

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi õppekavade

lõputöö ülesande vorm
Kinnitatud instituudi nõukogu poolt 17.06.2022

**TAL
TECH**
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

**METALLIVABA AJAM JA ASENDI TAGASISIDE
ELEKTROMAGNETILISELT LÄBIPAISTVALE
KATSE-PÖÖRDLAUALE**

**NON-METALLIC DRIVE AND POSITION MONITORING
SYSTEM FOR AN ELECTROMAGNETICALLY
TRANSPARENT TEST-TURNTABLE
BAKALAUREUSETÖÖ**

Üliõpilane: Naatan Johannes Bender

Üliõpilaskood EAAB185506

Juhendaja: Lauri Kütt, vanemlektor

Tallinn 2023

(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.

“ 18.05.2023 ”

Autor: Naatan Johannes Bender

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

“ 18.05.2023 ”

Juhendaja: Lauri Kütt

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”20..... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Naatan Johannes Bender

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Metallivaba ajam ja asendi tagasiside elektromagnetiliselt läbipaistvale katsepöördlauale, mille juhendaja on Lauri Kütt,

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.

18.05.2023

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 loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Naatan Johannes Bender

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Metallivaba ajam ja asendi tagasiside elektromagnetiliselt läbipaistvale katse-pöördlauale

Kuupäev:
18.05.2023

39 lehekülge

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): vanemlektor Lauri Kütt

Töö konsultant (konsultandid):

Sisu kirjeldus:

Antud lõputöö eesmärgiks oli töötada välja metallivaba juhtimise ja jälgimisega pöördlaud elektromagnetresonants katsete läbiviimiseks. Töö käigus tutvuti asjakohaste standarditega ning disainiti nendest lähtuvalt mõõtmistele võimalikult läbipaistev pöördlaud. Pöördlaua konstruktsiooni disainimiseks kasutati Autodesk Inventor programmi. Disainitud elementide materjalideks kasutati akrüülklaasi ja vineeri.

Järgmise osana lahendati pöördlaua pööramist, kasutades metalli- ja vedelikuvabasisid lahendusi. Selleks prinditi välja 3D printeriga mootor, millel leiti spetsifikatsiooni määramiseks moment ja pöörlemiskiirus. Arvestades laboris, kuhu lahendust kavandati, olevaid vahendeid määrati mootori võimalik dimensioneerimise tegur. Seejärel leiti platvormi pööramiseks vaja oleva momendi hulk ning platvormi pööramiseks vaja olev hammasratasülekande tegur.

Kolmanda osana lõputööst lahendati pöördlaua pööramisel asenditagasiside saamist. Taas ei olnud võimalik kasutada selleks standardseid lahendusi ning töös võeti kasutusele x- ja y-telje suunas asendimuutust mõõtev kolbsüsteem. Kolbsüsteem töötab suruõhu põhimõttel, kus anduri abil on võimalik mõõta asendi muutusest tulenenud mõõteseadmes toimunud rõhu muutust. Teades mõõteseades maksimaalse ja minimaalse muutusega kaasnevat rõhku, on võimalik siinus-koosiinus põhimõtte abil leida toimunud asendi muutus.

Antud töös ilmnes, et pneumomootor võiks olla sobiv lahendus pöörlemise saavutamiseks. Selline mootori saavutab hästi töös ette nähtud kriteeriume. Asendi tagasiside osas on vaja teha lisa katsetusi, et muuta süsteemi täpsemaks. Võimalusel uurida veel otsida lahenduseks optilisi sensoreid.

Märksõnad: Pneumaatiline mootor, asendi tagasiside, AutoCAD Inventor, elektromagneetiline ühilduvus, arduino

ABSTRACT

| | |
|--|--|
| <i>Author:</i> Naatan Johannes Bender | <i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis |
| <i>Title:</i> Non-metallic drive and position monitoring system for an electromagnetically transparent test-turntable | |
| <i>Date:</i> 18.05.2023 | 39 pages |
| <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> Senior lecturer Lauri Kütt | |
| <i>Consultant(s):</i> | |
| <i>Sisu kirjeldus:</i> | |
| <p>The goal of the thesis was to work out a non-metallic control and monitoring system for testing electromagnetic compatibility. Standards were consulted and were taken into account, while designing the CAD model in Autodesk Inventor for the turntable. Acrylic glass and plywood were used as materials for the details.</p> <p>The second part of the thesis was turning the turntable using metal and fluid free systems. A 3D printed pneumatic engine was used for this purpose. The moment and rotation speed of the engine was found through testing the engine. Then the amount of moment needed for turning the turntable was measured and through that the power transmission ratio was calculated.</p> <p>The third part of the thesis was controlling the position of the turntable. This was also a non-standard solution. A pneumatic system was used for the purpose of finding the position. A piston system was used to tell the changing of the turntables position in the x and y axis. The piston system works with pneumatics and is capable of measuring the pressure changed caused by the turning of the table. A system of sinus-cosinus can be used to calculate the current position.</p> <p>The printed pneumatic engine could be a fitting solution, taking into account the set limitations for the system, to solve the turning action for the table. The system used for measuring the position of the turntable could still be improved as the system is still too innaccurate. Having a second look at optical sensors for this problem is reccommended.</p> | |
| <i>Keywords:</i> Pneumatic engine, position monitoring system, , AutoCAD Inventor, EMC compatibility, arduino | |

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

| | |
|--|--|
| Lõputöö teema: | Metallivaba ajam ja asendi tagasiside elektromagnetiliselt läbipaistvale katse-pöördlauale |
| Lõputöö teema inglise keeles: | Non-metallic drive and position monitoring system for an electromagnetically transparent test-turntable |
| Üliõpilane: | Naatan Johannes Bender, EAAB185506 |
| Eriala: | Elektroenergeetika ja mehhatroonika |
| Lõputöö liik: | bakalaureusetöö |
| Lõputöö juhendaja: | Lauri Kütt |
| Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt) | |
| Lõputöö ülesande kehtivusaeg: | 2023 kevad |
| Lõputöö esitamise tähtaeg: | 18.05.2023 |

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

TalTechis on elektromagnetilise ühilduvuse kontrolltestimiseks kamber, kuid hetkel ei ole kambris testide läbi viimiseks vajalikku tugi- ja kaitsevahendust. Tugi- ja kaitsevahendus peab olema testi mitte mõjutav, st elektromagnetväljade jaoks läbipaistev, katsete sooritamiseks peab võimaldama pöörata katsetatavat seadet horisontaalteljes.

2. Töö eesmärk

Lõputöö eesmärgiks on kujundada ajamiga platvorm, mis on elektromagnetlainete testimise katse jooksul elektromagnetväljade jaoks täiesti läbipaistev, kandevõimega vähemalt 50 kilogrammi ning võimaldaks katse ajal seade pööramist horisontaalteljel.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Platvormi liikumise analüüs ja pööramismehhanismide kavandamine

Platvormi pööramise ajami kujundamine

Platvormi tagasiside ja juhtimise võimaldamine

4. Lähteandmed

Normdokumendid ja asjakohane kirjandus

Standard Multimeediaseadme elektromagnetiline ühilduvus. Kiirgusnõuded

Standard Electromagnetic compatibility - Requirements for household appliances, electric tools and similar apparatus - Part 1: Emission

5. Uurimismeetodid

Parimate praktikatega tutvumine normdokumentidest ja kirjandusallikatest

Ruumiline modelleerimine ja analüüs

Koostatud lahenduse analüüs ja katsetamine

6. Graafiline osa

CAD mudel laua disainist

Lõputöö sisaldab graafikuid ja skeeme

Olulisemate jooniste, tabelite või skeemide loetelu. Kas graafiline osa on peamiselt töö põhiosas või läheb ka lisadesse?

