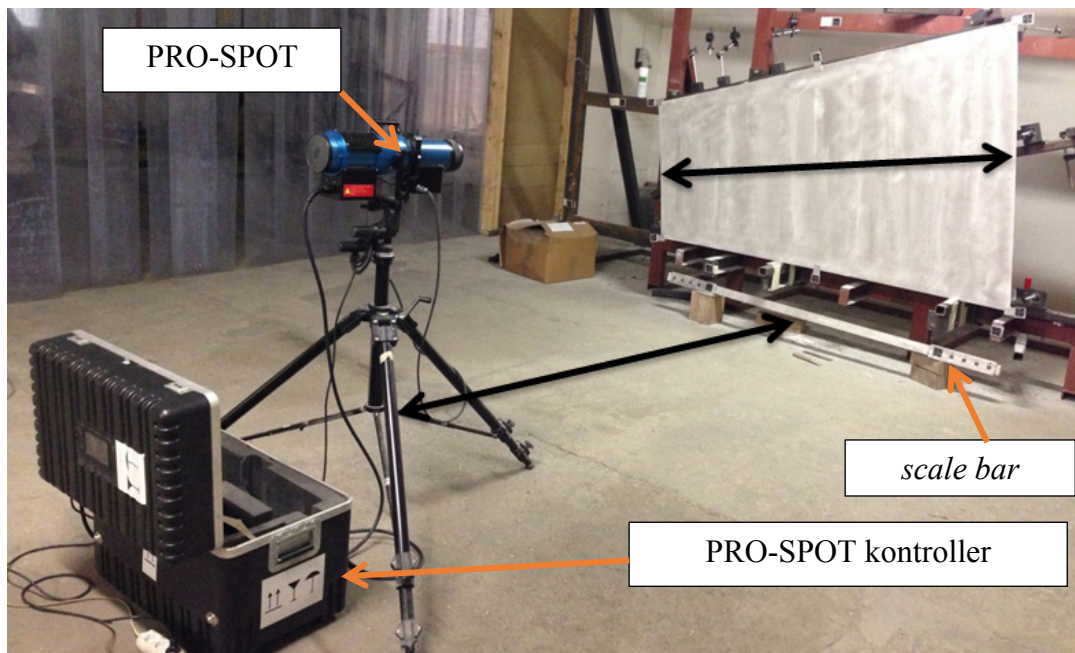
1.1.3. Fotogramm-meetria seadmed

Paneeli RMSD väärtuse saamiseks kasutatakse fotogramm-meetria seadmeid. Ettevõttes kasutatavad seadmed on pärit ettevõttest *Geodetic Systems Inc*, kes pakub fotogramm-meetria lahendusi väga paljudele tööstusharudele (autotööstus, kosmosetööstus, sõjatööstus, laevaehitus, antennide tootmine jne) [1]. Ettevõttes mõõtmisel kasutatavad fotogramm-meetria seadmed ja abivahendid:

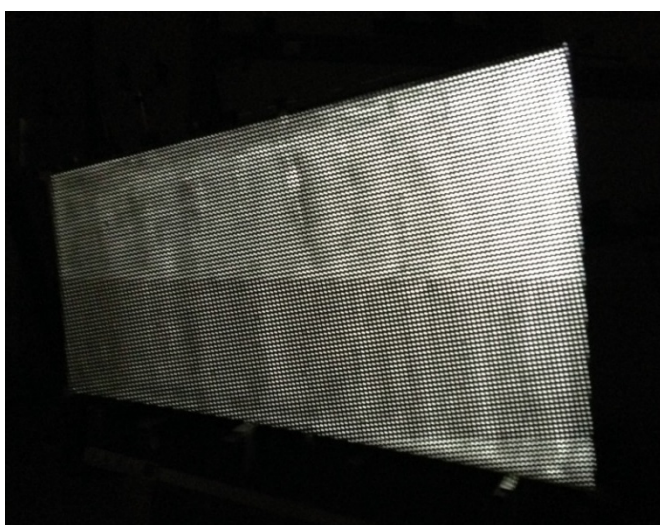
- PRO-SPOT

- PRO-SPOT kontrollerr
- INCA 3 fotogramm-meetria kaamera
- V-Stars programm
- *Targetid*, mastaabirida (*scale-bar*)

PRO-SPOT paigutatakse paneeli hoidva mōõteraami ette keskele, kaugus paneelist on võrdne paneeli pikkusega (Sele 1.8). PRO-SPOT projekteerib paneelile peegelduva punktipilve, mida kaameraga pildistatakse (Sele 1.9).



Sele 1.8 PRO-SPOT'i paigutus



Sele 1.9 Paneelile PRO-SPOT'iga projekteeritud punktid

PRO-SPOT'i ja kontrolleri kasutatakse paneeli RMSD mõõtmiseks, kuna käesoleva lõputöö eesmärgiks on analüüsida paneelide häälestamist mõõteraamis, mis valmistab paneelid mõõtetulemuse saamiseks ette, siis põhjalikumalt punkt pilvele ja mõõtetulemuste saamisele ei keskenduta.

INCA 3 fotogramm-meetria kaamera (Sele 1.10) on kiire, kaasaskantav ja täpne kaamera, millega on võimalik pildistada ka vibreerivates tingimustes (Vertexis esimesed jooned pildistatakse käest). Kaameraga mõõtmiseks kasutatakse helendavaid *target*'eid (Vertexis nullpunktide joondamisel helendavaid kleebiseid). Kaamera täpsed andmed on koondatud tabelisse (Tabel 1.2).

Tabel 1.2 INCA 3 fotogramm-meetria kaamera andmed [2]

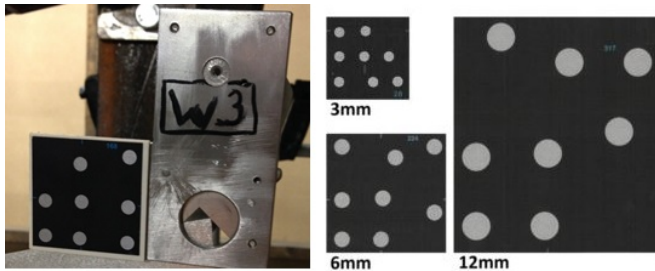
Pakkuja	Mudel	Sensori mõõtmed, mm	Pikslite arv	Pikslite suurus, µm	Sensori tüüp	Väljalaske aasta
<i>Geodetic Systems Inc</i> (GSI)	INCA 3	31,5 x 21	3500 x 2350	9 x 9	CCD	2004



Sele 1.10 INCA 3 fotogramm-meetria kaamera

Targetid on kasutusel paneeli mõõtmete saamiseks. *Feature target*'id paigutatakse paneeli nurkadesse ja pikematele külgedele (Sele 1.11). Kõik *target*'id on erineva koodiga (erineva

mustriga), mille järgi programm tunneb ära, millise paneeli nurgaga ja küljega on tegemist, nende järgi arvutab ja kontrollib programm paneeli gabariitmõõtmeid.



Sele 1.11 Kasutusel olev nurga *target* koos kinnitusega ja näited erinevatest mustritest

Mastaabirida (*scale bar*, Sele 1.8) on ettenähtud mõõtmise kalibreerimiseks. Selleks, et oleks võimalik teostada fotogramm-meetria mõõtmist on vajalik teada ühte tuntud pikkust, mille järgi programm kalibreerib ka teised mõõdetud suurused.

Paneeli nullpunktid tähistatakse 6 mm läbimõõduga peegelduvate kleebistega (Sele 1.12). Enne paneeli mõõtmist märgib operaator hariliku pliiaatsiga paneeli esipinnale nullpunktide asukohad ja kleebib märgitud kohtadele kleebised.



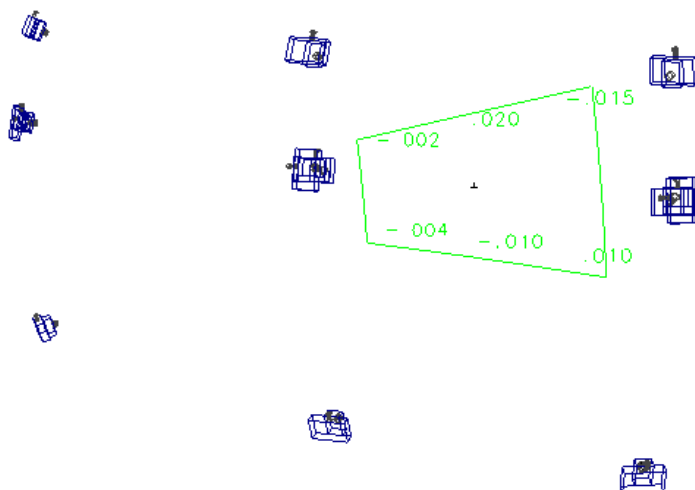
Sele 1.12 Peegeldavad kleebised paneeli nullpunktide tähistamiseks paneeli pinnal

1.1.4. Paneeli häälestamine mõõteraamil

Esimeseks mõõteoperatsiooniks on reflektorpaneeli nullpunktide joondus. Joondusel kasutatakse paneeli nurkasid mõõtepunktide ja teoreetilise mudeli kokkuviiimisel. Joondatud mudelilt leitakse mõõdetud nullpunktide ja teoreetilise pinna normaali sihiline suurus.

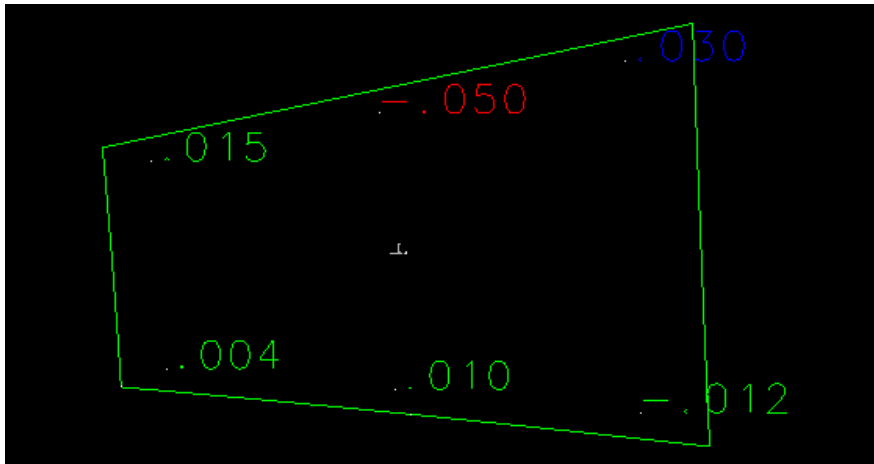
Etapid on järgnevad:

- 1) Nullpunktide paneeli esipinnale märkimine ja peegelduvate kleebiste kleepimine.
- 2) Paneeli klambritega fikseerimine ja reguleerimisvarraste nullpunktide vastu keeramine.
- 3) Operaator paigaldab *Feature target* id, mis on kasutusel paneeli mõõtmete saamiseks. Paneeli pildistamisel peavad nii mastaabirida (*scale bar*) kui ka *feature target* id pildile jääma.
- 4) Operaator pildistab paneeli 3 erinevalt positsioonilt ja erinevatelt kõrgustelt igas positsioonis: umbes põlvede kõrguselt, rinna kõrguselt ja käed üles tõstetult (Sele 1.13).



Sele 1.13 Pildistamise positsioonid

- 5) Operaator eemaldab kaamerast mälukaardi ja sisestab selle arvuti külge ühendatud kaardi lugejasse.
- 6) V-Stars programm arvutab tulemused, kui palju nullpunktid erinevad ideaalsest positsioonist. Joonisel on mõõdetud nullpunktide kaugus paneeli teoreetilisest pinnast (Sele 1.14). Miinusmärk väljendab mõõtepunkti paiknemist teoreetilise paneeli pinnast kõrgemal ja plussmärk punkti paiknemist paneeli pinna sees, seega on negatiivseid väärtusi on vaja tõsta ja positiivseid väärtusi langetada. Korrektseks tulemuseks, mis tuleb nullpunktide häälestamisega saavutada, on tulemus, kus kõik tulemused on vahemikus [-0,01:0,01].



Sele 1.14 Programmilt saadavad nullpunktide väärtuste erinevused mm-tes ideaalsest mudelist

- 7) Operaator kirjutab tulemused tahvlile ja läheb arvuti juurest mõõteraami taha paneeli häälestama, kasutades reguleerimisvardaid.

Hetkel kasutuses oleva reguleerimise puhul kasutatakse mehaanilisi reguleerimisvardaid (Sele 1.15), mida operaator reguleerib tunnetuse järgi. Süsteemi miinusteks on häälestamise ebatäpsus, sest puudub tagasiside ja korraga tuleb reguleerida kahte kruvi. Keerates reguleerimisvardast peale, peab operaator samal ajal ka klambrit järgi andma või vastupidisel juhul klambrit pingutama.



Sele 1.15 Kasutuses olev reguleerimisvarras

Vilunud operaator saab üldjuhul peale 2-3 katset paneeli nullpunktid häälestatud. Ettevõtte jaoks kerkib probleem, kui on vaja võtta tööle uus operaator, kellel ei ole välja kujunenud

tunnetust mehaaniliste kruvidega reguleerimises. Seega võib paneeli häälestamine (mõõtmise osa) väga kaua aega võtta. Ka kogunud operaatori puhul esineb olukordi, kus ühte paneeli häälestatakse kuni 12 korda. Peale igat paneeli häälestamist tuleb korrata punkte 4-6 ehk pildistada uuesti paneeli ja lasta arvutil kontrollida nullpunktide normaali suunalist asetsemise erinevust võrreldes ideaalse paneeli mudeliga.

Uue operaatori tööle võtmisel ja mõned aastad tagasi oli ettevõttes standardiks, et kasutati tagasiside jaoks indikaatorkellasid. Indikaatorkellade kasutamisel oli kolm peamist puudust. Esimeseks puuduseks oli see, et nende paigaldamine oli lisa ajakulu ja vilunud operaatorid eelistasid pigem sooritada lisapildistamisi indikaatorkellade ülesseadmisele. Teiseks oli ebamugav paneeli taga reguleerida ja siis joosta paneeli teisele poole ja vaadata tulemust, sellist tegevust võis ette tulla mitu korda, sest paneeli tagaküljelt ei näinud indikaator kella tulemust. Kolmas probleem oli see, et indikaatorkella täpsus oli 0,01 mm, mis on aga häälestamisel nõutud täpsuseks, ning seega kui paneeli nullpunkti tulemus oli 0,018 ehk seda oli vaja reguleerida vähemalt -0,008 ja kui indikaatorkell näitas -0,01, võis see samahästi tähendada ka, et reguleeritud oli -0,007 ehk tulemus polnud endiselt piisav.

Lõputöö jaoks sooritati mõõtmisprotsessi aja kaardistamine, mille käigus viibiti paneelide mõõtmisjaoskonnas ja märgiti üles, mitu korda mingit protseduuri tehti ja kui palju need aega võtsid. Ühele häälestamise protsessile (eelnevas loetelus tegevused 4-6) kulunud keskmiseks ajaks tuli 3 minutit, mis sisaldab endas nullpunktide reguleerimist häälestuskruvide abil, paneeli pildistamist ja uue tulemuse saamist. PRO-SPOT-iga tehtavale mõõtmisele kulus keskmiselt 12 minutit. Paneeli ülesseadmiseks, *targetite* kinnitamiseks ja paneeli eemaldamiseks kulus keskmiselt 4 minutit. Tabelisse on koondatud tulemused, kusjuures on kasutatud keskmisi protsessi aegu (Tabel 1.3). Esimeses tabeli reas on näha, et mõõdeti viis 9-meetrise antenni A ringi paneeli ja teises reas on nullpunktide häälestamiste arv. Tabel kinnitab eelpool öeldut, et paneeli häälestamise osakaal ja sellele kuluv aeg on väga varieeruv (kuni 12 korda). Nagu tabelist näha, on võimalik täpse reguleerimise korral võita kuni 33 minutit, mis moodustas kogu paneeli mõõtmise ajast 63 %. Automaatse lahendusega võidetav aeg (Tabel 1.3) on leitud eeldusel, et automaatse lahendusega toimub paneeli häälestamine üks kord.

Tabel 1.3 Mõõtmisoperatsioonidele kuluv aeg

Mõõdetud paneel	9 m A ring	9 m A ring	9 m A ring	9 m A ring	9 m A ring
Nullpunktide häälestamiste arv	4	7	1	12	3
Häälestamisele kulunud aeg, min	12	21	3	36	9
PRO-SPOTiga mõõtmise aeg, min	12	12	12	12	12
Muude tegevuste aeg, min	4	4	4	4	4
Mõõtmise aeg kokku, min	28	37	19	52	25
Häälestamise osakaal ajast, %	43	57	16	69	36
Automaatse lahenduse korral teoreetiline aja võit, min	9	18	0	33	6
Paneeli mõõtmisaja vähenemine, %	32	49	0	63	24

1.2. Lõputöö eesmärk

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on projekteerida uus häälestussüsteem antenni reflektorpaneelide mõõteraamile. Eesmärgiks on automatiseerida paneeli häälestamine mõõteraamil ja vähendada sellega mõõtmisoperatsioonile kuluvat aega. Lõputöö käigus valitakse välja sobivad komponendid ning projekteeritakse kõik kinnitused ja vajalikud elemendid. Arvutatakse välja projektimaksumus ja tehakse tasuvusanalüüs.

Lõputöö tulemused:

- Projekti maksumus ja tasuvusanalüüs;
- 3D mudel uuest häälestussüsteemist;
- Automaatse häälestussüsteemi juhtimise algoritm;
- Koostu ja detaili joonised projekteeritud lahendusest.

Kontseptsioon (Sele 1.16):

Automaatsed häälestuskruvid on ühendatud kontrolloriga, mis saab sisendi V-STARS programmilt, mis annab nullpunktide normaalisuunalise erinevuse ideaalsest mudelist. Vastavalt sisendile automaatsed häälestuskruvid, mis koosnevad lineaarsest ajamist ja klambrist, häälestavad paneeli nullpunkte. Häälestuskruvisid on võimalik vastavalt viiele mõõdetavale paneeli tüübile mõõteraamil kiirelt ringi paigutada.



Sele 1.16 Automaatse häälestuskruvi põhiosad: klamber, ajam ja kontrollor

1.3. Nõuded häälestussüsteemile

Uuele häälestussüsteemile on tulenevalt mõõteraamist, mõõtmisprotseduurist ja mõõtmisel nõutud täpsusest mitmeid nõudeid, millega tuleb uue häälestussüsteemi loomisel arvestada.

- 1) Täpsus – mõõtmisprogramm annab tulemused mikromeetri täpsusega. Lubatud maksimaalne hälve paneeli nullpunktile on 0,01 mm (paneeli RMSD 0,102 mm)
- 2) Mõõtmised – tuleb arvestada kasutusesoleva mõõteraami mõõtmega. Eesmärk on, et automaatne reguleerimiskruvi, mis mõõteraamile kinnitub, oleks võimalikult kompaktne ja kinnitus universaalne. Kinnitamise universaalsus ja kompaktsus on olulised seetõttu, kui ettevõtte plaanib paneele hakata mõõtma horisontaalses asendis, siis häälestussüsteem peab olema rakendatav ka uuele mõõteraamile.

- 3) Kasutusmugavus – oluline on, et operaatoril oleks süsteemi mugav kasutada. Eesmärk on, et puuduksid lisategevused häälestamisel. Operaator tõstab paneeli mõõteraamile ja pildistab. Paneeli häälestamine toimub automaatselt mõõteprogrammist saadava info alusel.
- 4) Hind – kindlasti on süsteemi puhul oluline hind, mida soodsam lahendus, seda kiiremini see ennast ettevõttes ära tasub.
- 5) Töökindlus ja kvaliteet – süsteem peab olema töökindel, ei ole lubatud olukord, kus süsteem läheb rivist välja pikaks ajaks, sest see tekitaks ettevõttele suurt kahju. Seetõttu peavad valitud komponendid olema kvaliteetsed ja usaldusväärsed.

2. OLEMASOLEVATE LAHENDUSTE ANALÜÜS

2.1. Paraboolantennide häälestamine

Suurte paraboolantennide paneelide mõõtmise protsess on küllaltki spetsiifiline ala, seega on raske leida olemasolevaid lahendusi. Tuntud paneelide tootjaid on Euroopas peale Vertexi veel üks Itaalia firma COSPAL, kelle kodulehelt on näha, et nad kasutavad mõõtmiseks fotogramm-meetriat, kuid kuidas käib täpselt paneeli häälestamine mõõteraamil, seda avaldatud ei ole. USA-s *General Dynamics* toodab paneele enda allüksuses, kuid ka seal on teada tõsiasi, et mõõdetakse fotogramm-meetriga, kuid kuidas täpsemalt, sellekohane informatsioon puudub.

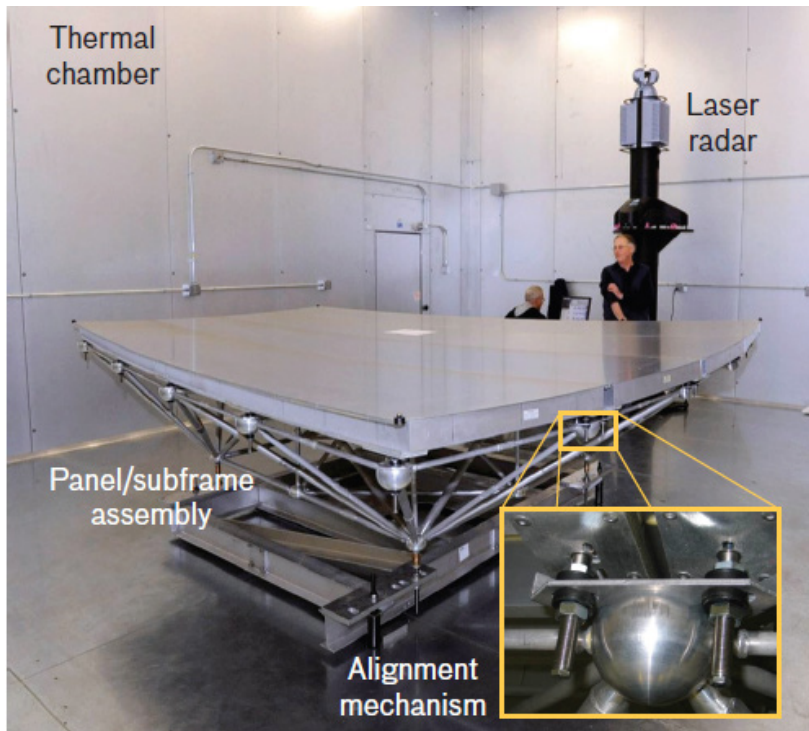
Mehaanilist häälestust, mis on praegusel hetkel Vertexis kasutusel, kasutatakse kogu reflektori väljahäälestamisel lõppmontaažis. Seal kleebitakse samuti nullpunktide peale helendavad kleebised, pildistatakse kogu reflektorit, analüüsitakse tulemust V-STARS-iga ning antakse montaažimeestele korraldus, milliseid paneele tuleb tikkpoldiga reguleerida (paneelid kinnituvad antennisõrestiku külge tikkpoldidega, millest on võimalik paneele häälestada). Peale reguleerimist korratakse tegevust ning kui kõik nullpunktid on paigas, siis mõõtmist enam ei teostata, sest kui nullpunktid on vastavalt fikseeritud, siis kehtib iga paneeli puhul eraldi varem saadud RMSD tulemus.

Üks leiduvatest lahenduse kirjeldustest on 36,6 meetrise antenni paneelide häälestamine, kus mõõtmisel kasutati lasereid ja paneele häälestati alusraamiga (Sele 2.1). Paneelide sõrestikule monteerimiseks kasutati alusraami, millega koos toimus paneelide häälestamine. Ühele alusraamile kinnitati olenevalt ringist, kas 4 või 5 paneeli, paneelid omakorda kinnitati alusraamile kümnest punktist. Mõõtmisel häälestati neid punkte, mis paneeli küljes olid, aga hiljem lõppmontaažil häälestati nelja paneeli neljast alusraami punktist (Sele 2.2). [4]

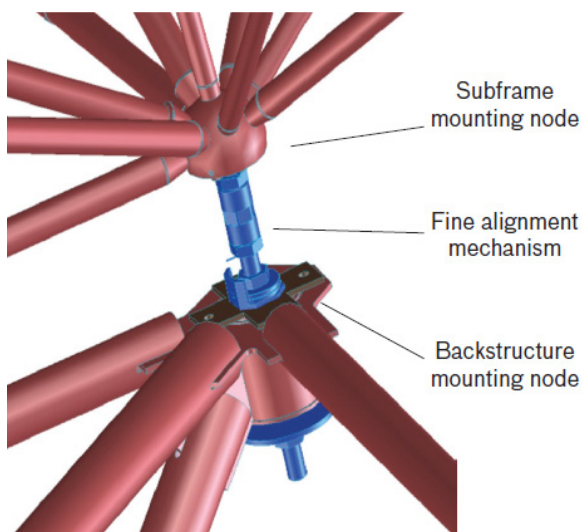
Selelt 2.1 on näha, et häälestamine toimub mehaaniliselt, kasutusel on põhimõtteliselt sama lahendus, mida kasutatakse Vertexis, kuid erinevus seisneb selles, et mõõdetakse ja

häälestatakse 4 paneeli (ühe ringi puhul viit paneeli) korruga ja mõõtmiseks kasutatakse lasertehnoloogiat.

Selline süsteem ei ole kasutatav 9 ja 13 meetriste antennide puhul, kuna eeldaks disaini muudatusi antenni struktuuris. Kuna tegemist on mehaanilise reguleerimisega, on sellel sarnased puudused Vertexis olevaga. Eelisteks on, et sama krüviga, millega reguleeritakse, on paneel kinnitatud.

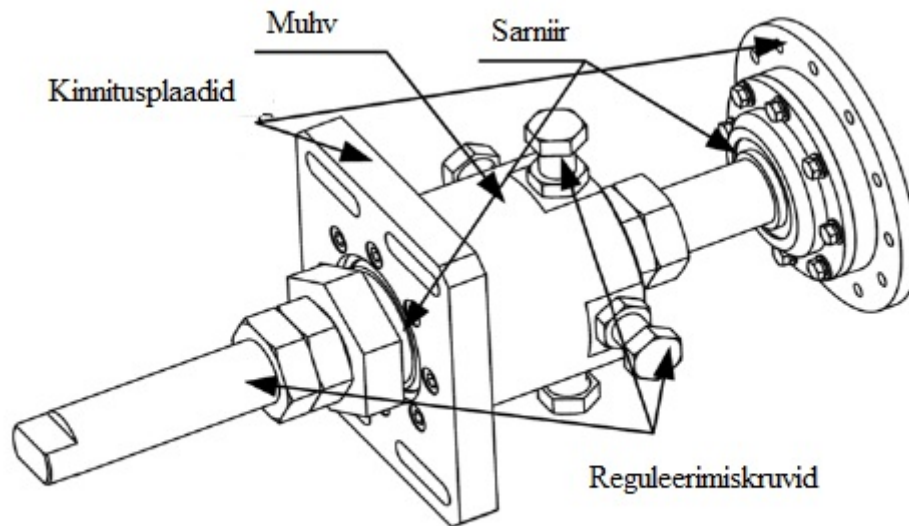


Sele 2.1 Alusraamiga häälestussüsteem



Sele 2.2 Alusraami ja reflektori sõrestiku vaheline reguleerimine

Mehaanilisest reguleerimisest leiab veel kirjanduses näiteid, kuid need on siiski enamasti reflektori väljareguleerimiseks mõeldud vahendid. Selelt 2.3 on näha üks mehaanilisest reguleerimislahendusest, mida on võimalik reguleerida kõikides suundades.