7. Töö struktuur

1. Sissejuhatus

1.1 Vajadused (standardid, kamber + mõõtmed)

1.2 Näited

1.3 Lähtespetsifikatsioon

2. Platvormi elemendid ja omadused

2.1 Platvormi ülevaade

2.2 Pöörlemise ressursi määramine

2.3 Pöördmehhanismi kavandamine

3. Pöörlemisajami kujundamine

3.1 Pneumomootori ehitus

3.2 Pneumomootori juhtimine

3.3. Suruõhu vajadus ja suruõhusüsteemi kirjeldus.

4. Platvormi asendi tagasiside.

4.1 Asendi mõõtmise võimalused – mitteelektriline

4.2 Siinus-koosinuspõhimõte.

4.3 Võimalik mehhaaniline kompositsioon.

5. Katsetamine

5.1 Valmis platvormi pööramine, momendi kontroll

5.2 Pneumomootori kontroll

6. Tulemuste kirjeldamine

7. Järeldused

8. Kasutatud kirjanduse allikad

- [1] E. p. j. E. L. nõukogu, „Euroopa Liidu EMÜ direktiiv,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/HTML/?uri=CELEX:32014L0030>. [Kasutatud 02 04 2023].
- [2] „EMÜ standard,“ Eesti standardiseerimis- ja akrediteerimiskeskus, 15 01 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-55032-2015-a11-a1-2020-consolidated>. [Kasutatud 15 03 2023].
- [3] „Mootori silindri mõõtmete juhised,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://x-engineer.org/engine-piston-cylinder-parameters/>. [Kasutatud 25 04 2023].
- [4] „Pneumaatika juhend,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ato.com/how-does-a-pneumatic-motor-work>. [Kasutatud 02 05 2023].
- [5] „Laboris kasutatava kompressori datasheet,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mgfcompressors.com/industrial/lubricated-silent-compressors/silent-lubricated-50-lt/sil-eol-24-50-1.html>. [Kasutatud 05 05 2023].
- [6] [Võrgumaterjal]. Available: <https://sixsigmastudyguide.com/iddov-identify-define-develop-design-optimize-verify-validate/>. [Kasutatud 2022].
- [7] „economy-pedia,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://et.economy-pedia.com/11032523-kano-model#menu-2>. [Kasutatud 14 04 2022].
- [8] J. S. Oakland, Terviklik kvaliteedijuhtimine, 2006.
- [9] „FastPCBA,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.cnfastpcb.com/info/clean-circuit-boards-31986196.html>. [Kasutatud 14. 03. 2022].
- [10] „WHAT IS QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://asq.org/quality-resources/qfd-quality-function-deployment>. [Kasutatud 12. 04. 2022].
- [11] „Quality Function Deployment (QFD),“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://quality-one.com/qfd/>. [Kasutatud 12. 04. 2022].
- [12] M. Eaton, The lean practitioner's handbook, 2013.
- [13] L. S. Sterling, The Art of Agent-Oriented Modeling, London: The MIT Press, 2009.
- [14] „Multimeediaseadme elektromagnetiline ühilduvus. Kiirgusnõuded,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-55032-2015-a11-a1-2020-consolidated>.

- [15 „Electromagnetic compatibility - Requirements for household appliances, electric tools and similar apparatus - Part 1: Emission,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iec-55014-1-2021>. [Kasutatud 17 04 2023].
- [16 „Mõõtsiteks kasutatud sensori datasheet,“ honeywell, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tme.eu/Document/6429863a00649a3c0ae15d32e0500d50/ABP2%20Series%20Datasheet%20-%20Issue%20C.pdf>. [Kasutatud 01 05 2023].
- [17 „Mõõtmisel pinge muundamiseks kasutatud releemoodul,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.oomipood.ee/product/oky3013_2_5v_4_channel_relay_module_with_op_tocoupler_1. [Kasutatud 20 04 2023].
- [18 „Mõõtmisteks kasutatud releemoodul,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.oomipood.ee/product/oky3013_2_5v_4_channel_relay_module_with_op_tocoupler_1. [Kasutatud 03 05 2023].

9. Lõputöö konsultandid

Vajadusel konsultantide nimed ja töö osad, mille juures abi saadakse.

10. Töö etapid ja ajakava

Teemakohase kirjandusega tutvumine (01.02.2023)

Kontseptsiooni paika panemine (20.02.2023)

Teoreetilise osa kirjutamine (09.04.2023)

3D mudeli disain ja analüüs (14.04.2023)

Pneumaatilise lahenduse disain ja analüüs (21.04.2023)

Disainiprotsessi kirjeldamine (23.04.2023)

Lahenduse kokku panemine (30.04.2023)

Tulemuste kirjeldamine (05.05.2023)

Järelduste kirjutamine (09.05.2023)

Kokkuvõtte koostamine (09.05.2023)

Esimene variant tööst valmis (10.05.2023)

Töö lõplik versioon (15.05.2023)

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöörde

SISUKORD

| | |
|---|----|
| 1 SISSEJUHATUS..... | 13 |
| 1.1 Vajadused | 14 |
| 1.2 Näited..... | 15 |
| 1.3 Lähtespetsifikatsioon | 16 |
| 2 PÖÖRDLAUA ELEMENDID JA OMADUSED | 18 |
| 2.1 Pöördplatvormi ülevaade | 19 |
| 2.2 Pöörlemise ressursi määramine | 22 |
| 2.3 Pöördmehhanismi kavandamine..... | 22 |
| 3 PÖÖRLEMISAJAMI KUJUNDAMINE | 24 |
| 3.1 Pneumomootori ehitus | 24 |
| 3.2 Mootori karakteristikute määramine | 26 |
| 3.3 Pnemomootori dimensioneerimine..... | 27 |
| 3.4 Ülekandeahela hinnang..... | 29 |
| 3.5 Pneumomootori juhtimine | 30 |
| 4 PLATVORMI ASENDI TAGASISIDE | 31 |
| 4.1 Asendi mõõtmise võimalused – mitteelektriline | 31 |
| 4.2 Siinus-koosinus põhimõte..... | 32 |
| 4.3 Pneumaatiline asendi tagasiside | 33 |
| 4.4 Mõõtevahendi katsetamine | 35 |
| 4.5 Mõõtmiste tulemuste analüüs | 36 |
| 5 TULEMUSTE KIRJELDAMINE | 37 |
| 6 Kokkuvõte | 38 |
| KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU | 39 |

EESSÕNA

Lõputöö teema sai valitud juhendaja pakutud teemade hulgast.

Lõputöö autor avaldab tänu Andres Aleksander Kasele, kes oli autorile nii nõu, jõu kui ka motiveerimisega abiks. Tänu avaldatakse ka juhendajale Lauri Küttile, kes aitas lõputöö teema valikul ning oli töö valmimisel abiks.

1 SISSEJUHATUS

Tänapäeval on raske elu ilma elektroonika ja nutiseadmeteta ette kujutada, mis meid pea igal sammul ümbritsevad. Elektroonikast on saanud igapäevane osa meie ühiskonnas - me kasutame telefone, vaatame televiisoreid ning kanname käel nutikella, mis jälgib meie igat liigutust. Olgu eesmärgiks meid maailmaga ühendada, meelt lahutada või kuidagi meie elu lihtsamaks muuta, on elektroonikast saanud suur osa meie igapäevategemistest.

Elektroonika seadmed peavad toimima selliselt, et need ei häiriks oma tööga teisi seadmeid enda ümber ning nad ise ei oleks liiga lihtsalt häiritud teiste seadmete tööst. Selliseid kriteeriumeid koondab valdkond, mida nimetatakse „elektromagnetiliseks ühilduvuseks“. Ühilduvuse tagamiseks toimub regulatiivne ohje kahel tasandil: 1) kasutatav seade ei tohi emitteerida kindlaks määratud tasemest kõrgema intensiivsusega elektromagnetvälju; 2) kasutatav seade ise on häiringukindel vähemalt kindlaks määratud tasemega elektromagnetväljadele. Tasemed nii emissiooni kui häiringukindluse kirjeldamiseks määratakse kindlaks kiirguse intensiivsust erinevatel sagedustel mõõtes ning seadmele mingi tugevusega elektromagnetvälja rakendamisel talitluse pidevust monitoorides.

Elektromagnet kiirguse mõõtmistel tuleb tagada testide korratavuse, täpsuse ja jälgitavuse kriteeriumid. Usaldusväarsuse saavutamiseks mõõteseadmeid kalibreeritakse ja katsetustingimused on võimalikult ühetaolised. Selleks on rahvusvaheliselt seatud kindlad standardid elektromagnetkiirguse parameetrite mõõtmiseks. Neid on välja andnud rahvusvahelised organisatsioonid nagu *International Electrotechnical Commission (IEC)*, *Federal Communications Commission (FCC)*, CENELEC jt.

Tagamaks toodete vastavust elektromagnetilise ühilduvuse nõuetele, viivad elektroonika tootjad läbi teste majas sees ning seejärel saadavad tooted akrediteeritud laboritesse testimisele. Testide läbiviimise eest vastutab elektroonika tootja ning testide tulemusena saadakse raport, kas toode vastab esitatud nõuetele.

Igapäeva elektroonika testimine on tähtis, et tagada ohutus toodete kasutamisel. Jälgides rahvusvahelisi standardeid ning viies läbi teste toodete ohutuse määramiseks, saavad tootjad tagada tarbija ohutuse. Tarbijal on samuti kohustus veenduda, et tema ostetud seade vastab elektromagnetilise ühilduvuse standarditele. Käesolev töö keskendub komponentidele, mida rakendades on võimalik elektromagnetilise ühilduvusega seotud katsetuste läbiviimiseks parima praktika kohaselt.

1.1 Vajadused

Euroopa Parlament ja nõukogu on jõustanud elektromagnetilise ühilduvuse regulatsiooni direktiivi 2014/30/EL. Direktiivi eesmärgiks on elektromagnetiliste häiringute vastane kaitse ühtlustada kõigis liikmesriikides ning kindlustada elektri- ja elektroonikaaparatuuri vaba liikumine, vähendamata seejuures põhjendatud kaitsetaset liikmesriikides. Antud direktiivi alusel kehtestati kohustused elektroonika tootjatele, importijatele ja levitajatele, nimetades kohustused kontrollimaks seadme vastavust EMÜ (elektromagnetilise ühilduvuse) harmoneeritud standarditele. [1].

Elektromagnetilise ühilduvuse kriteeriumide kohaselt ei tohi uus elektriseade emiteerida üheski geomeetrilises suunas sellisel määral EM-kiirgust, mis ületaks toote jaoks asjakohases standardis nimetatud intensiivsuse tasemeid. EM-kiirguse intensiivsuse kontrollimiseks teostatakse katsetused, kus seatakse üles mõõteantenn ja teatud kaugusele katsetatav seade. Üldiselt on antenni keeruline liigutada, sest igas antenni asendis võib EM-välja jaoks olla erinev geomeetria. Seepärast hoitakse antenn ühes kontrollitud asukohas ja katsetatavat seadet pööratakse horisontaaltasandis 360 kraadi ulatuses, antenni suhtes.

Lõputöö raames ehitatava platvormi disainimisel lähtuti kahest standardist, mis on tulenenud direktiivist 2014/30/EL . Nendeks on: EN 55032:2015+A11+A1:2020 ja IEC 55014-1:2021.

Eelnevalt kirjeldatud standarditest lähtudes peab katsete läbiviimiseks pöördlaud vastama allpool välja toodud nõuetele:

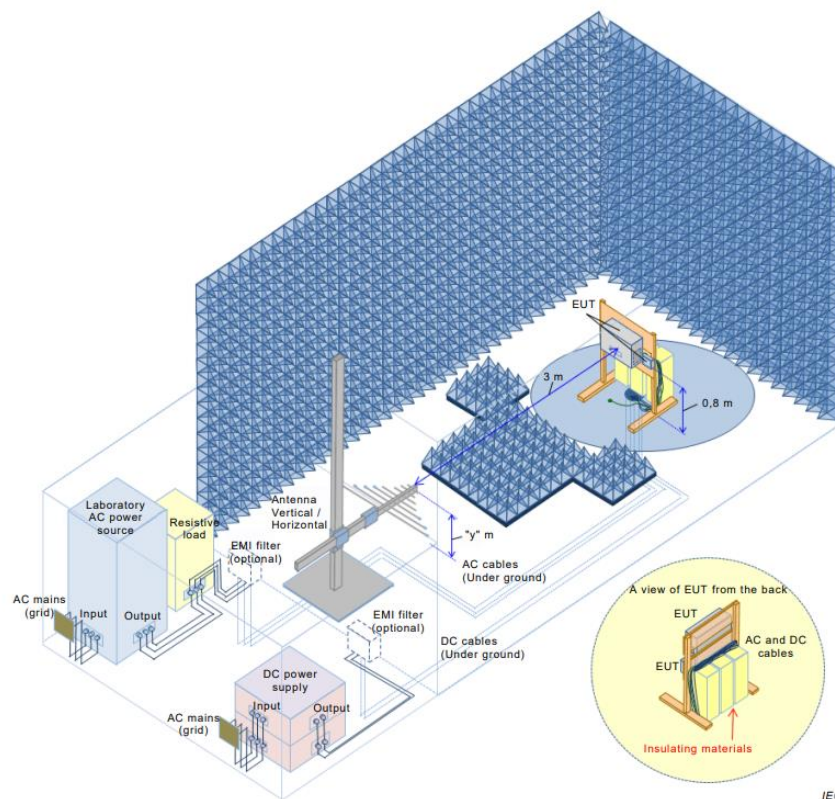
- Testitav seadeldis peab olema testkambri seintest ja põrandast vähemalt 0,8 meetri kõrgusel;
- Pöördlaud peab olema võimeline pöörama ümber oma telje testi jooksul vähemalt horisontaaltasapinnal;
- Pöördlaud peab olema elektromagnetkiirguse suhtes võimalikult läbipaistev, st lahendus ei tohi sisaldada metallist osi ega vedelikke;
- Pöördlaua asend peab olema täpselt määratav testi läbiviimise käigus, leidmaks mis nurga all ja mis suunas emiteerib toode EM-välja kõige intensiivsemalt.

Toodete katsetused viiakse läbi kontrollitud keskkonnas, et tagada katsete korratavus. Keskkonnaks võib olla pool kajavaba kamber (*semi anechoic chamber*) või täielikult

kajavaba kamber (*full anechoic room*). Kambri mõõtudele pole otseseid piiranguid, kuni on täidetud nõue, et lähim sein testitavast seadmest asub 0,8m kaugusel, seda ka vertikaalsuunal. Lisaks ei tohi katsetatav seade olla sidestatud metalliga, isegi mitte elektriliselt isoleeritud osadel. [2] Metalliga sidestatud ühendused võivad tekitada anomaaliaid elektromagnetväljade kontuurides või neid varjestada mõõtevahendite eest. Testi läbiviimisel võib kambris olla metallilisi elemente, kuid need peavad olema varjestatult kambri seina ääres.

1.2 Näited

Tutvudes lahendustega, mida on kasutatud elektromagnetilise ühilduvuse katsete läbiviimisel, selgus kaks korduvat asjaolu. Täielikult kajavaba kambri puhul on ehitatud pööramise mehhanism kambri pöranda sisse ning seda juhitakse kambrist välja jäävas alas. Nii saavutatakse testkeskkonna eraldatus metallist kambri seintest ja lihtsamini ehitatav ning jälgitav testseadme keeramise mehhanism.



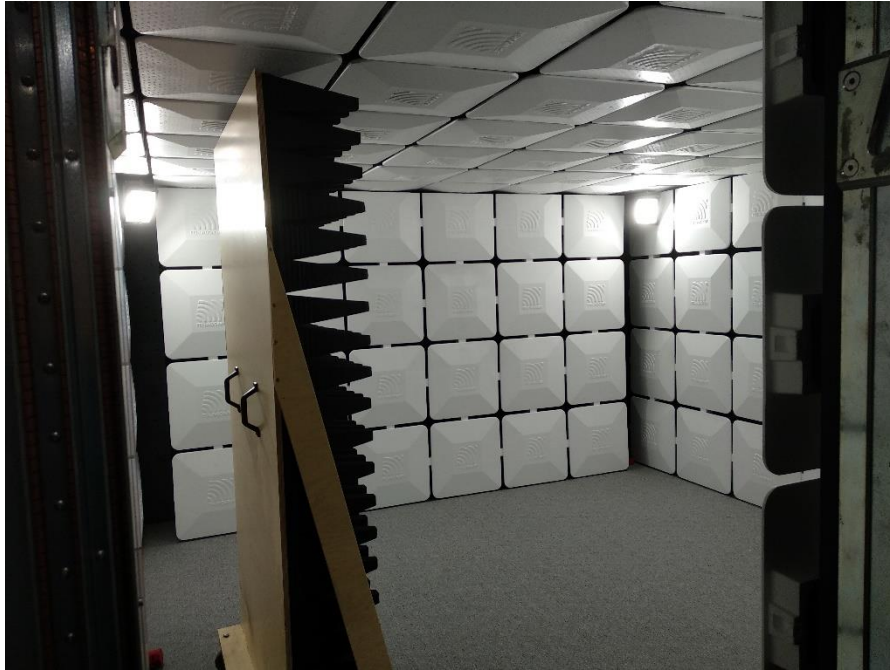
Joonis 1. Kirjeldus standardist EN55032, üks võimalik mõõtmiste teostamise skeem, kasutades täielikult kajavaja kambri lahendust [VIIDE].

Teine levinud variant testlaua pööramiseks on kambri ääres varjestatult või kambrist väljas asetsev manipulaatorkäsi. Antud lahendust kasutatakse rohkem osaliselt kajavaba kambriga lahenduste puhul. Lahenduse eelisteks on lihtsam kontrollitavus, kuid kuna roboti tegevus mõõtealas segab katseid, tuleb katsed teha mitmes osas.

Testitavat seadet toetavad alused on üldjuhul lapikud, kuid esineb ka teisi konstruktsioone, mida üldiselt kasutatakse kindlat tüüpi seadme testimisel. Hea näide sellest on ka välja toodud joonisel 1. Antud lahenduse puhul on tegemist täielikult kajavaba kambriga, mille ühes ääres asub testitav seade pöördlaual ning kambri teises otsas mõõtmiste jaoks kasutatav suundantenn. Antud lahendusel tuuakse testitava seadme toitekaablid pöördlauas oleva augu kaudu kambrist välja. Kaablid on varjestatud isoleeriva materjali abil, et need ei segaks testi tulemusi.

1.3 Lähtespetsifikatsioon

Eelmise kahe peatüki põhjal tekkis nimekiri piiranguid, mida võeti lahenduse disainimisel arvesse. TalTechis on olemas täielikult kajavaba kamber, mõõtudega 5 meetrit laiuses, 5 meetrit pikkuses ning 3 meetrit kõrguses. Kambri mõõte tuli arvesse võtta, et täita standardist tulenevat nõuet, testitavale seadmele, mis peab igast kambri seinast olema testi läbiviimisel vähemalt 0,8 meetri kaugusel. Seega võeti disainimisel eesmärgiks ehitada pöördlaua kõrguseks vähemalt 0,9 meetrit. Sellisel juhul jääb piisavalt ruumi testitava toote ja lae vahele (eeldusel, et testitava toote mõõde kõrgusesse on vähem kui 1,3 meetrit).



Joonis 2. Pilt TalTechis asuva kajavaba kambri sisemusest

Tallinna Tehnikaülikoolis ei saa kambri põrandasse ehitatud varianti rakendada, kuna kambrit ümbritsevas ruumis pole lahenduse ehitamiseks piisavalt ruumi. Kuna pöörlemiseks kasutatavat mehhanismi ei ole võimalik ehitada kambri põrandasse, tuli selle funktsiooniga arvestada pöördlauda konstruktsiooni disainimise protsessis. Pöörlemisevõimekusele lisaks seati eesmärgiks, et konstruktsioon peab kandma vähemalt 50 kg raskust. Eesmärk tulenes võimalike testitavate toodete mõõtudega mõõtmiseks sobilikus piiratud alas. Toodete, mis jääksid suurima küljepikkusega suurusvahemiku 0,8 m, oodatav mass on kuni 50 kg.