Sele 2.3 Mehaaniline paneelide häälestamise seade, paneelide häälestamiseks antenni sõrestiku külge [5]

2.2. Mikropositsioneerimine

Mikropositsioneerimiseks nimetatakse positsioneerimist, mis toimub vähemalt 1 μm täpsusega. Mikropositsioneerimiseks kasutatakse ajameid, mille täpsus ja korratavus jääb tavaliselt vahemikku 0,1 – 1 μm . Mikropositsioneerimist kasutatakse tööstuses näiteks fiiberoptika seadmetes, laser-ablatsioonis ja erinevates mõõtesüsteemides. [6]

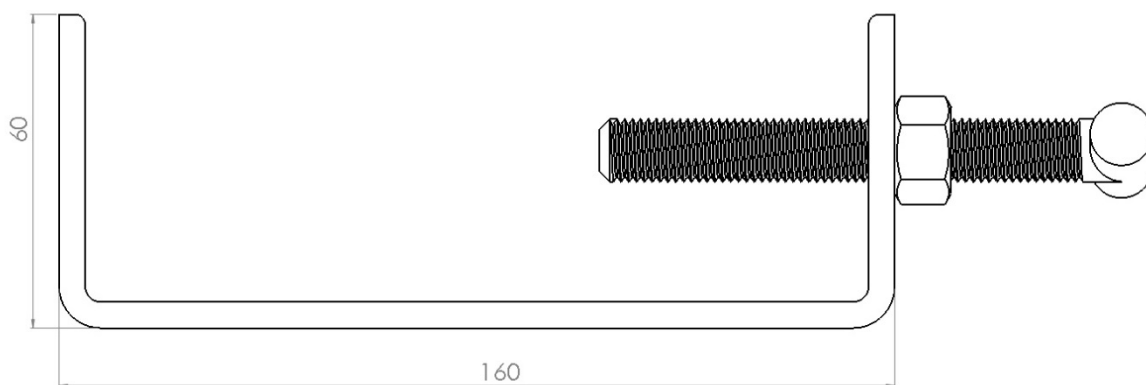
On olemas mitmeid ettevõtteid, kes pakuvad erinevaid töölaudu ja süsteeme. Enamus töölaudu kasutab lineaarseid ajameid. Täpsete lineaarsete ajamite pakujaid on maailmas väga vähe ja enamus tooteid on patenteeritud. Mikropositsioneerimises kasutatakse tavaliselt piezo-elektrilisi ajameid. Piezo-elektrilised ajamid on väga kompaktsed, kuid tavaliselt arendavad suhteliselt väikest jõudu.

Mikropositsioneerimise valdkonnast võib leida sobiva ajami paneelide automaatseks häälestamiseks, kuid valmis süsteemi ja lahendust hetkel turul ei ole. Seega moodustab mikropositsioneerimine ühe osa käesolevast lõputööst.

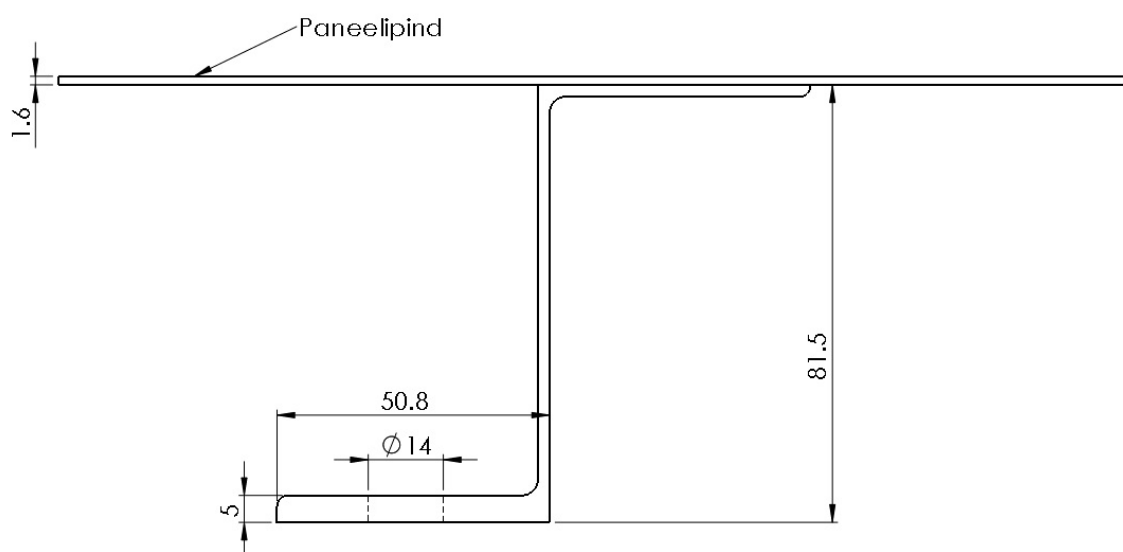
3. KINNITUSLAHENDUSTE ANALÜÜS

Häälestuskruvi välja töötamist alustan paneeli poolsest otsast ja esimesena analüüsin võimalikke viise, kuidas paneel kinnitada mõõteraami külge. Kinnitusvahend kinnitub ühelt poolt lineaarse ajami külge, kogu süsteemi kokku ühendamist analüüsitakse kuuendas peatükis.

Käesolevas peatükis keskendutakse kinnitamisele paneeli Z-profiili külge (Sele 3.2). Eelnevalt kasutuses oleva klambri mõõtmed on toodud seel (Sele 3.1). Need mõõtmed on võetud uue klambri valikul arvesse kui maksimaalsed gabariidid.



Sele 3.1 Vana klambri mõõtmed



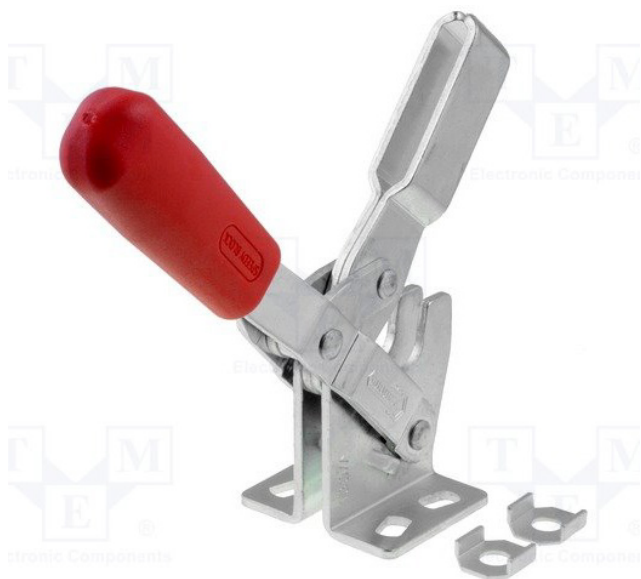
Sele 3.2 Z-profiili mõõtmed, kuhu klamber kinnitub

Paneeli kinnitamise võimalused saab jaotada kaheks. Esimesel juhul sellised kinnitusvahendid, mis detaili kinnitamiseks vajavad ava ja teised, mis kinnituvad ilma avata. Ava vajavad kinnitused jaotuvad omakorda kaheks: on olemas sellised kinnitusvahendid, mis kinnituvad ava sees ja sellised, mis töötavad nagu klassikalised klambrid ja kinnituvad ava taga. Nii ava nõudvad, kui ilma avata kinnitusvahendid jagunevad veel vastavalt töömehhanismile: mehhaanilised, pneumaatilised, elektrilised.

3.1. Avata kinnitusviisid

Hetkel on kasutuses mehaaniline U-kujuline klamber, mis on reguleerimisvardast eraldiseisev ning kinnitub ilma avata. Sama klambrit on võimalik kasutada ka automaatses lahenduses, kuid see eeldab, et klamber ja reguleerimissüsteem on integreeritud kokku ehk klamber liigub koos reguleerimissüsteemiga. Samas võtab mehaanilise klambri kinnikruvimine operaatoril teatud aja ja tuleb vaadata kiiremini kinnituvaid lahendusi.

Üks mehhaanilistest võimalustest on kasutada mehhaanilist kiirklambrit. Mehhaanilise kiirklambri korral tuleks juurde disainida L-kujuline fikseerimispolt. Mehhaanilise kiirklambri eeliseks kruvi ees on kiirem kinnitamine.



Sele 3.3 Mehhaaniline kiirklamber

Teine võimalus, kuidas paneeli kinnitamist paremaks muuta, on kasutada pneumaatilist klambrit. Pneumaatilisi klambreid on olemas väga erinevaid tüüpe. Pneumaatilise klambri kasutamise kasuks räägib veel see, et mõõtelabori kõrval valmistatakse paneele, kus kasutatakse suruõhku paneelide monteerimiseks. Võrreldud pneumaatilised klambriid on toodud tabelis 3.1.

Tabel 3.1 Pneumaatiliste klambrite andmed

Pakkuja	Mudel	Klambri jõud	Gabariidid (laius x pikkus), mm
Festo Oy Ab Eesti filiaal	CLR 25-20-L-P-A	227 N	44,25 x 138,9
SMC Pneumatics Estonia OÜ	MK2TB25-20L	185 N	64 x 139

Festo klamber on kinnitamiseks eelistatum, kuna pakub suuremat fikseerimisjõudu kompaksemate mõõtude juures.

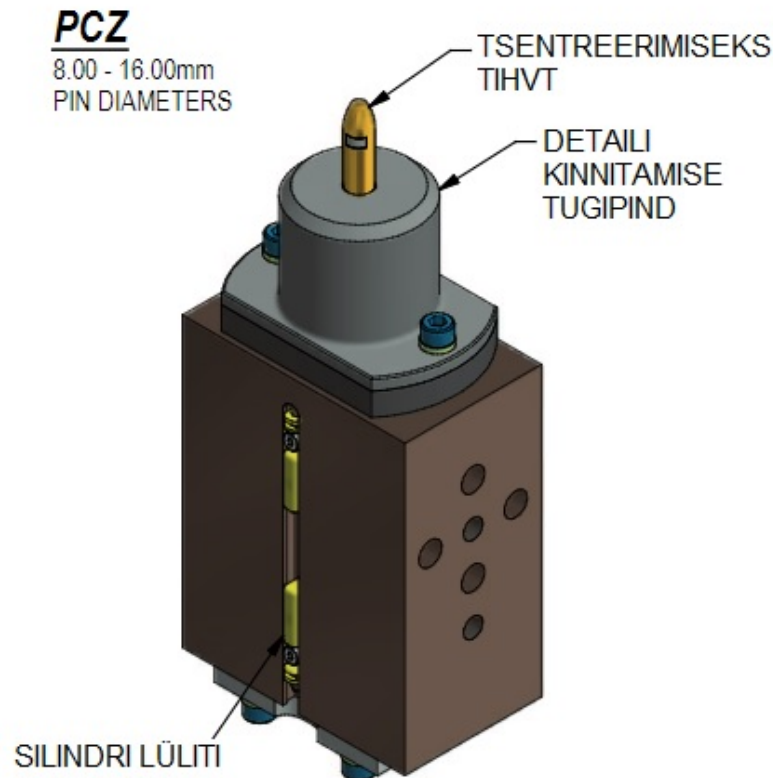
3.2. Läbi ava kinnituvad lahendused

3.2.1. Automaatsed lahendused

Kinnitusvahendite, mida saab kinnitada läbi ava eelisteks on:

- 1) ava saab Z-profiili enne mõõtmist paneeli koostamisel ära puurida;
- 2) avaga saab kiirelt leida mõõteraamil paneelile õige koha (aitavad positsioneerida);
- 3) automaatsed lahendused ei nõua operaatori sekkumist.

Sobivaimaks lahenduseks turul olevatest toodetest oma kompaktsuse ja parameetrite poolest on USA ettevõtte *Welker Engineered Products* toode *PCZ Series Pin Clamps* (Sele 3.4). Seda on võimalik kinnitada avades läbimõõduga 8 – 16 mm. Toode on elektriliselt juhitav, seega lihtsasti ühendatav ka kontrolleriiga. Ka gabariitmõõtmed jäävad soovitud piiridesse.



Sele 3.4 PCZ seeria läbi ava kinnitav klamber

Turul leidub sarnaseid tooteid veel mitmelt pakkujalt, pakutavad tooted on toodud tabelis (Tabel 3.2). Tegemist on uudsete ja patenteeritud tehnoloogiatega, seega on turul pakkujaid suhteliselt vähe. Leiti 4 sobiva ava läbimõõduga töötavat seadet. Peale tabelis olevate leiti veel 4 pakkujat, kuid nende minimaalne võimalik ava läbimõõt oli vähemalt 20 mm.

Läbi ava kinnituvate automaatsete kinnitusvahendite turu-uuringut tehes tuli välja mitu miinust, millega ei osatud enne arvestada:

- 1) pakkujad enamasti USA-s, seega toote kättesaadavusega võib tekkida probleeme;
- 2) mõõtmed on küllaltki suured, kuna tooted on mõeldud ühtlasi ka positsioneerimiseks, samas ei rahulda positsioneerimistäpsus (jäab enamasti parimal juhul kuni 0,1 mm kanti) projekteeritava aplikaatsiooni nõudeid, seega saab kasutada ainult fikseerimiseks;
- 3) toodete hind vs kinnitamise efektiivsus. Paneeli kinnitamise aeg ei ole käesoleva lõputöö efektiivsuse juures otseselt määrav, sest optimeeritakse paneeli häälestamise aega.

Tabel 3.2 Läbi ava kinnituvad kinnitusvahendid

Pakkuja (riik)	Mudel	Jõud	Sobivad ava läbimõõdud, mm	Gabariitmõõdmed, (laius x pikkus) mm
<i>Welker Engineered Products</i> (USA) [6]	<i>PCZ PIN CLAMP</i>	129 N	8,0 – 16,0	78 x 161
<i>BTM Company, LLC.</i> (USA) [7]	PLC - 45	578 N	12,5 – 18,0	73,1 x 285,6
<i>PHD, Inc.</i> (USA) [8] edasimütüjad: Soomes, Saksamaal	PLK	223 N	12,5 – 24,5	110 x 198,4
SMC (USA) [9] edasimütüja: SMC Pneumatics Estonia OÜ	C(L)KQG32	362 N	13,0 – 20,0	50 x 183

Ettevõttelt SMC Pneumatics Estonia OÜ, küsiti 29.03.2017 hinnapakumist tabelis toodud kinnitusvahendile. Vastavalt pakumisele nr 36395 on ühe kinnitusvahendi hinnaks 776,19€, mis 7 tükki korral teeks kinnitamise koguhinnaks 5433,33€, mis pole majanduslikult käesolevas projektis põhjendatud.

3.2.2. Mehaanilised lahendused

Lisaks automaatsetele kinnitusvahenditele on olemas mehhaanilised läbi ava kinnituvad vahendid (Sele 3.5), kuid need on mõeldud kasutamiseks paksemate materjalide korral ning kinnitamine ja süsteemi integreerimine on suhteliselt ebamugav.