Standard näeb ette, et disainitav lahendus peab olema elektromagnet kiirguse testi läbiviimise jaoks võimalikult läbipaistev. Sellest tulenevalt pidi loodav disain olema metallivaba, kuna isegi väikeste metallist poltide kasutamine võib tekitada soovimatut muutuseid elektromagnetväljas ning rikkuda katse tulemused. Lahenduse disainimisel arvestati selliste materjalide kasutamisega ning plastikust kinnitusvahendeid silmas pidades.

Lähtestandardites ei ole määratud, kui kiiresti või aeglaselt peab pöördlaud olema võimeline mõõtmiste käigus ümber oma telje pöörama. Töö lähte-eesmärgiks võeti saavutada lauda üks täispööre vähemalt 10 sekundi jooksul. Antud eesmärk tagab katsete läbiviimisel aja kokkuhoiu.

2 PÖÖRDLAUA ELEMENTID JA OMADUSED

Pöördlaua pöörleve platvormi disainimiseks kasutati eelmises peatükis kogutud sisendit ning sellest lähtuvalt kavandati koost *Autodesk Inventor* tarvaraga. Töö käigus selgus, et tulenevalt metallivaba lahenduse nõudest, oli vaja mitmeid mittestandardseid tooteid ja detaile luua, mis prinditi välja 3D printeri abil.

Platvormi disainimisel oli tähtis arvestada 50 kilogrammi kandevõimega ning pöördlaud pidi olema võimeline liikuma 360 kraadi ulatuses ümber oma telje. Lisaks pidi pöördlaud olema elektromagnetkiirgusele maksimaalselt läbipaistev. Seda eesmärki silmas pidades kasutati pöördlaua disainimisel 10 mm paksust akrüülklaasi (polümetüülmetakrülaati) ja sama pakse vineerplaate. Akrüülklaas on sobilik materjal, kuna see on tugev, kuid samas kerge ja ei pea kinni elektromagnetkiirgust ning seeläbi ei sega mõõtmist. Kõik detailid peale alusplaadi, vineerketta ja pealmise plaadi on akrüülklaasist.

Lisaks seati eesmärgiks disainida pöördlaua keskpunktis fikseeritud kanal kaablite ühendamiseks ühesuguselt, kogu pööramise ajal. Selle kaudu viiakse testitava toote toitejuhe ja muud võimalikud juhtmed alla pöörandale, et võimalikult vähe segada katse tulemusi.

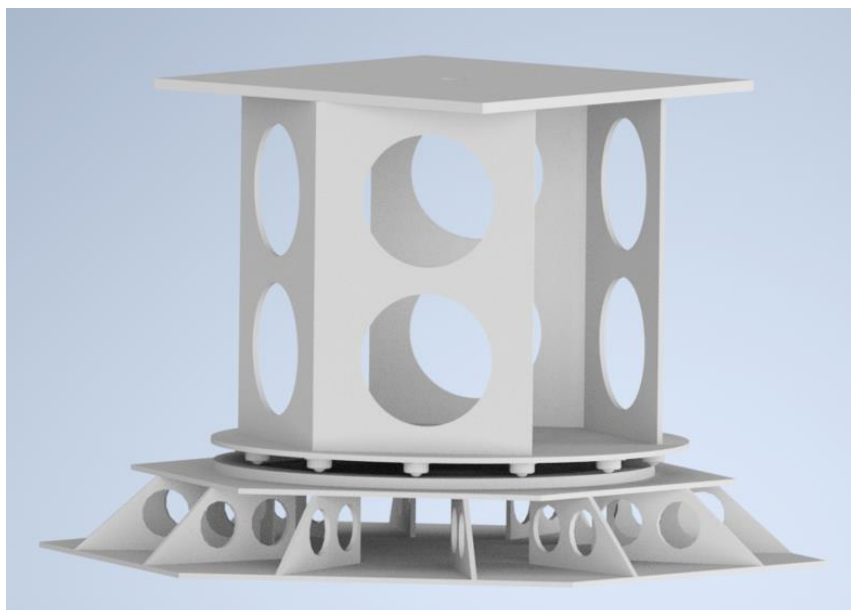
Pöördlaua pöörlemise tagamiseks kaaluti mitmeid variante. Esiteks prooviti kasutada laagrite süsteeme. Pöörleva osa plaadi all ja peal oleksid kinnitatud klaas- või plastist kuulidega laagrid, mille peal laud pöörleks. Alumised laagrid kannaks peamiselt platvormi raskust ja võimaldaks platvormi pöörlemise. Pealmised laagrid fikseeriks plaadi asendi horisontaal teljes ning toetaks platvormi pöörlemist pealt. Antud lahendus jäi kõrvale, kuna klaasist- või plastikkuulidega laagrite kandevõime oli võrdlemisi madal. Disainimisel seati eesmärgiks pöördlaua vastupidavus ning seda silmas pidades peaks laud kannatama 50 kg raskust ka siis, kui seda täpselt laua keskele ei asetata. Seega peaks umbes $\frac{1}{4}$ kogu laagritest kandma kogu raskust, kui peaks juhtuma, et toode asetatakse näiteks testi käigus plaadi äärel. Madala kandevõime tõttu oleks laagreid olnud vaja ebapraktiliselt palju ning see variant jäi kõrvale.



Joonis 3. Pilt kuulülekandest

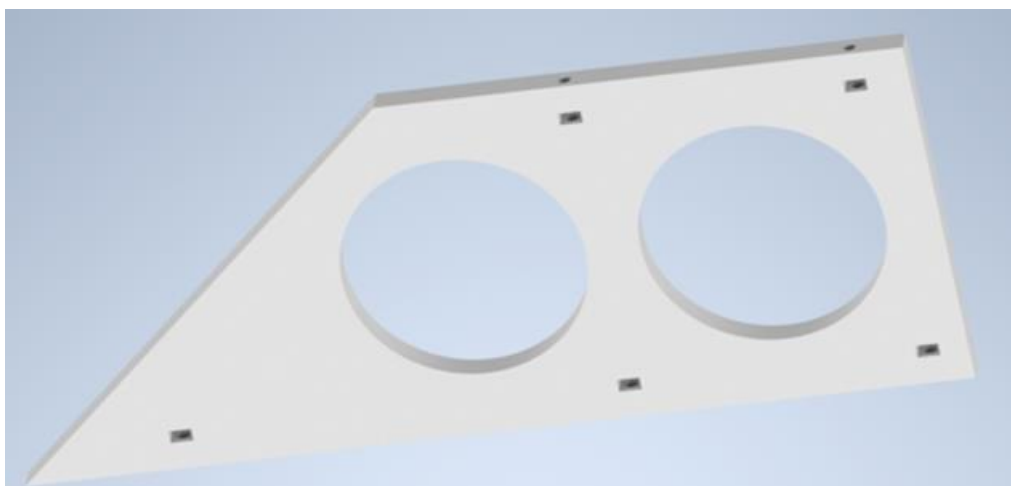
Järgmise lahendusena liikuvuse tagamiseks olid plastikust kuulülekanded (Joonis 3). Iga ülekandekomponent suudab kirjelduse järgi kanda kuni 20 kg massi. Kuna kuulülekande kandevõime oli laagritest oluliselt suurem, oli võimalik laua pöörlemine teha vähemaid ülekande elemente kasutades.

2.1 Pöördplatvormi ülevaade



Joonis 4. Render disaanitud lahendusest

Platvorm koosneb kolmest põhilisest osast: alus, millele pöörlev osa toetub, toodet toetav ning pöörlev osa, kahe osa vahel pöörlemist võimaldav osa. Alus disainiti kuuskant-kujuna, et vältida laua võimalikku ümber kukkumist, toote lauale asetamise või katsetamise käigus. Aluse läbimõõt on 1300 mm ja see on ühtlasi ka disaini suurim mõõt. Alusele kinnituvad kaksteist pleksiklaasist jalga, mis toetavad aluse ülemist paneeli. Detailidele on sisse lõigatud avad mutrite jaoks (joonis 5 näitel) ning jalad kinnituvad aluse ja ülemise plaadi külge plastikust polüamiid kruvide ja mutrite abil.