Sele 3.5 Mehhaanilised ava kaudu kinnituvad kinnitusvahendid

3.3. Kinnitusvahendi lahendus

Kuna head läbi ava kinnituvat vahendit ei leidnud, siis tuleb see ise disainida (Sele 3.8). Kasutan eelnevalt analüüsitud Festo pneumaatilist klambrit CLR 25-20-L-P-A. Festo klambri kinnitamise jõuks on 227N. Kuna paneel toetub mõõteraamile ja klamber ise on fikseeritud, siis on see igal juhul piisav jõud fikseerimiseks. Kontrolli mõttes arvutan minimaalse kontaktpindala, mille puhul klamber jõu 227 N korral ei tekita materjalile deformatsioone. Z-profiili materjaliks on AlSi7Mg-T6, mille voolepiiriks on 190 MPa.

$$\sigma_y = \frac{N}{A} \rightarrow A = \frac{N}{\sigma_y}, \quad (3.1)$$

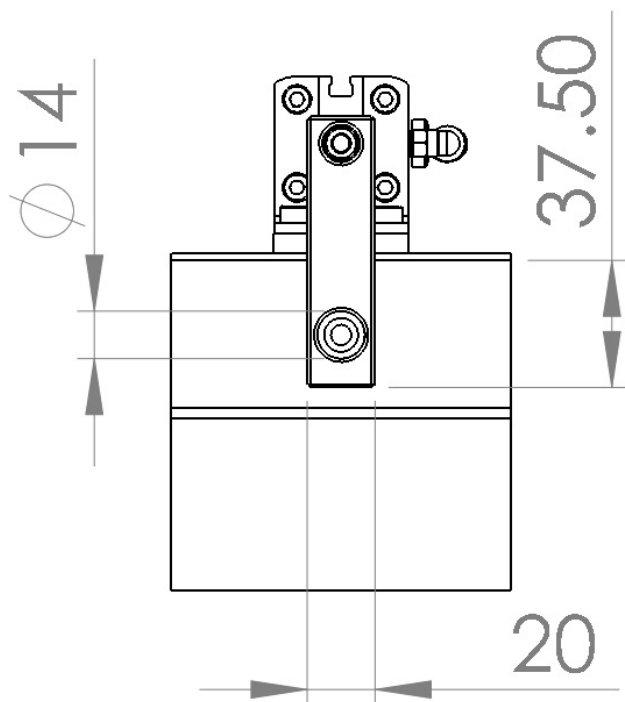
kus σ_y – materjali voolepiir, MPa,

N – materjali sisejõud, N,

A – materjali ristlõikepindala (sisuliselt klambri ja materjali kokkupuutepind), m².

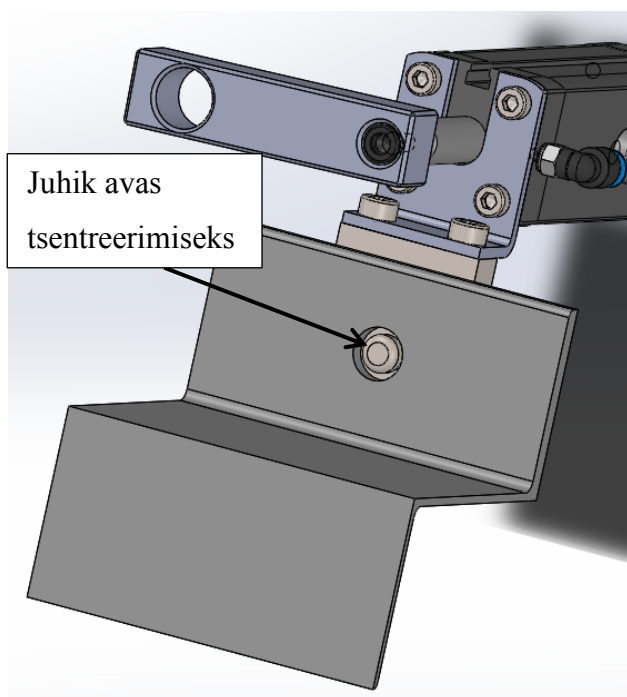
$$A = \frac{N}{\sigma_y} = \frac{227 \text{ N}}{190 \times 10^6 \text{ Pa}} = 1,42 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = 1,42 \text{ mm}^2$$

Seega peab klambri kontaktpind olema suurem, kui 1,42 mm², siis ei teki materjalis deformatsioone. Klambri tegelik kontaktpindala on 596 mm² (Sele 3.6), seega deformatsioone profiilile ei teki.

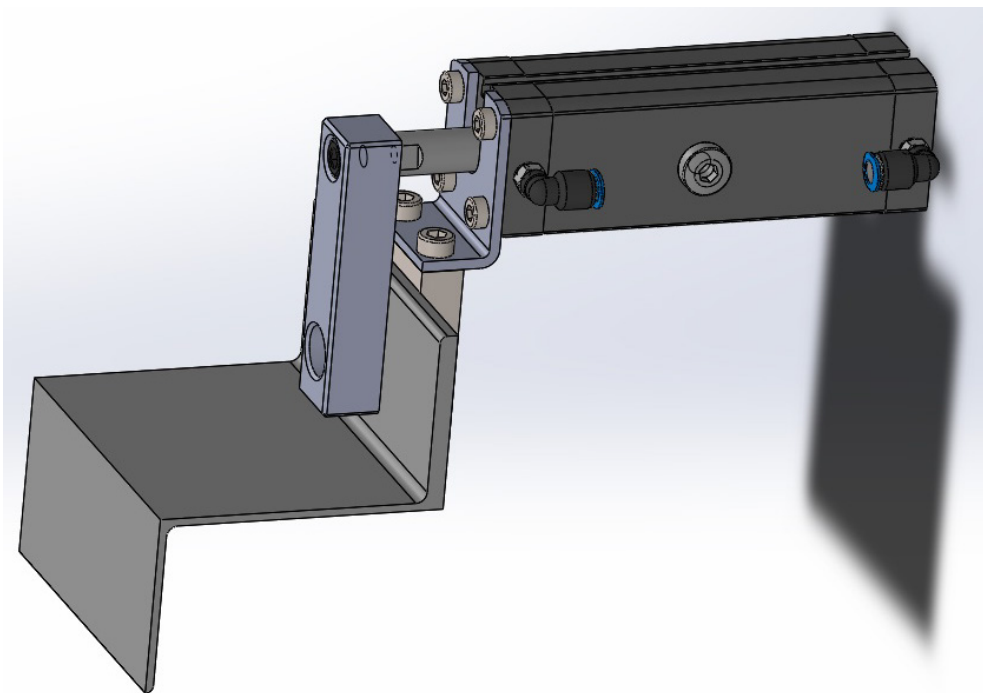


Sele 3.6 Klambri ja Z-profiili vahelise kontaktpinna mõõtmed

Paneeli mõõteraamile paikasamise probleemi lahenduseks on tehtud 5 mm paksune juhik (Sele 3.7), mis aitab paneeli õigesse asukohta paika saada. Juhik on väiksema läbimõõduga, kui nullpunkti puuritud ava, tagades sellega sobivuse paneelide hälvete korral.



Sele 3.7 Juhik Z-profiili avas tsentreerumiseks



Sele 3.8 Klambri lahendus

Kuna valituks osutus pneumaatiline klamber, siis on vajalik koostada pneumoskeem (Sele 3.11) ja valida sobivad komponendid. Suruõhk on mõõtmise labori kõrval olemas. Seega on vaja valida suruõhu ettevalmistusseadmed ehk õhu ettevalmistusplokk, mis töötleb suruõhu sobivaks enne tarbijat (sisaldab tavaliselt õlifiltrit, rõhuregulaatorit ja vajadusel õlitit). Festol on pakkuda kompaktsed komponendid, mis ühendavad endas filtri ja regulaatori. Selleks, et õigesti valida õhuettevalmistusplokki tuleb enne leida maksimaalne õhukulu pneumotäituris, milleks praegusel juhul on pneumaatiline klamber.

Maksimaalne õhukulu silindris on arvatav järgmise valemiga:

$$Q_{max}^{sil} = \frac{\pi \times D^2}{4} \times v_{max} \times \frac{p + p_{atm}}{p_{atm}} \times 1,4, \quad (3.2)$$

kus D – silindri kolvi läbimõõt, dm;

v_{max} – maksimaalne silindri liikumiskiirus, dm/min;

p – rõhk süsteemis (üleriõhk), MPa;

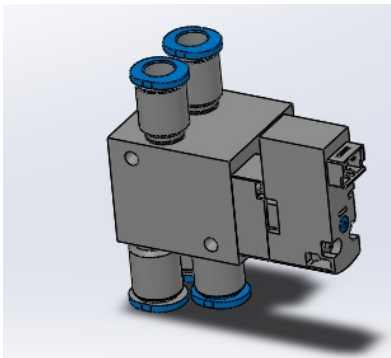
p_{atm} – atmosfääri rõhk, võib arvutustes võtta 0,1 MPa;

1,4 – efektiivsuse koefitsient (arvestab termilisi ning muid kadusid).

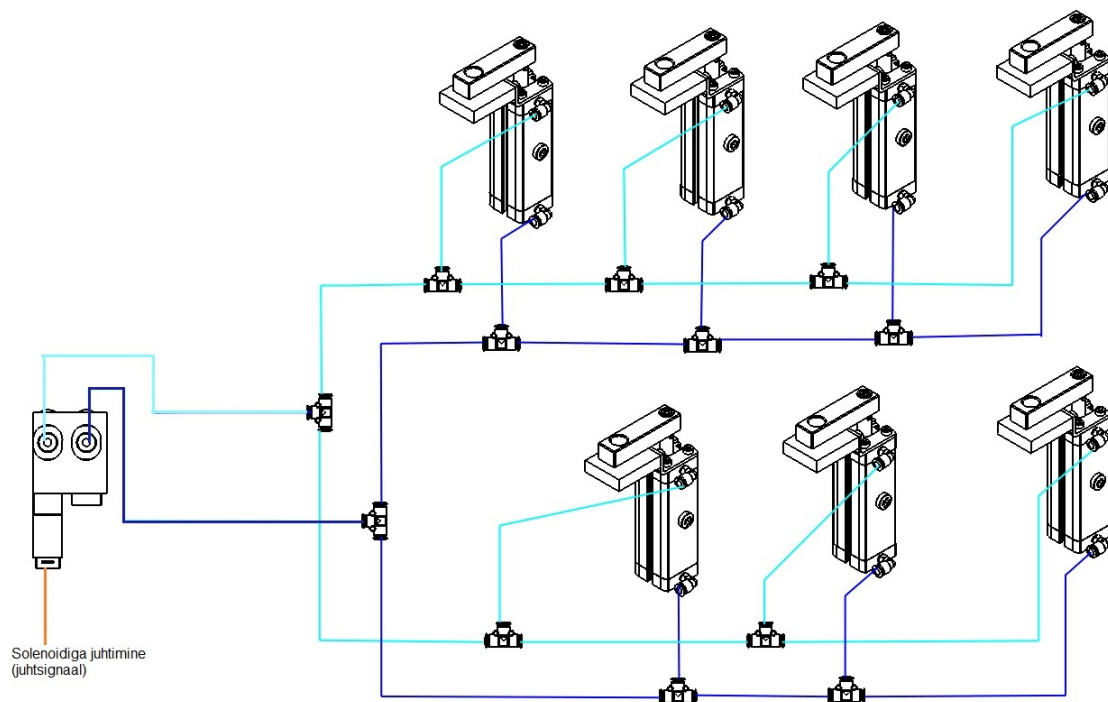
Kokku on vaja juhtida 7 silindrit, kolviläbimõõduga ning käigupikkusega 20 mm, võtan käigu sooritamise ajaks 0,5 sekundit, siis saab keskmiseks kiiruseks 40 mm/s, maksimaalse kiiruse saamiseks korrutan läbi koefitsiendiga 1,41 $v_{max} = 1,41 \times 40 = 56,4$ mm/s. Töörõhuks on 6 bar, mis annab vajaliku jõu.

$$Q_{max}^{sil} = \frac{\pi \times 0,25^2}{4} \times 0,564 \times 60 \times \frac{0,6 + 0,1}{0,1} \times 1,4 = 16,28 \text{ l/min}$$

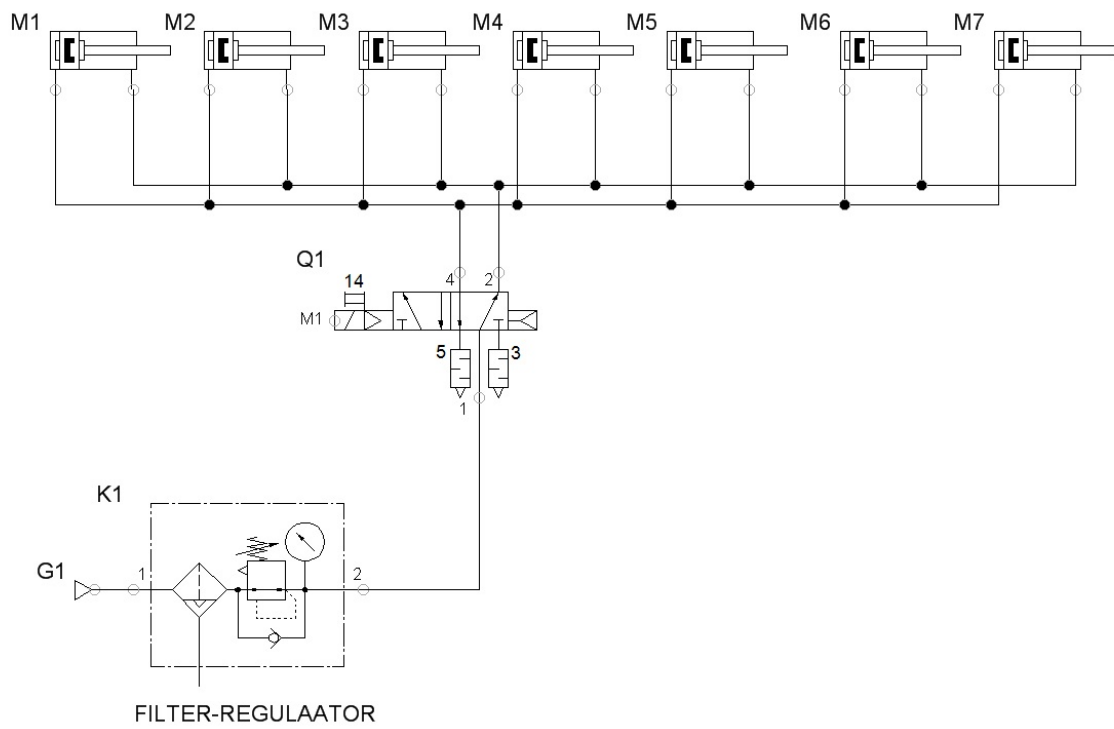
Kuna kokku on 7 klambrit, siis vajalik vooluhulk on $7 \times 16,28 = 113,95$ l/min. Valituks osutus Festo MS4-LFR-1/4-D6-CRV-AS, mille vooluhulgaks on kuni 1900 l/min (Sele 3.9). Klambrite juhtimiseks (Sele 3.10) valisin 5/2 suunaventiili VOVG M32U, mis on elektriliselt juhitav 5V-ga. Solenoidiga juhtimine on kujutatud Seel 3.12.



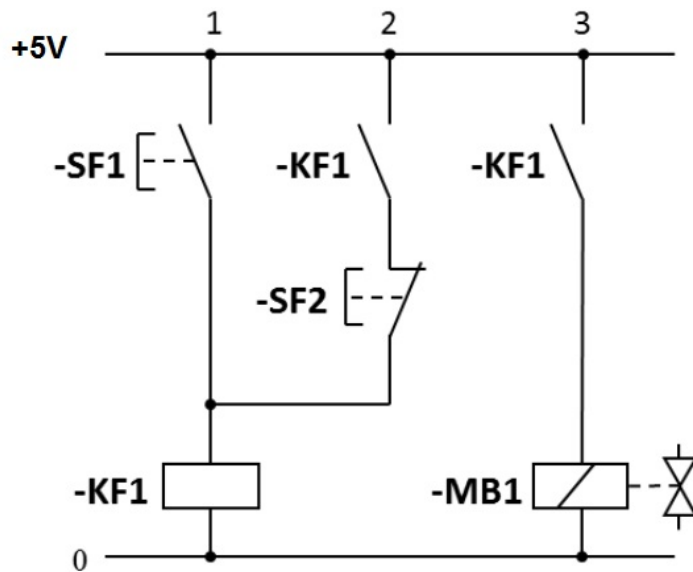
Sele 3.9 Festo VOVG suunaventiil, Festo MS4-LFR filter-regulaator



Sele 3.10 Pneumoklambrite juhtimise süsteemi visualiseering



Sele 3.11 Pneumoskeem



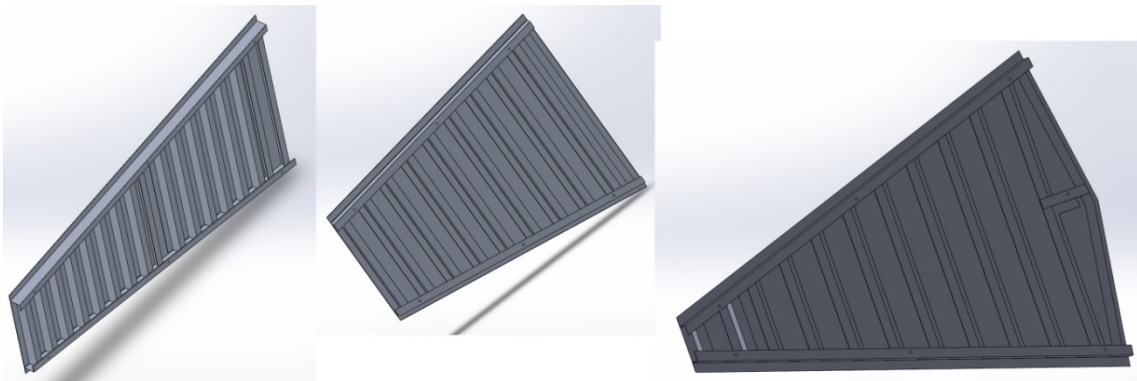
Sele 3.12 Solenoidi releega juhtimine

4. AJAM HÄÄLESTUSEADMELE

Automaatse häälestamissüsteemi peamiseks nõudeks on täpsus. Kuna täpsus peab olema suurem, kui $10\ \mu\text{m}$, on mõistlik suunata pilk lineaarsete ajamite suunas. Alternatiivseks võimaluseks oleks valida komponendid ning ise projekteerida ja valmistada lineaarne ajam, kuid sellist täpsust on raske saavutada, tekkida võivate mehaaniliste lõtkude tõttu.

4.1. Paneeli deformeerimiseks vajalik jõud

Paneeli deformeerimiseks vajaliku jõu saamiseks tegin programmis *Solidworks* FEM arvutuse. Aluseks võtsin kolme suurima gabariitidega paneeli mõõtmed (9 meetrise A ja B ring, 13 meetrise B ring) ja tegin paneelidest lihtsustuse mõttes tasapinnalise mudeli (Sele 4.1), kuna paneeli pinna nõgusus on väike, siis ei muuda see väga palju arvutustulemusi. Mudeli täpsusest tulenevad ebatäpsused saab korvata kasutades varutegurit. Programmis andsin nullpunktile paneeli pinna suunalise nihke ja programm arvutas deformeerimiseks vajaliku jõu.



Sele 4.1 Paneeli tasapinnalised mudelid

Arvutustega saadi sõltuvalt nihke suuruselt nihke teostamiseks vajalik jõud. Katseid teostati paneeli erinevate nullpunktidega ja maksimaalseks nihkeks oli 1 mm. Reaalsuses on pigem vajalik häälestamisulatus ühele punktile maksimaalselt 0,1 mm ja olukord, kus kõik ülejäänud punktid on paigas ja ühest punktist toimub suur reguleerimine, praktikas ei esine. Seega arvutuste tulemusena peaks lineaarne ajam olema võimeline reguleerima

jõuga vähemalt 200N, mis tagaks kõikide punktide nihutamise vähemalt 0,150 mm, äärmiseid punkte on võimalik sellise jõuga nihutada kuni 1 mm.

4.2. Lineaarsete ajamite tüübid

Täiturmehhanisme võib liigitada energialiigi järgi, millega nad töötavad. Energialiigi järgi jaotuvad ajamid peamiselt kolme rühma: elektrilised, hüdraulilised, pneumaatilised.

Pneumaatilised lineaarsed ajamid koosnevad kolvist ja silindrist. Suruõhk välisest kompressorist või pumbast liigutab silindri sees olevat kolbi. Kui rõhk silindris tõuseb, siis silinder liigub ja tekitab jõu. Kolb liigub oma algsesse asendisse tagasi vedru jõul või õhu andmisel teisele poole kolbi. Ajami eelisteks on lihtsus, rahuldav täpsus (kuni 0,1 mm), ajami omahind on madal.

Hüdraulilised ajamid on sarnased pneumaatilistele, energialiigiks on suruõhu asemel töövedelik. Hüdraulilisi ajameid kasutatakse kohtades, kus on nõutud suured jõud.

Elektrilised lineaarsed ajamid teisendavad elektrienergia momendiks. Elektrimootor on ühendatud juhtkruviga. Kruviülekanne võimaldab muuta pöörlemist sirgliikumiseks. [11]

Tabelisse (Tabel 4.1) on koondatud kolme energialiigiga ajamite võrdlus, lähtuvalt valiku võtme parameetristest. Tabelis võrreldakse paigaldust, täpsust, juhtimist, koormuse hoidmist ja maksumust, mis on kõige olulisemad parameetrid lähtudes projekteeritavast süsteemist.

Tabel 4.1 Lineaarsete ajamite võrdlus energialiikide põhjal [12]

Elektrilised lineaarsed ajamid vs hüdraulilised ja pneumaatilised lineaarsed ajamid			
	Elektrilised lineaarsed ajamid	Hüdraulilised lineaarsed ajamid	Pneumaatilised lineaarsed ajamid
Paigaldus	Lihtsad elektrilised ühendused (juhtmetega).	Vajalikud torustikud, töövedeliku filtreerimissüsteemid, pumbad jne.	Vajalikud torustikud, suruõhu filtreerimissüsteemid, pumbad jne.

Täpsus	Hea korratavusega ja täpsed. Korratavus kuni 0,1 µm.	Nõuab kalleid positsiooni tuvastamise süsteeme ja täpseid elektrohüdraulilisi ventiile, võivad libiseda üle soovitud positsioonist.	Täpsust on raske saavutada. Nõuab kalleid positsioneerimisandureid ja täpseid ventiile, on omadus libiseda.
Juhtimine	Otse ühilduv standardsete kontrolleritega, võimaldab lihtsasti realiseerida keerulisi liikumisi.	Erinevad ventiilid juhtimiseks. Hüsteres, rõhu ja temperatuuri muutused teevad juhtimise keeruliseks.	Olemuslikult mittelineaarne, kokkusurutav energiaallikas komplitseerib juhtimist.
Vastupidavus	Ühtlane korratavus kogu eluea vältel. Vähe hooldust vajav, kuni miljon tsükli.	Väga tundlik saastumisele. Nõuab pidevat hooldust. Tihendid on alati lekkima. Vastupidav regulaarse hoolduse korral.	Väga tundlik saastumisele. Suruõhk vajab pidevat filtreerimist. Hea vastupidavus, kuid tavaliselt hõlmab palju komponente.
Koormuse hoidmine	Kruviülekanne on ise lukustuv. Tõrkekindluse pidurid kuul- ja rullkruvidega süsteemidele	Keerulised reservohutussüsteemid (<i>back-up</i>) peavad olema kasutusel.	Keerulised reservohutussüsteemid (<i>back-up</i>) peavad olema kasutusel.
Maksumus	Mõõdukas esmane maksumus, väga madalad töökulud.	Komponendid maksavad vähem, kuid installatsioon ja hooldus tõstavad hinda.	Komponendid maksavad vähem, kuid installatsioon ja hooldus tõstavad hinda.

Infole tuginedes on parimaks lahenduseks elektriline ajam.

4.3. Ajami valik

Tehti otsing turul olevatest lineaarsetest ajamitest (Tabel 4.2), tingimuseks olid häälestamistäpsus, vähemalt 10 µm ja arendatav jõud minimaalselt 200 N.

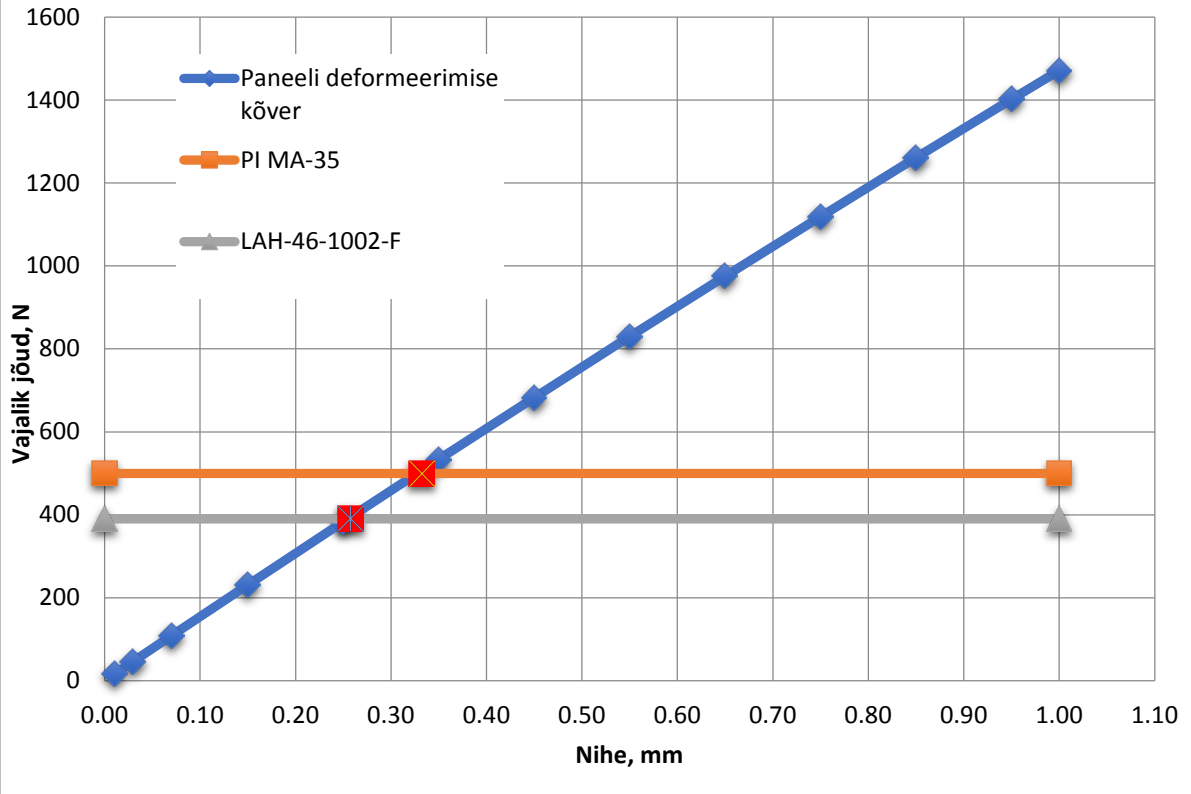
Tabel 4.2 Nõuetele vastavad lineaarsed ajamid

Jrk.	Pakkuja	Mudel	Täpsus, µm	Jõud	Gabariidid (laius x pikkus), mm
1.	<i>Physik Instrumente (Monospektra)</i>	PI MA- 35	± 1	500 N	40 x 40 x 243
2.	<i>Physik Instrumente (Monospektra)</i>	L-239	± 0,1	300 N	42 x 65,7 x 265,6
3.	<i>Thomson Industries, Inc</i>	PC25	± 10	1250 N	34 x 34 x 271,1
4.	<i>Standa Ltd</i>	8CMA42-50	± 0,05	200 N	42,5 x 66 x 207,5
5.	<i>Harmonic Drive, LLC</i>	LAH-46- 1002-F	± 0,5	392 N	47 x 47 x 204

Tabeli andmete põhjal osutuvad sobivaimateks lahendusteks 1. ja 5. ajam. Ajamid 2 ja 4 on küll kõige täpsemad valitud ajamite seast, kuid ka kõige väiksema maksimaalse jõu väärtusega. Ajamite vastupidavuse huvides ei ole otstarbekas, kui ajamid töötavad pidevalt maksimaalse jõu piirkonnas. Ajami PI MA-35 minimaalseks nihkeks (kõige enam jõudu nõudnud nullpunkti korral) maksimaalse jõu 500 N juures on 0,33 mm. Ajami LAH-46-1002-F minimaalseks nihkeks maksimaalse jõu 390 N juures on 0,25 mm (Sele 4.2).