Joonis 5. Disainitud jala kujuis

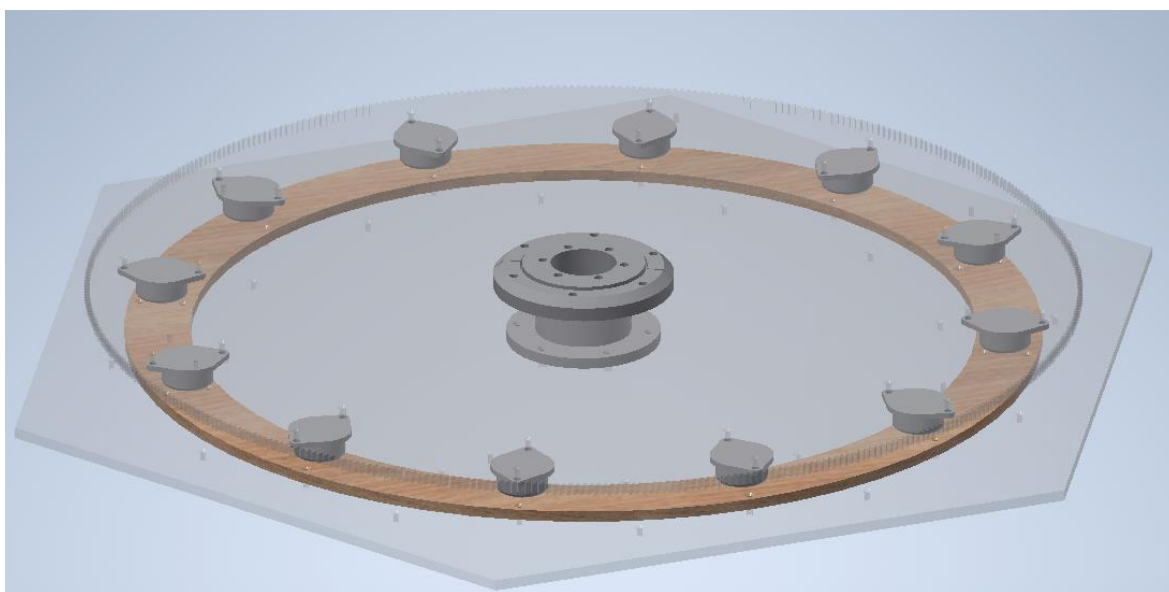
Pöördlaua ülemine osa koosneb toetusplaadist, mis toetab kogu pöörlevat osa disainist. Selle peale kinnituvad neli pleksiklaasist seina, sarnaste mutriavadega, mille eesmärgiks on saavutada laua piisav kõrgus kambri põhjast, tagamaks standardi järgi 0,8 meetrit vahet. Seinu on ainult neli, selleks, et ala toodet kandva plaadi ja pöörleva osa alusplaadi jaoks oleks ligipääsetav ning sinna saaks vajadusel asetada mõõtevahendeid mõõtmiste läbiviimiseks. Toetavate seinte peale kinnitub kõige pealmine plaat, mis kannab testi ajal soovitud toodet. Plaadi materjaliks valiti vineer, et vältida pinna kriimustamist.

Ehkki akrüülklaas on tugev, siis pikemal kasutamisel võib materjal deformeeruda, rakendades sellele sageli 50kg raskust. Selle tagajärjel võib kuluda toote keeramisel toetuspinna soon. Selle ära hoidmiseks otsustati disaini käigus kinnitada alumise osa peale vineerrõngas, mille eesmärgiks on toetada kasutatavate ülekannete all olevat pinda ning vähendada materjali läbivajumist pikema kasutusaja jooksul.

Ülemise osa alla kinnituvad plastikkuuliga ülekanded, mis võimaldavad laua ülemisel osal pöörelda. Iga ülekanne suudab toetada kuni 20 kilogrammi raskust. Selleks, et

olenemata toote asetusest pöördlaual, suudaksid ülekanded toetada toote pööramist, jagati laud neljaks sektoriks, millest iga peab suutma kuni 50 kilogrammi raskust toetada. Igasse sektorisse asetati kolm kuulülekannet, kokku kaksteist. Lisaks garanteeritult toote toetamisele, võimaldab suurem arv ülekandeid ka sujuvamat pöörlemist. Ülekandeid on kokku kaksteist.

Pöörlemise käigus kahe osa vahelise horisontaalse liikumise vältimiseks disainiti 3D-prinditav plastlaager. Laagri sisemine osa kinnitub mõlemalt poolt mutriga M8 keermelattidega pleksiklaasist ketaste külge. Ketastest alumine on laiem ning kinnitub alumise plaadi külge taas M8 keermelati ja mutrite abil. Laagri sees on 10 millimeetrise läbimõõduga POM plastikust laagri kuulid, mis täidavad laagri soone täielikult. Laagri välimise osa koosneb kahest identsest tükist, et laagri kokkupanek oleks võimalik ning laagri välimise osa kinnitub ülemise plaadi külge M8 keermelati ja mutrite abil. Laagri välimise ja sisemise osa vahel on 2 millimeetri jagu ruumi, et detailid üksteise vastu ei hõõruks laagri liikumisel. Antud koost on mõeldud raskuse toetamiseks horisontaalteljel, mitte vertikaalteljel.



Joonis 6. Väljavõtte disainitud kuullaagri koostust, koost asub pildi keskel.

2.2 Pöörlemise ressursi määramine

Pöördlaua lõpliku pööramise meetodi valimiseks ning pööramisel kasutatavate elementide disainimiseks, viidi läbi katse. Katse käigus määrati pöörlaua pööramiseks vaja oleva jõu ning pöördemomendi väärtus.

Pöördlaua valmis koostu puudumise tõttu ehitati pööramiseks vajaliku jõu mõõtmiseks katsestend. Ehitatava pöördlauale on eesmärgiks kanda vähemalt 50 kilogrammi raskust toodet, seega asetati katse läbiviimiseks samalaadse geomeetriaga plaadile maksimaalne ehk 50 kilogrammine raskus.

Katse viidi läbi maksimaalse raskusega, ehk 50 kg asetati katsestendile ning seejärel mõõdeti pöörlemiseks vaja oleva momendi hulka dünamomeetriga. Tulemuseks saadi pöörlemiseks vajaliku tasemena 8,5 N. Seejärel arvutati pöördlaua pööramiseks vajalik moment, arvestades, et kavandatava paneeli diameeter on 0,9 m. Arvutustes leiti laua pööramiseks on vajalik minimaalselt

$$T_{pöörd} = F_{pööramis} * \frac{d_{laud}}{2} = 8,5N * 0,45m = 3,9 Nm \sim 4 Nm$$

Varuteguriga võeti töö käigus ehitatava lahenduse eesmärgiks tagada vähemalt kolm korda suurem moment.

$$T_{ajam,min} = 3 * 4 Nm = 12 Nm$$

Seega, et kindlustada platvormi pööramine hilisematel praktilistel kasutusjuhtudel oli ajami eesmärgiks tagada vähemalt 12 Nm pöördemoment.

2.3 Pöördmehhanismi kavandamine

Pöörlemise tagamiseks kaaluti erinevaid variante, kuid eesmärkidest tulenev piirang, et ei tohi kasutada metallist osi ega vedelikke jättis sõelale peamised kaks varianti: 1) kasutada rihmülekanne, kus elektriline või muu ajam kannab rihma abil jõu kambri keskele; 2) pneumaatiline mootor, mis asetseb laua alumises osas ning mida saaks juhtida kambri äärest või kambri väljas.

Antud töös otsustati pneumaatilise mootori variandi kasuks, et vältida rihmülekandest tekkivat lõtku ning pneumaatiline lahendus võimaldaks kogu juhtsüsteemi viia

katsetuste kambrist testimise ajaks välja. Laboris, kus täielikult kajavaba kamber asub, on võimalik kasutada suruõhku, kuna seal asub juba välja ehitatud suruõhusüsteem.

Pneumomootorid on üldiselt suure pöörlemissagedusega. Seda silmas pidades valiti jõu ülekande meetodiks hammasratasülekanne. Hammasratas-ülekande eelisteks on suur kasutegur. Ülemise pöördplatvormi ketta äärde disainiti hammasratta jälg, kus hammasratta mooduliks valiti 2 ning hambaid kujundati kettavälisküljele 450. Hammasrattasülekande disainimisel lähtutakse järgnevatest momendi ülekande põhimõttest:

$T_{ajur} = \frac{T_{ketas}}{d_{ajur}} * d_{ketas}$, milles T_{ajur} on suuremale kettale pöörlemiseks vajalikku tagava ajur-hammasratta moment, T_{ketas} on liigutatava ketta pöördemoment, ning d_{ajur} ja d_{ketas} on vastavalt ajurhammasratta ja ketta hammaste hambumisdiameetrid.

3 PÖÖRLEMISAJAMI KUJUNDAMINE

Eelmises peatükis oli sõnastatud ülesanne, mida pöörlemisajam peab täitma. Käesolevas peatükis vaadeldakse pöörlemist tagava ajami kujundamist lähtudes pneumaatilise mootori rakendamise võimalustest. Pneumaatiline kolbmootor valiti, et vältida metallist osade kasutamist laua pööramise ajamis. Plastmaterjali ruumilise trükkimisega valmistatud mootor on võimalik kujundada metallivabalt ning on seejuures mõistlik ka maksumuses. Nende tingimuste täitmiseks uuriti litsentsitasuta 3D prinditavate mootorite võimalusi. Pneumaatilise mootori kasutamist soodustas ka laboris olemas olev suruõhu võimekus. Leitud lahendust katsetati ning disaini täiendati, saamaks suurem moment mootori tööst. Lisaks katsetustele mootoriga ning uue mootori disainimisele, defineeritakse vajalik ülekandeegur pöördlaua pööramiseks ning ajurhammasratta mõõdud. Valitud lähenemine mootori spetsifitseerimiseks koosneb 3 sammust:

- 1) Valitud 3D prinditud mootori detailide trükk ja mootori kokkupanek.
- 2) Koostatud pneumomootori katsetamine.
- 3) Katsetel leitud parameetrite alusel mootori skaleerimine.