Valituks osutus ajam PI MA-35, sest sellel on suurem arendatav jõud, mis tagab suurema varu süsteemile. Mõõtmed on mõlemal ajamil sarnased, seega on esimesel ajamil ka parem jõu ja mõõtmete suhe. Kolmandaks oluliseks faktoriks sai, et *Physik Instrument*'il on Leedus Baltikumis esindaja ja nende kaudu on toote kättesaadavus lihtsam. Monospektra käest sai 14.11.2016 küsitud hinnapakumine ajamile ja ühe ajami hinnaks kujunes 3200€. Ajamis kasutatava mootori andmed on toodud Selet 4.3.

Paneeli nullpunktide nihutamiseks vajaliku jõu graafik



Sele 4.2 Kahe ajami nihete võrdlus maksimaalse jõu korral

DC-B-013

Motor type		DC brush 2224-024 CR
Nominal voltage	V	24
Max. continuous current	A	0.25
Electrical resistance	Ω	36.6
Electrical inductance	mH	0.8
Torque constant	mNm/A	29.1
Velocity constant	rpm/V	328
n/M slope curve	rpm/mNm	411
No load velocity	rpm	7800
Max.continuous velocity	rpm	5000
Max. continuous velocity at nominal torque	rpm	4800
Inertia	kgm ²	2.71 E-7
Continuous torque	mNm	6.6
Rotary encoder		RE-005 RS422-outputs 2 channel (1)
Gearbox		Low backlash, 22/5
Gear ratio		2401 / 81
Encoder increments (quad counts)	n	2048
with additional line-driver PCB in stage or Sub-D 15-pin connector shell		

Sele 4.3 Mootori andmed

5. HÄÄLESTUSSÜSTEEMI JUHTIMINE

Automaatsetele häälestuskruvidele juhtimissüsteemi loomiseks on erinevaid võimalusi. Bakalaureusetöö piiratud mahu tõttu analüüsitakse siin kahte varianti:

- 1) kasutada ajami tootja kontrolleri-toitemuundur-tarkvara paketti;
- 2) kasutada odavaid arendusplaate, toitemuundureid ning luua tarkvara ise.

Mõlemal variandil on omad plussid ja miinused, mis on esitatud järgnevas tabelis (Tabel 5.1):

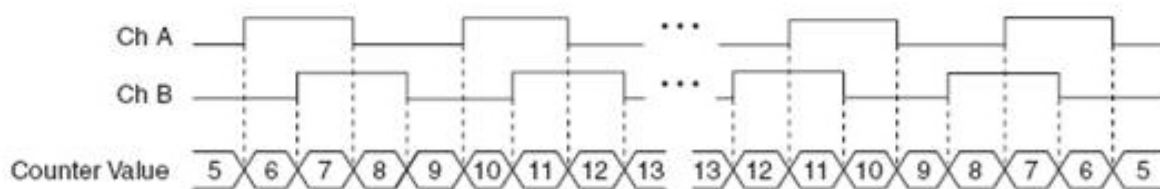
Tabel 5.1 Juhtimislahenduste võrdlus

	Kontroller-draiver-tarkvara <i>Monospektralt</i>	Valida odavad arendusplaadid, draiverid, luua tarkvara
„+“	<ol style="list-style-type: none"> 1. Üks tarnija; 2. Tarkvara olemas; 3. Juhtmed/kaablid olemas; 4. Töökindlus, garantii. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Soodne hind, mis lubab eelnevalt testida; 2. Saab luua täpselt vajadusest lähtuvalt tarkvara; 3. Varuosad (komponendid) odavad.
„-“	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kõrge hind, ühe muundur/kontrolleri hind u 900€ (7 ajami korral kokku u 6300€). 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Odavate komponentide vastupidavus on küsimärk ja sageli pikk tarne; 2. Pädeva inseneri vajadus, kes süsteemi tööle seab.

Kuna valmis lahendus on suhteliselt kulukas ja ei nõua palju analüüsimist, siis käesolevas lõputöös pakutakse välja alternatiivne juhtimise lahendus ja kirjeldatakse, kuidas valitud ajami juhtimine toimub.

5.1. Ajami juhtimise algoritm

Valitud lineaarses ajamis on kasutusel enkoodritega alalisvoolumootor. Kasutusel on inkrementaal-enkooder, millel on ühe pöörde kohta 2048 lugemist. Inkrementaalne enkooder annab relatiivse koordinaadi ehk kui palju on positsioon muutunud võrreldes eelnevaga, samas absoluutne koordinaat pole teada. Paneelide häälestamisel mõõteraamil on oluline relatiivne koordinaat ehk sisendiks on asendi muutus, mitte absoluutne asukoht. Enkoodri väljund koosneb kahest kanalist: A ja B kanal, mis on omavahel 90° faasinihkes ja see nihe võimaldab enkoodril tuvastada liikumissuunda. Lugemite arv oleneb sellest, millistel hetkedel kanalite väärtuste muutusi loetakse. X1 loendamiseks nimetatakse olukorda, kus registreeritakse ainult hetk, mil kanali A väärtus kasvab ehk läheb 0-st 1-ks. Uuritavas ajamis on kasutusel X4 lugemine, mis loeb nii kanali A kui ka kanali B muutusi, andes seega 4 korda rohkem lugemeid ühele pöördele (Sele 5.1). [13]



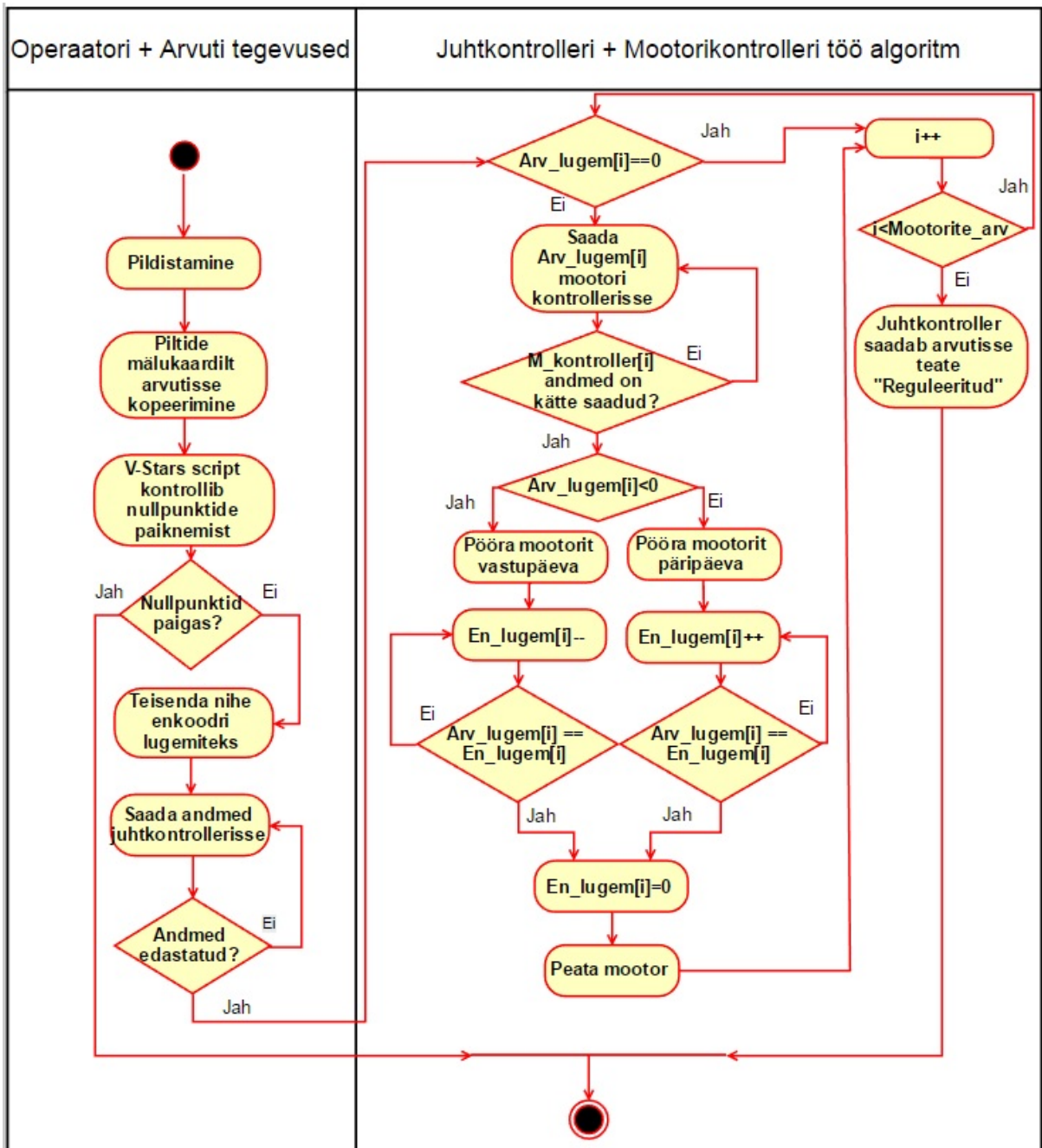
Sele 5.1 X4 enkooder, iga kanali väärtuse muutus annab ühe lugemi

Ajami juhtimiseks on seega vaja kontrollida enkoodri lugemeid. Enkoodri lugemi väärtusega ei tea me lineaarset liikumist, mistõttu tuleb teisendada enkoodrilugemid lineaarseks liikumiseks. Juhtkruvi sammuks on 2 mm, seega ühe enkoodrilugemiga toimuva lineaarse liikumise saab välja arvutada: $\text{kruvisamm}/(\text{enkoodrilugemid} \times \text{ülekandearv}) = 2 \text{ mm}/(2048 \times (2401/81)) = 0,033 \text{ } \mu\text{m}$.

V-Stars programm, nagu eelnevalt mainitud, annab nihke mm-tes. Arvutisse tuleb teha lihtne programm, mis teisendab mm-d enkoodri lugemiteks (vajalikku teisendust illustreerib tabel 5.2). Märgiga antakse ette reguleerimise suund ehk mootori pöörlemise suund. Seega esimeseks juhtseadmeks on operaatori arvuti, mis teeb esialgsed arvutused ja saadab info edasi juhtkontrollerisse. Juhtkontrolleri ülesandeks on saata informatsioon mootorikontrollerisse, vastavalt mootorikontrolleri aadressile. Mootorikontroller määrab liikumise suuna ja kontrollib enkooderi lugemeid, kui enkoodri lugemid saavad võrdseks etteantud lugemitega, siis mootor peatatakse. Analoogne tegevus viiakse läbi kõigis mootorikontrollerites. Juhtalgoritm on toodud Sele 5.2.

Tabel 5.2 Infotöötlus arvutis

Null- punkti nr	Lineaarne liikumine V-Starsilt, mm	Kas nihe on vajalik? (Nullpunkti hälbe absoluut- väärtus suurem kui 0.01) "1" -JAH "0"- EI	Vajalik nihe µm-tes	Enkoodri lugem ümardatud täisarvuks
1	0.01	0	0	0
2	-0.023	1	-23	-697
3	0.1	1	100	3030
4	0.33	1	330	10000
5	-0.33	1	-330	-10000
6	-0.235	1	-235	-7121
7	0.05	1	50	1515



Sele 5.2 Juhtimise algoritm

5.2. Juhtseadmete ja info edastamisviiside analüüs ja valik

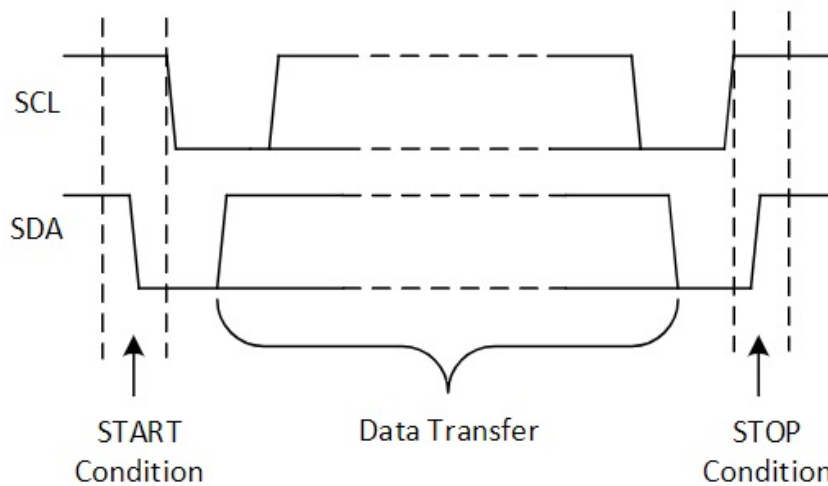
5.2.1. Andmete edastamine

Andmete edastamise viisiks on selles töös valitud I²C. I²C oli algselt disainitud andmete edastamiseks ühel trükkplaadil, kuid tänapäeval kasutatakse seda ka kaablitega pikema vahemaa taha, et ühendada näiteks mikrokontroller ja andurid. Internetist võib leida

erinevaid soovitusi, milline on maksimaalne soovituslik andmeside ulatus, ulatudes alates 1 meetrist kuni 10 meetrini. Pikema kaabli korral kannatab andmeside edastuse kiirus, antud süsteemis pole andmeside kiirus oluline, sest viited jäävad maksimaalselt millisekunditesse ja I²C kaabli pikkuseks tuleb u 2 m.

I²C koosneb kahest signaalist: SCL ja SDA. SCL on kella taktsignaali ja SDA on andmete signaal. Taktsignaali genereerib juhtseade (*bus master*). Tüüpiline protseduur, kui ülemseade tahab saata andmeid (Sele 5.3):

- 1) Juhtseade saadab START signaali alamseadme aadressile.
- 2) Juhtseade saadab andmed alamseadme vastuvõtjale.
- 3) Juhtseade saadab STOP signaali. [14]



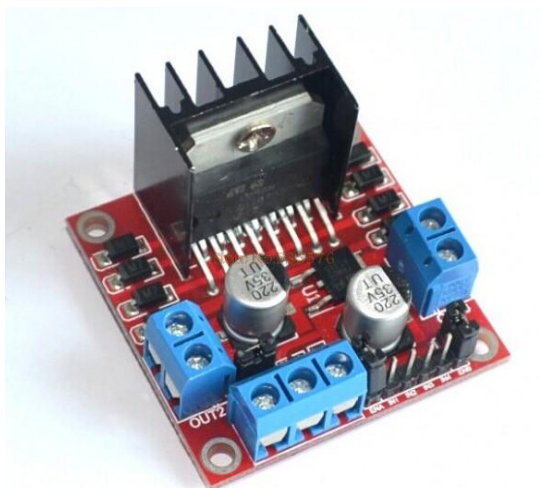
Sele 5.3 Start ja Stop signaalid

Andmete saatmine toimub 8-bitiliste arvudena (1 bait). Kuna mootori juhtimiseks on vajalik ka märk, siis ühekordse andmeedastusena on võimalik saata maksimaalselt arve [-128 : 128]. Selleks, et saata suuremaid arve, on võimalik jaotada arv kaheks baidiks ja saata need eraldi ning hiljem alamseadmes tarkvaraliselt kokku siduda. Sellisel juhul on võimalik edastada arve vahemikus [-32768 : 32767]. Seega saates infot 2 baiti järjestikku, saab ajami maksimaalseks nihkeks 1,08 mm, mis on paneeli reguleerimiseks täiesti piisav.

Arduino mikrokontrollerites on sisse ehitatud I²C liides, mis teeb Arduinoga ühendamise äärmiselt lihtsaks. Näiteks Arduino UNO plaadil analoogviigud A4 (SDA ehk andmeside) ja A5 (SCL ehk takt) on mõeldud I²C andmeside tekitamiseks.

5.2.2. Mootori kontrolleri ja draiver

Mootori draiveri ja kontrolleri valikul lähtusin mootori parameetritest. Mootori nimipinge on 24 V ja maksimaalne toitevool on 0,25 A. Mootori juhtimiseks valisin mootori mooduli, mis põhineb kiibil L298 (Sele 5.4). Maksimaalne lubatud mootori pinge on kuni 35 V.



Sele 5.4 Mootori moodul L298N

Mootori kontrolleri jaoks valisin Arduino UNO (Sele 5.5), kuna tegemist on soodsas kontrolleri ja see ühildub mootori mooduliga ja sellega on võimalik lugeda enkoodreid. Arduino kontrolleri on mõeldud prototüüpimiseks ning neid kasutatakse laialdaselt. Kuna Arduino skeemid on avalikud, siis leidub väga palju pakkujaid ja seetõttu on hinnad väga soodsad. Sama kontrolleri saab kasutada ka juhtkonnana.



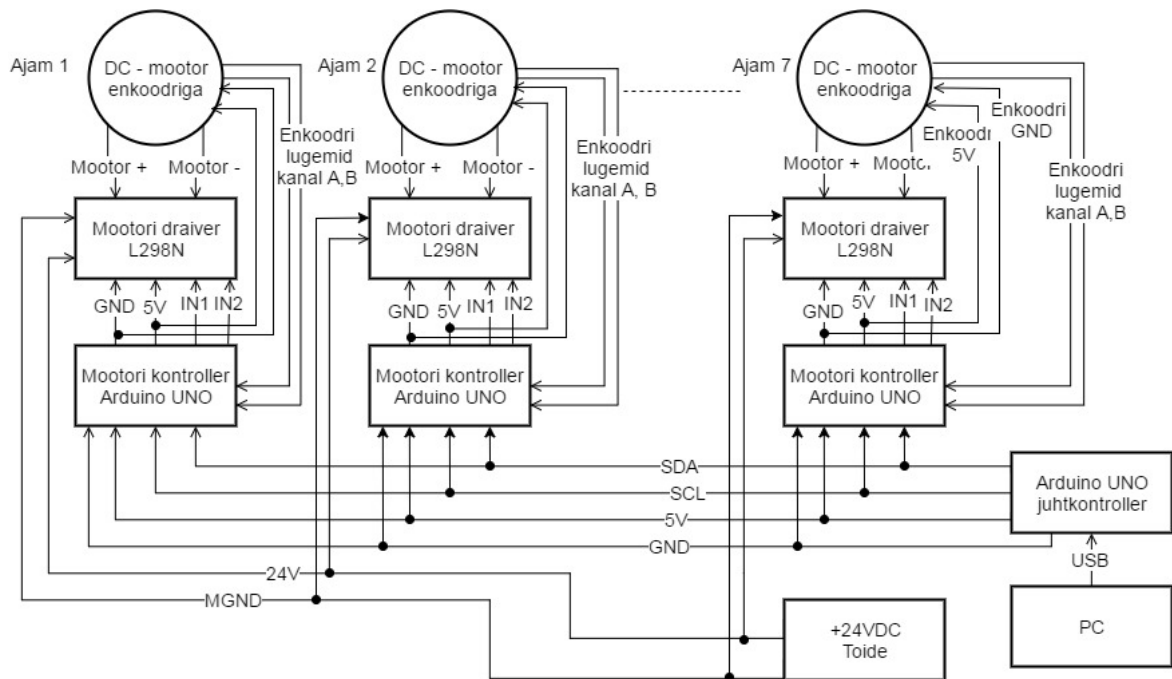
Sele 5.5 Arduino UNO mikrokontroller

5.3. Riistvara ühendamine

Mootori kontrolleri (Arduino UNO) ja mootori draiveri omavahel ühendamine on väga lihtne: draiveril on 8 viiku, mis on mõeldud Arduinoga ühendamiseks: 1 – GND, 2 – 5 V (toide draiverile), 3 – mootori A aktiveerimine (digitaalväljundisse), 4,5 – IN1, IN2

(mootori pöörlemissuuna defineerimine), 6-8 – on mõeldud teise mootori juhtimiseks. Ajami mootori „+“ ja „-“ ühendatakse mootori draiveri väljundisse, enkoodri kanalid A ja B Arduino digitaalsisenditesse, enkoodri toide (+5 V) ja GND Arduino vastavatesse viikudesse.

Mootori kontrollid ühendatakse juhtkontrolleriga. Ühendusteks on 5 V toide ja GND, lisaks SDA ja SCL andmeedastuskanalid. Mootoritele antakse välise toiteallika abil 24 V toidet. Plokkskeem on kujutatud Selet 5.6.



Sele 5.6 Juhtimise blokk skeem

6. AUTOMAATSE HÄÄLESTUSSEADME 3D MUDEL

Peatükis 4 kirjeldati klambri lahendust ja klambri kinnitamist Z-profili külge. Käesolevas peatükis kirjeldatakse ja esitatakse tulemus, kuidas komponentidest moodustati terviklik häälestusseade.

6.1. Ajami ja klambri integreerimine

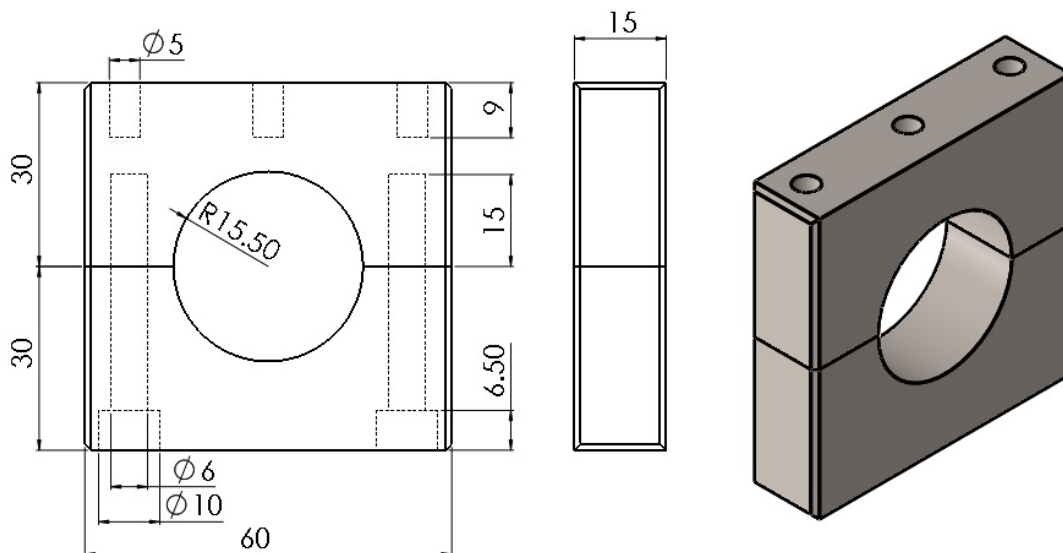
Klambri ülesanne on paneel häälestusseadme külge fikseerida, seega on vajalik, et klamber hoiab paneeli kinni, aga samas reguleerides ajamiga, peab klamber liikuma paneeliga kaasa. Selle lahendamiseks kasutan lineaarvõlle ja lineaarlaagreid (Sele 6.1). Lineaarlaagrid tagavad võlli pikaajalise vastupidavuse. Valitud sai flantsidega lineaarlaagrid, mida on mugav kinnitada. Võlli üks ots, mis kinnitub klambri külge on keermestatud M5 (klambril on M5 keermestatud avad) võlli läbimõõt on Ø8 mm. Ajami eestpoolt kinnitamiseks on samuti mitmeid võimalusi. Detailile, mille külge kinnitub klamber ja millel on eesküljel juhik avas tsentreerimiseks, puuritakse ava, kuhu on võimalik keermega kinnitada ajami kolvivors, mis on otsast keermestatud. Kuna kolvivors ei pöörle, siis ei nihku kolvivors paigast.



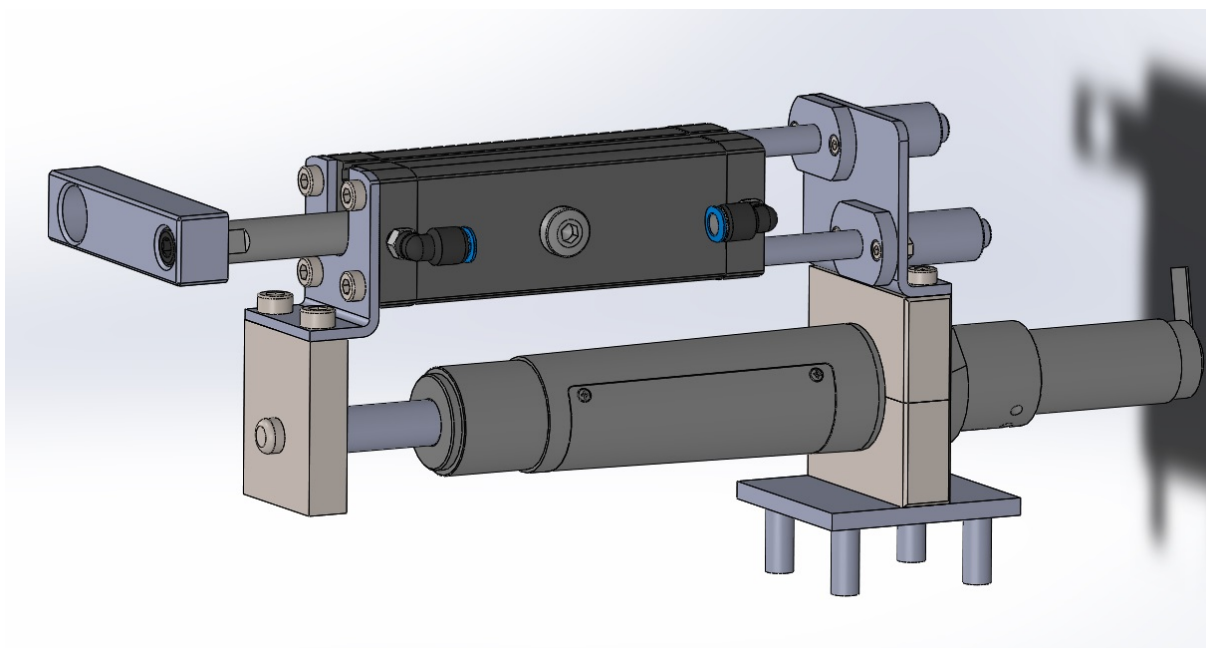
Sele 6.1 MISUMI lineaarlaager pukiga ja võll keermestatud otsaga

Ajami mõõteraamile kinnitamiseks on ajamil ettenähtud spetsiaalne pind, mille läbimõõt on 31 mm ja paksus 15 mm. Kinnitamiseks kasutatakse kahte detaili, mis ühendatakse kahe M6 poldiga (Sele 6.2). Ülemisel poolel, kokkupuute pinnal on umbesd avad

keermestatud. Ülemisel detailil on 3 ava, kuhu kinnituvad M5 poltidega linearseite laagrite hoidmiseks nurkdetail. Täpsemalt on häälestusseadme (Sele 6.3) osad näha lisas olevast kooste joonisest.



Sele 6.2 Ajamikinnitus



Sele 6.3 Automaatne häälestuseade

7. PROJEKTI MAKSUMUS JA TASUVUSANALÜÜS

Häälestussüsteemi investeringu maksumus on koondatud tabelisse (Tabel 7.1). Hinnale on lisatud lahter arendus ja ootamatute kulutuste kohta, mille tekkimist ja suurust ei osata praeguses faasis ette näha. Projekti hinnaks kujuneb u 28000€.

Tabel 7.1 Projekti hinnatabel

Jrk	Pakkuja	Mudel	Kogus, tk	Tüki hind, €	Kokku hind, €
1	Monospektra	Lineaarne ajam PI-MA35	7	3200	22400
2	Festo	Pneumaatiline klamber CL-25-20	7	272,97	1910,79
3	Festo	5/2 suunaventiil VOVGM32U	1	80,52	80,52
4	Festo	Filter-regulaator MS4-LFR	1	83,04	83,04
5	DX	L298N toitemuundur	7	2,74	19,18
6	DX	Arduino UNO	8	7,44	59,52
7	Oomipood	Toitemoodul 100..240VAC/24VDC	1	27	27
8	Oomipood	Kaablid	1	30	30
9	MISUMI	Lineaarlaager C - LHFCW8	14	5,09	71,26
10	MISUMI	MISUMI lineaarvõll PSSFUN8-90-F16-B14-PMC5	14	17,53	245,42
11	Baltic Bolt	Kinnitusvahendid	1	30	30
12	Allhankija	Erinevad detailid	1	800	800
13	-	Arendus- ja ootamatud kulud	1	1500	1500
					27256,73

Selleks, et tasuvust arvutada, peab olema sisend, millest lähtuda. Siinkohal võetakse sisendiks teoreetiline ajavõit (Tabel 7.2), mis on arvutatud paneeli mõõtmist monitoorides saadud tulemustest.