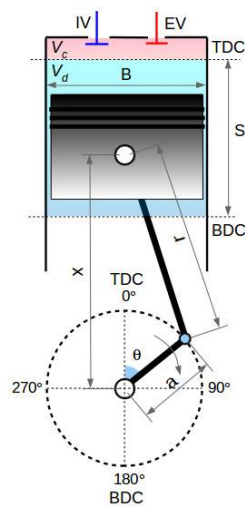
3.1 Pneumomootori ehitus

Pneumomootori valimisel tutvuti internetis leiduvate disainidega ja otsustati võrdlemisi lihtsa 3D prinditava disaini kasuks (Joonis 7). Mootor koosneb kaheksast peamisest detailist ning disain trükiti PET-G plastikust. Detaile tuli efektiivsema töö saavutamiseks järeltöödelda. Seejärel pandi esimene mootori versioon kokku kasutades metallist kruve ja laagrit, mis on eesmärgiks hilisemas versioonis asendada plastikdetailidega. Mootori sujuvaks tööks kinnitati väntvõll ka metallist laagri külge. Kolvi ja silindri kokkupuute tihendamiseks rakendati silikoonõli.



Joonis 7. 3D prinditud mootor

Kolvi tööalaks arvestati vāntvõlli pōoramise 90 kraadi ulatuses. Sellest tulenevalt kasutatakse lõplikus lahenduses nelja silindri ortogonaalset lahendust. Sellise silindrite asetuse korral võib arvestada 1 silindri pidevat survet.



Joonis 8. Kolbmootori tööpõhimõtet ja profiili näitav joonis [3]

$$V_{\Delta} = S_{kolb} * \Delta h = 2,25cm^2 * 1cm = 2,25cm^3$$

Mootori arendatava pöördemomendi leidmisel oli takistavaks asjaoluks prinditud mootori töökindlus. Sellest tulenevalt antud lahenduses on võetud aluseks arvutuslik maksimaalne moment. Mootori pöördemomendi kavandamisel lähtutakse asjaolust, et lõpplahenduses kasutatakse kokku 4 kolvist koosnevat komplekti, kus igal ajahetkel vähemalt 1 kolb oleks suruvas talitluses. Pöördemoment leitakse kavandatud tööõhu alusel

$$\begin{aligned} T_{mootor,max} &= F * a = S_{kolb} * P * a = 0,000225 m^2 * 420 kPa * 0,008 m \\ &= 0,00074 Nm \end{aligned}$$

3.3 Pnemootori dimensioneerimine

Algne prinditud mootor arendas maksimaalset momenti 0.00074 Nm ja tühijooksu pöörlemiskiirus oli 450 p/m ehk 7,5 p/s. Selleks, et saavutada soovitud momendi hulk pöördlaua ringi ajamiseks, suurendatakse prinditud mootori disaini mõõtmeid. Dimensioneerimine on kõikides ruumilistes telgedes sama proportsioonidga. Täiendav kaalutus on, et pöördemoment on võrdeline kolvi pindalaga, kuna ka kepsu mõõt saab olla seotud kolvi küljepikkusega. Kui valitakse kepsu pikkus proportsioonis kolvi mõõduga, siis ka kolvi käik on proportsionaalne

$$F_{kolb} = S_{kolb} * P_{rõhk} = \frac{I_{kolb2}}{l_{kolb_{alg2}}} * S_{kolb_{alg}} * P_{rõhk}$$

$$T_{kolb} = F_{kolb} * a_{tsenter} = F_{kolb} * \frac{l_{kolb}}{l_{kolb_{alg}}} * P_{silinder}$$

Suurendades mootori mõõtmeid, suureneb ka mootori suruõhu vajadus, mis ei saa olla suurem, kui kompressori maksimaalne väljalase kasutataval rõhul.

Dimensioneerimisel eeldati, et mootori tööõhk jääb vähemalt samaks, mis on esialgsel mootoril. Tutvudes mootori infolehega selgub, et rõhu 420 kPa juures suudab kompressor anda välja suruõhku 45 l/min ehk 45000 cm³/min. [5] Kuna mootor ise pöörleb 450 p/min, siis see tähendab, et ühe pöörde jaoks kasutatav maksimaalne suruõhu hulk on

$$V_{\text{õhk}} = \frac{45000}{450} = 100 \text{ cm}^3.$$

Kasutades leitud maksimaalset õhukulu on võimalik leida maksimaalne mootori dimensioneerimise tegur, arvestades, et laboris olevat kompressorit ei vahetata.

$$1,5x * 1,5x * 1x = 100 \text{ cm}^3$$

$$2,25x^3 = 100$$

$$x^3 = \frac{100}{2,25}$$

$$x = \sqrt[3]{44,44}$$

$$x = 3,54 \approx 3,5$$

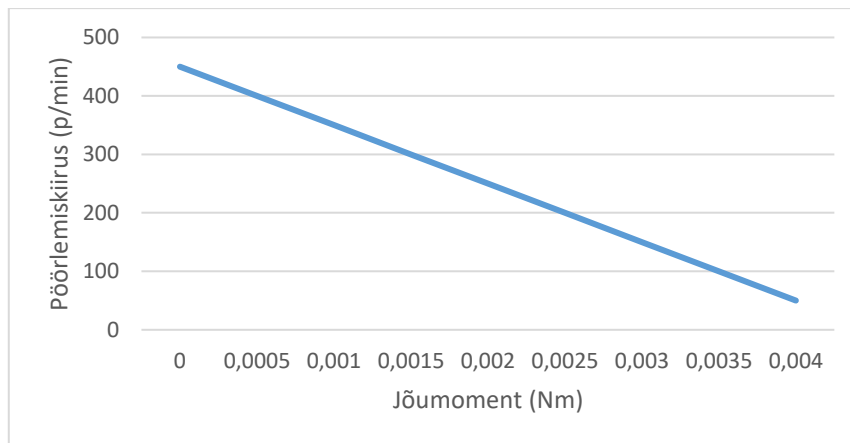
Seega on mootorit võimalik suurendada 3,5 korda ning antud mõõtmete juures kulub üheks täistöötsükliks õhku

$$V_{\Delta} = S_{\text{kolb}} * \Delta h = 5,25 \text{ cm} * 5,25 \text{ cm} * 3,5 \text{ cm} = 96,5 \text{ cm}^3$$

Lisaks on võimalik arvutada dimensioneeritud mootori maksimaalne pöördemoment.

$$\begin{aligned} T_{\text{mootor,max}} &= F * a = S_{\text{kolb}} * P * a = 0,0525 \text{ m} * 0,0525 \text{ m} * 420 \text{ kPa} * 0,035 \text{ m} \\ &= 0,04 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Arvestades, et mootori pöörlemiskiirus peale dimensioneerimist on sama, mis algsel mootoril, on võimalik kujutada mootori pöörlemiskiiruse ja momendi suhe graafiliselt. Lähtudes joonisest 9, leiti dimensioneeritud mootori moment kõige suurema võimsuse hetkel, ehk 50% pöörete juures. Kuna tegemist on lineaarse karakteristikuga, siis 50% pöörete juures, kasutab mootor 50% maksimaalsest momendist, seega suurima võimsuse saavutamiseks arvestati edasisteks arvutusteks dimensioneeritud mootori momendiks $0,04 \text{ Nm} * 0,5 = 0,02 \text{ Nm}$.



Graafik 1. Arvutatud mootori pöörlemiskiiruse ja pöördemomendi oodatav karakteristik

3.4 Ülekandeahela hinnang

Platvormi pööramiseks on eelnevalt sünastatud vajalik pöördemoment 12 Nm (0). Platvormi aluse pööramiseks vajalik pöördemoment kantakse üle hammasratasülekandega, mille saab arvutada, arvestades dimensioneeritud mootori momenti. Mootori poolt on vaja tagada pöördemoment, mis on kadude võrra suurem. Reduktori kasuteguri leidmiseks uuriti erinevaid 3D prinditavaid reduktoreid. Eeldusel, et jõud kantakse üle suure ülekandeteguri abil, võeti otsingute tulemusena arvutuste läbiviimiseks ülekande kasutegur 60%. Ülekande arvutamiseks jagati pöördlaua liigutamiseks vaja minev maksimaalne moment, dimensioneeritud mootori momendiga, võttes arvesse hammasülekande kasutegurit.

$$T_{mootor} = \frac{T_{platvorm}}{\frac{\eta_{reduktor}}{k_{reduktor}}} = \frac{12}{\frac{0,6}{1000}} = 0,024 \text{ Nm}$$

Arvutatud mootor on võimeline sellist pöördemomenti tagama.

Platvormilt oodatav pöörlemiskiirus peab olema vähemalt 6 pööret minutis ehk 0,1 pööret sekundis (1.1). Arvestades reduktori ülekandetegurit 1:1000, peaks mootori nõutud pöörlemiskiirus olema $1/60 * 1000 \sim 17$ p/s. Seejuures arvestame momendi graafikul asjaolu, et maksimaalse varuga arvestatud pöördemomendi juures ei pea platvormi kiirus olema nimetatud kiirusel. Antud mootori kasutamisel seega jääb pöörlemise kiirus algselt kavandatust väikesemaks.