Tabel 7.2 Automaatse lahendusega teoreetiliselt saavutatav ajavõit

Kirjeldus	Arvutamine
Keskmine ajavõit*	13,2 minutit
Keskmine mõõtmisaeg*	32,2 minutit
Tööpäevas teoreetiliselt mõõdetav paneelide kogus	$n = 8 \text{ h} / \text{keskmine mõõtmisaeg} = 8 \times 60 \text{ min} / 32,2 = 14,9 \approx 14 \text{ tk}$
Päevane teoreetiline ajavõit	$t = \text{teoreetiline mõõdetav paneelide arv} \times \text{keskmine ajavõit} = 14 \times 13,2 = 184,8 \text{ min} \approx 3 \text{ h}$

* Tulemused pärinevad esimese peatükis vaatlustulemusena mõõdetud aegadest (Tabel 1.3).

Esimene kõige lihtsam võimalus tasuvust analüüsida on võtta operaatori töötunni maksumus ja korrutada see läbi võidetud tundidega. Võtame operaatori tunni maksumuseks 8€/h bruto, mis teeb töandjale tööjõukuluks 10,7€/h. Eelnevalt arvutatud teoreetilise ajavõidu korral, milleks on 3h päevas, saame $10,7 \times 3 = 32,1\text{€}$ päevas. Aastas on keskmiselt 250 tööpäeva ehk aastane tasuvus $32,1 \times 250 = 8025\text{€}$ jagades nüüd projekti maksumuse aastase tööjõukulu võiduga saame projektitasuvuse ajaks umbes 4 aastat. Siinkohal ei ole arvestatud, et töötaja kasutab oma töös kõrgtehnoloogilisi vahendeid, milleks on fotogramm-meetria seadmed. Fotogramm-meetria mõõtmise teenuse hind koos varustuse ja operaatoriga on tunduvalt kõrgem kui pelgalt operaatori tunnihind, seega on võimalik ka sel moel tasuvust hinnata, võttes teenuse müügihinnaks 40€/h tasub projekt ennast ära 1 aastaga.

Tegelikkuses on projekti tasuvuse arvutamine palju keerukam, kui eelpool toodud lihtsad arvutused, sest need ei võta arvesse mitmeid olulisi parameetreid. Paneelide mõõtmise kiirus ja päevas mõõdetud paneelid on ettevõttele olulised veel selletõttu, et see on operatsioon enne ettevõtte pudelikaela, milleks on värvimine. Ettevõttel on värviruumi maht piiratud ja ei saa teha korrektseid plaane, kui mõõtmisega maha jäädakse ei saa

värviruumi täielikult täis või kui oodatakse kuni paneelid mõõdetud saavad, siis on midagi muud värvimises ja tekib jälle viivitus. Kliendile õige aegse ja kiire tarne tagamist on raske rahaliselt vääringsusse panna, aga see on komponent, mis viib järgmise tellimuseni. Seega võib projekti hinnata igal juhul ettevõttele kasulikuks ja tasuvaks, sest paneelide mõõtmise aja määramatust on võimalik tunduvalt vähendada.

8. TULEVIKU ARENDUSTEGEVUSED

Bakalaureuse lõputöö maht ja lõputöö tegemise aeg on piiratud, seega leidub mitmeid suundi ja tegevusi, mida käesolevas lõputöös ei käsitletud ning kuhu poole saab süsteemi edasi arendada.

8.1. Prototüübi ehitamine

Käesolevasse lõputöösse ei mahtunud ajapuudusel prototüübi ehitamine ja seega võiks esimeseks edasiseks sammuks olla prototüüp stendi loomine, kus kasutatakse odavaid ja väikeseid enkoodritega DC mootoritega lineaarseid ajameid või ise koostada enkoodriga mootoriajam ning lisada juhtkruvi. Sellise odava süsteemi loomine võimaldab valmis kirjutada juhtimistarkvara ja seda testida.

8.2. Kompaktsema juhtimissüsteemi disain ja tervikliku tarkvara loomine

Loodud süsteem eeldab mitmeid tarkvaralisi lahendusi. Tarkvara on vaja luua arvutile, mis V-Stars programmilt saadavat informatsiooni töötleb. Juhtkontrollerile tarkvara, mis saadab info mootorikontrolleritesse. Mootorikontrolleritele tarkvara, mille abil toimub häälestamine. Mugava ja töökindla tarkvara loomine on kindlasti üks suund, kus projekti on võimalik edasi arendada.

Lõputöösse ei mahtunud ka elektroonikale korraliku paigutuse, korpuste jm valik ning projekteerimine. On valitud küll komponendid ja selgitatud nende kasutamist ning ühendamist, kuid täpset paigutust ei projekteeritud. Võimalik on disainida näiteks trükkplaat, mis asendaks mootori juhtimisel kahte plaati või kasutada tööstuskontrollereid, mis on tavaliselt juba korpuses.

8.3. Juhtmevaba süsteemi arendamine

Lõputöö lahendus ja ka teised praeguse süsteemi komponendid eeldavad erinevaid kaableid ja tegevusi, mis võiksid töötada juhtmevabalt. Üheks elemendiks on kaameras kasutatav mälukaart, mida operaator käsitsi kaamerast arvuti kaardilugejasse teisaldab. Kui mälukaart oleks nt *WiFi* valmidusega on võimalik luua süsteem, kus peale pildistamist kaamera ja V-Stars suhtlevad oma vahel automaatselt ning jääb ära veel üks viivitust tekitav ja ebamugav tegevus. Kaameras on kasutusel *Compact Flash* (CF) mälukaart, levinum ja soodsam võimalus on osta *WiFi* -t toetav SD kaardi adapter ja selle kaudu tekitada võrk, sest CF tüüpi *WiFi* -ga mälukaardid on vähe levinud ja kõrge hinnaga.

KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli välja arendada automaatne satelliitsideantenni paneelide häälestussüsteem fotogramm-meetria mõõteraamile. Kuna valdkond on spetsiifiline, siis esimeses peatükis kirjeldati mõõteobjekti e reflektorpaneele, esitati kasutuses oleva süsteemi miinused ning määratleti loodava objekti põhiparameetrid, millest projekteerimise ja arenduse käigus kinni pidada.

Suurte satelliitsideantennide tootjaid ei ole maailmas palju, seega puudub avalik informatsioon selle kohta, milliseid paneelide häälestamise lahendusi kasutatakse. Teises peatükis tuuakse küll näiteid kogu reflektori häälestamisest, kuid olemasolevad lahendused on samuti mehaanilised nagu Vertexis kasutatav süsteem. Nõutud täpsuse poolest võib enim paralleele tõmmata mikropositsioneerimisega.

Häälestussüsteemi väljatöötamist alustati paneeli kinnitamisest mõõteraamile. Analüüsi erinevaid võimalusi, kuidas paneeli kinnitada. Võrreldi läbi ava ja ilma avata kinnituvaid lahendusi, toodi välja erinevate lahenduste plussid ja miinused. Vastavalt püstitatud eesmärgile lahendati kinnitamine läbi paneeli taga asuva Z-profiili ava, mis võimaldab paneeli töödelda ühe töökäiguna ja ei ole vajadust paneeli uuesti tootmisalasse tagasi viia. Majanduslikust printsiibist lähtuvalt ei osutunud valituks täisautomaatsed valmis lahendused, vaid konstrueeriti lahendus kasutades pneumaatilist klambrit.

Paneele häälestatakse mõõteraamil ühes kindlas suunas, seega valiti täituriks lineaarne ajam. Töös antakse ülevaade erinevat energialiiki kasutatavatest lineaarsetest ajamitest, võrreldakse neid süsteemi võtmeparameetritest lähtuvalt ja sellele tuginedes valitakse elektriline lineaarne ajam. Turult saadaval olevatest variantidest valiti välja sobivaim ajam vastavalt häälestustäpsusele ja mõõtmetele.

Süsteemi juhtimise lahendamiseks analüüsi kahte võimalust, millest üks on kasutada valmistarkavara koos mootorikontrolleriga ajamitootjalt, teiseks soodsamaks lahenduseks, mida käsitleti, on võimalus teostada juhtimine arendusplaatidega. Riistvara hinna vahe on ligikaudu 40 korda ning kuna tootja pakkus ainult mootori juhtimiseks kontrollerit, siis

pakuti välja terviklik juhtimislahendus toetudes Arduino arendusplaatidele, valiti komponendid, andmeedastus viis ning loodi juhtalgoritm.

Automaatset häälestussüsteemi analüüsi majanduslikust seisukohast ning jõuti selgusele, et olenevalt tasuvuse arvutamise meetodikast tasub süsteem ennast ära 1-4 aastaga. Ettevõttes tasub süsteem ennast seega kiiresti ära, lisaks on see ettevõttele äärmiselt kasulik seetõttu, et kaob ära mõõtmisprotseduurist palju määramatust, mis võimaldab teha täpsemaid plaane ja pakkuda kliendile paremat tarneaega ja tarnekindlust.

Valdkonna spetsiifika ja bakalaureusetöö piiratud mahu tõttu jäid mitmed teemad lõpuni lahendamata, nendest on juttu töö kaheksandas peatükis. Lõputöö teemaga on võimalik jätkata magistriõppes, ehitades valmis prototüüplahendus ning luua terviklik tarkvara kogu süsteemile.

SUMMARY

The aim of this thesis was to develop a tuning system of the automatic satellite antenna panels for a photogrammetric measurement frame. Since the area is specific, the first chapter described the measurement object a reflector panel, it presented disadvantages of the current systems and identified the main parameters of the created object, which detained the course of the design and development process.

There are not many manufacturers of the large satellite communication antennas in the world, so there is no public information about what solutions of the panels tuning are used. Although the second chapter of the work brought some examples about the tuning of the total reflector, but the existing solutions are also mechanical such as the Vertex system. In terms of the required accuracy, most of parallels can be drawn with micro-positioning.

Development of the adjusting system started with the fastening of the panels for the measurement frame. Different possibilities for fastening the panels were analyzed. The apertured and non-apertured fastening solutions were compared, pointing out the advantages and disadvantages of different solutions. In accordance with the set goals, the following solution was founded: fastening through the aperture of the Z-profile, which is located on the back of the panel, allowing the panel to be processed in one pass and there is no need to bring back the panel to re-production sphere. Based on the economic principle, fully automated turnkey solutions were not chosen, but there was constructed the solution using a pneumatic clamp.

The panels are tuned in the measurement frame in a certain direction, thus, a linear drive was chosen as an actuator. The work provides an overview of various types of energy, using the linear actuators. The work compares different types of linear actuators based on the key parameters of system and regarding to this, the electric linear actuator was chosen. The most suitable actuator out of all available on the market, was selected in accordance with the adjusting accuracy and dimensions.

Two options were analysed for resolving the system control, one of which is used with a ready software with motor controllers from the manufacturer of the actuators, and second, more favourable solution, as discussed, is the opportunity to use development boards. Hardware price difference is in about 40 times, and since the manufacturer offers the only controller to control the motor, it was offered a comprehensive controlling solution based on the Arduino development boards, also the components were selected, the data transmission method and control algorithm was established.

The Automatic tuning system was analysed from the economic point of view, and it became clear that, depending on the methodology for calculating the return, the system will pay itself off in 1-4 years. The system pays itself off quickly in the company, and in addition, this is extremely beneficial for to the company, because it fades away a lot of uncertainty in measurement procedures, which will allow to make more accurate plans and will offer the customer a better delivery time and security.

Due to the specifics of the field and limited volumes of the bachelor's thesis, some issues remained unresolved till the end, and they are discussed in the eighth chapter of the work. There is a possibility to continue studying the topic of the research in MBA, building a ready prototype solution and to create a comprehensive solution for the entire software system.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] R. Cammack, T. K. Attwood, P. N. Campbell, J. H. Parish, A. Smith, J. L. Stirling, F. Vella, „Oxford Dictionary of Biochemistry and Molecular Biology (2nd Edition)", Oxford University Press, 2006, lk 594.
- [2] „About GSI," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.geodetic.com/about-gsi.aspx>. [Kasutatud 05.03.2017].
- [3] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle ja I. Harley, „Close Range Photogrammetry - Principles, techniques and applications", Dunbeath: Whittles Publishing, 2011, lk. 164.
- [4] J. M. Usoff, M. T. Clarke, C. Liu ja M. J. Silver, „Optimizing the HUSIR Antenna Surface," kd. 21, nr 1, lk. 83-95, 2014.
- [5] G. Zhou, X. Li, D. Li, J. Luan ja J. Zhao, „Surface accuracy of a large-scale compact antenna test range considering mechanism, metrology and alignment," *Measurement Science and Technology*, kd. 25, nr 7, lk. 1-3, 2014.
- [6] R. Rekowski, „Micropositioning Meets Mechatronics," *Motion System Design*, kd. 10, lk. 42-44, 2007.
- [7] „Welker Pin Clamps," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.welkerproducts.com/pinclamps.php>. [Kasutatud 18.03.2017].
- [8] „BTM Pin Locator Clamps," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.btmcorp.com/pin-locator-clamps.html>. [Kasutatud 18. 03.2017].
- [9] „Series PLKD Clamps," [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.phdinc.com/product/?product=clamps&series=plkd#General>. [Kasutatud 18.03.2017].
- [10] „C(L)KQG*, Pin Clamp Cylinder, Built-in Standard Magnet," [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://www.smcusa.com/products/C\(L\)KQG-Pin-Clamp-Cylinder-Built-in-Standard-Magnet~36064](http://www.smcusa.com/products/C(L)KQG-Pin-Clamp-Cylinder-Built-in-Standard-Magnet~36064). [Kasutatud 18.03.2017].
- [11] C. Gonzales, „What's the Difference Between Pneumatic, Hydraulic, and Electrical Actuators?" , *Machine Design*, 16. 04. 2015.
- [12] „Electro-Mechanical vs. Hydraulic & Pneumatic Actuators," INTELLIGENT

MOTION CONTROL LIMITED, [Võrgumaterjal]. Saadaval:
http://www.inmoco.co.uk/electro-mechanical_vs_pneumatic_actuators. [Kasutatud
01.04.2017].

[13] National Instruments, „Encoder Measurements: How-To Guide,“ National
Instruments, 03.03.2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval:
<http://www.ni.com/tutorial/7109/en/>. [Kasutatud 12.04.2017].

[14] J. Valdez ja J. Becker, „Understanding the I2C Bus,“ Texas Instruments Incorporated,
2015.

LISA 1 HÄÄLESTUSSEADME KOOSTEJOONIS