3.5 Pneumomootori juhtimine

Pneumaatiline mootor töötab suruõhu abil. Suruõhk saadakse laboris olevast suruõhu liinist. Mootori töö kontrollimiseks ühendatakse suruõhu liini külge solenoidklapp, mille abil on võimalik reguleerida mootori tööd. Klappi juhtides on võimalik muuta mootori töökiirust ning vajadusel mootorit sisse ja välja lülitada. Kuna solenoidklapis on metallist komponente, asetatakse klapp varjestatult kambri äärde, kambrist välja.

4 PLATVORMI ASENDI TAGASISIDE

Kuna toote elektromagnetkiirguse tasemete testimise käigus peab toode pöörama ümber oma telje, on tähtis määrata ka testi läbiviimise käigus, mis asendis toode parajasti on ning vajadusel mõnes suunas mõõtmised kauem läbi viia. Kuna läbiviidavate testide üheks eesmärgiks on leida kõige suurema kiirgusega suund, siis on tähtis määrata täpselt ära toote asukoht katse ajal.

Antud osa projektist on eriti väljakutsuv, kuna tegemist on mittestandardse lahendusega. Probleem tekib sellest, sellistes sensorites on enamasti metallist komponente või annavad sensorid tagasiside elektrilisi signaale kasutades. Nende põhjuste tõttu ei ole võimalik tüüpilisi sensoreid kavandatava pöördlaua külge kinnitada. Valikusse jäid optilised sensorid, mille abil saaks tuua kasutajale informatsiooni laua asendi kohta kambri äärest. Siiski on optiliste sensorite hind üheks piiravaks asjaoluks.

4.1 Asendi mõõtmise võimalused – mitteelektriline

Optiline andur arvutab valguskiire väljumise ja tagasi sensorini jõudmise vahelise aja ning selle abil leiavad mõõdetava eseme kauguse sensorist (nn time-of-flight). Nende abil kauguse määramiseks plaaniti 3D-printida spetsiaalne võru pöördlaua pöörlevale osale, kus võru äär liiguks pöörlemise käigus sensorist kaugemale ja lähemale ning selle abil oleks võimalik määrata pöördplatvormi asendit. Täpsed ning tööstuses kasutusel olevad laserkauguse mõõtmise sensorid osutusid liiga kalliteks antud projekti raames. Teine variant - odavamad laserkaugusmõõtjad, kuid nende puhul muutus mõõtemääramatus liiga suureks, et neid selle projekti raames rakendada. Mõõtemääramatus tulenes sensorite laiast mõõtesektorist, mille suunamise täpsust ei saa tagada lihtsate meetoditega.

Pneumaatiline lahendus. Laua pöörlema paneva ajuriga ühendatakse liikuv kolb ning kolvi asend silindris pakub tagasiside tuvastada läbi kolvi liikumiskambri mahu muutuse. Selle lahenduse eeliseks oli see, et mõõtevahendid tuleks kambrit välja ning kambrit väljas oleva rõhuanduri abil saaks mõõta rõhu muutumist. Ruumala muutuse abil mootoris oleks võimalik määrata, mitu töösüklit on mootor läbinud ning seeläbi pöördlaua asend määrata. Paberil tundus lahendus hea, kuid kasutades kompaktsed mootorit osutus rõhkude vahe küllaltki väikseks. Lisaks oli pneumoühendustest tulenev kadu märkimisväärne, arvestades väikest mõõtevahemikku ja plaan ei läinud antud projektis asendi määramisel käiku.

4.2 Siinus-koosinus põhimõte

Pöördlaua asendi kirjeldab tema pöördenurk algasendi suhtes. Nurga tuvastamiseks on üks viis rakendada ortogonaalsete koordinaatide meetodit, mis kajastaks pöördenurka läbi x ja y koordinaatide väärtuste. Need koordinaadid on pöördketta kindla punkti projektsioonid. Igas asendis on projektsioon määratud kui

$$X_{koord} = R * \cos(\alpha)$$

$$Y_{koord} = R * \sin(\alpha)$$

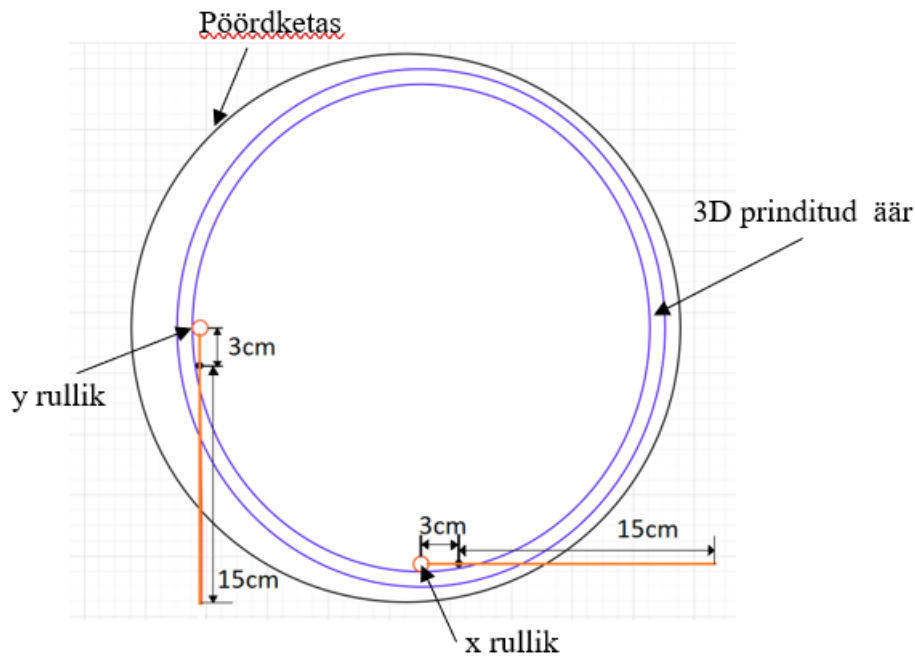
Koordinaatide edasi andmine võib toimuda ka kangmehhanismiga. Pöörleva ketta külge prinditakse 3D printeriga spetsiaalse profiiliga äär, mis on ringi kujuline, kuid väiksema diameetriga, kui ketas ise. Prinditud äär kinnitatakse ketta külge nihkega keskpunktist. Ääre vastu kinnitatakse rullik, mis on fikseeritud kangmehhanismi külge, see käib kaasas prinditud võru äärega. Seeläbi saavutatakse rullikuga ühendatud kangi järgiv liikumine ketta pöörlemise käigus. 3D-trükitud ringist tulenev asendi muutus on võrdlemisi väike ning liikumise amplituudi suurendamiseks lisatakse pikendus kang. Kangi lahendusse lisamise eesmärk oli kangiga seotud oleva kolvi asendi muutumise mõõtmine.

Kangi asendi jälgimiseks saab rulliku kangi kinnitada kepsuga, mis on ühendatud silindris liikuva kolviga. Lahenduse tööpõhimõte on järgmine: pöördaluse pöörlemisel, rullik liigub vastu prinditud äärt, rulliku liikumise käigus liigub ka kang, keps ja sellega ühtlasi kolb. Kolvi asendi määramiseks silindris kasutatakse suruõhusüsteemi. Asendi tagasiside kätte saamiseks oli vajalik lisada rullikutega lahendusi kokku kaks. Selle eesmärgiks on leida nii x kui y koordinaadi väärtus, kui kangmehhanismidest üks teostab x ja teine y koordinaadi tuvastamist.

Pöördlaua nurga α saab arvutada, teades x ja y suurust

$$\alpha = \text{atan} \frac{(x - x_0)}{(y - y_0)}$$

kus x_0 ja y_0 on koordinaadi keskasendi väärtused, edaspidi $y - y_0 = \Delta y$, Δx



Joonis 10. Joonis kujutab kolmandas lahenduses pakutud tagasiside leidmise meetodit

4.3 Pneumaatiline asendi tagasiside

Asendi muutuse mõõtmiseks kasutatakse kangi otsa kinnitatud kolvi. Kolviga silinder on ühendatud klappide ja rõhupaagiga, kus on kompressori poolt suruõhk. Pneumoklappide abil ühendatakse silinder mahutiga. Kolvi asend on võimalik fikseerida silindri osa mahu määramise kaudu. Põhimõtteks on silindrisse lastava suruõhu rõhu muutus ning rõhu muutuse mõõtmise abil on võimalik määrata kolvi asend kaugemal asukohas. Pöördlaua muutus edastatakse vastavalt x ja y-telje suhtes oma kolvi abil.

Kolvi algasendis $\Delta x = 0$ või $\Delta y = 0$ kolb silindri keskel. Silindri osa, mis jääb silindri kolvi ja otsa vahele on ruumalaga

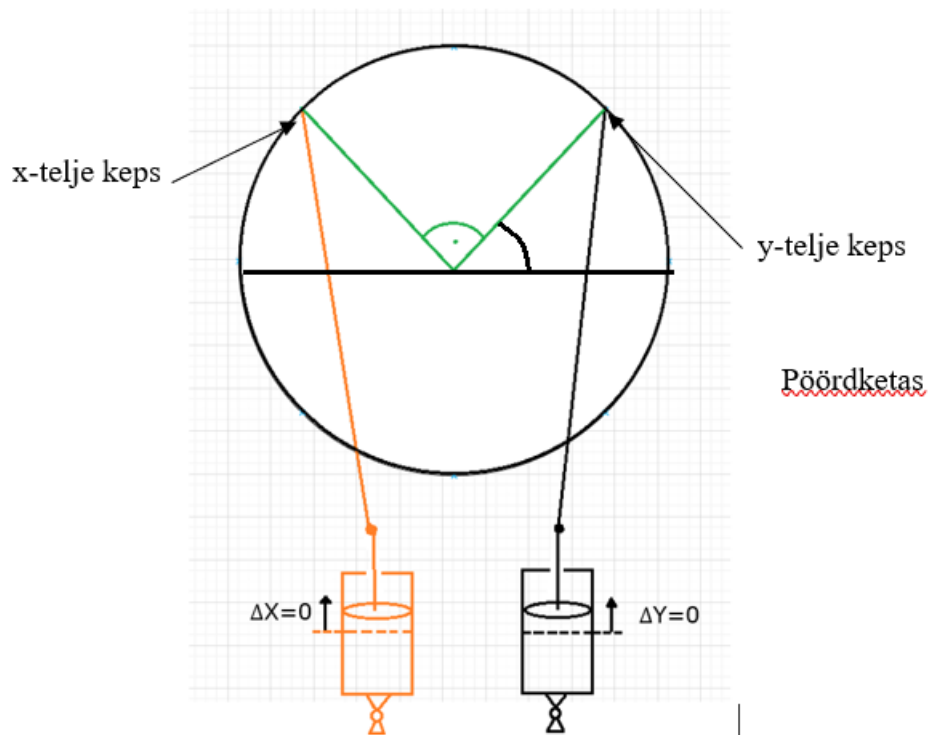
$$V_{sil} = A_{sil} * (\Delta x_{max} - \Delta x)$$

Kus A_{sil} on silindri ristlõike pindala ja $d_{x_{max}}$ on maksimaalne silindri kolvi liikumise ulatus kesk asendist.

Kui silindri osa V_{sil} on täidetud õhuga algrõhul P_{alg} , siis suruõhumahutist ruumalaga V_{paak} kus on rõhk P_{paak} silindri täitmisel paagist väljub õhk silindrisse. Paagi rõhk väheneb ja rõhu muutus on oodatavalt funktsioon asendist Δx :

$$P_{sil_rõhk} = \frac{(V_{sil} * p_{alg} + V_{paak} * p_{paak})}{V_{paak}}$$

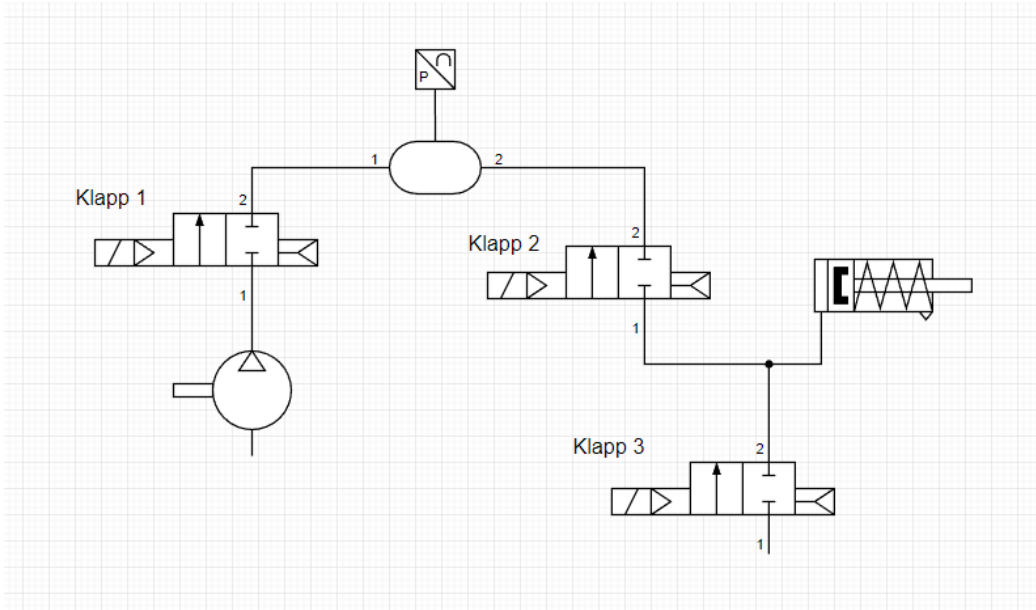
Rõhu muutus on $p_{paak} - p_{sil_rõhk}$



Joonis 11. Rõhu mõõtmiseks kasutatava lahenduse näidisskeem

Tulemuste arvutamiseks mõõdetakse ära $\Delta x = 0$ ja $\Delta y = 0$ asendid ning mõlema telje suhtes maksimaalse muutuse tulemusena tekkiv rõhu muutuse väärtus. Teades rõhu hulka algasendi ja ekstreemumite puhul on võimalik nii x kui ka y telje koordinaat arvutada siinus-koosinus põhimõtete abil.

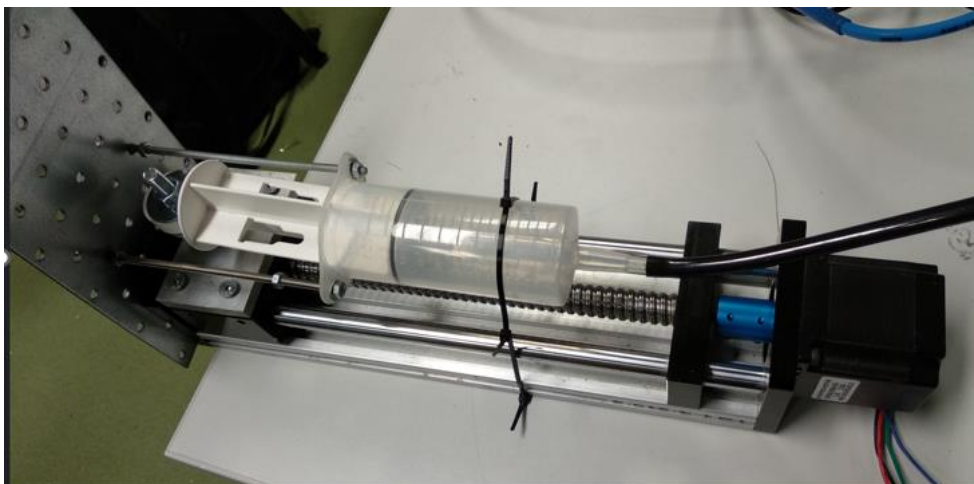
4.4 Mõõtevahendi katsetamine



Joonis 12. Mõõtmisteks kasutatav pneumaatiline skeem

Asendi mõõtesüsteemi katsetamiseks koostati pneumaatiline süsteem (joonis 14). Suruõhu juhtimiseks kasutati solenoid klappe. Solenoidklapi juhtimine teostati mikrokontrolleris oleva programmi abil. Rõhu mõõtmiseks kasutati rõhuandurit Honeywell ABP2LANT010, mõõtepiirkonnaga 0 ... 10 bar. Kompressor tagas süsteemi jaoks rõhu umbes 400 kPa.

Esialgset kontseptsiooni katsed tehti, võttes kasutusele süstla, mis töötas silindrina ja tagas õhutiheda kolvi.



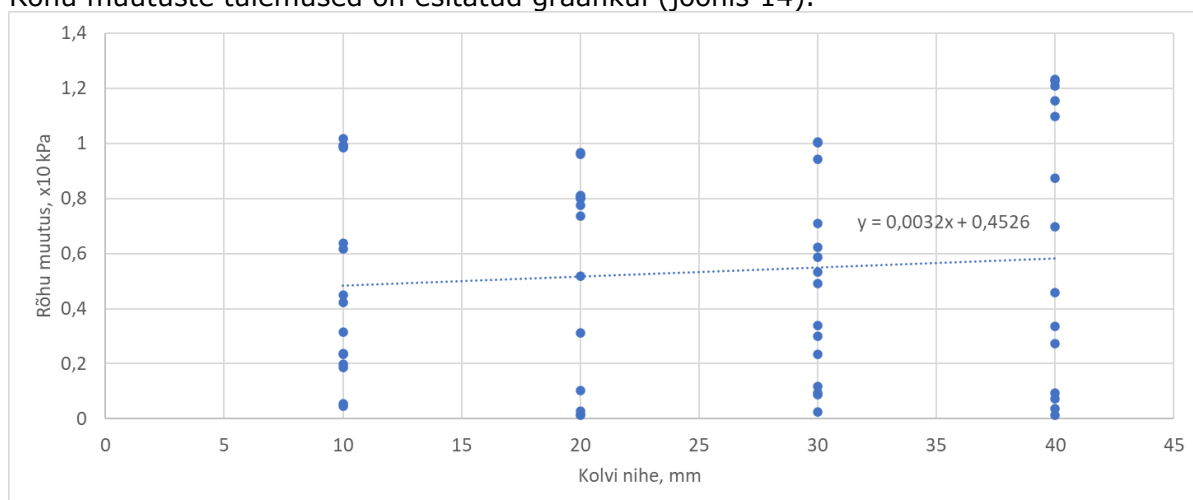
Joonis 13. Mõõtmisteks kasutatud mõõtekolb ja silinder.

Mõõtmiste alustamiseks avatakse kolmas klapp, et lasta rõhk välja mõõtesilindrist. Silindri rõhuks saab nüüd õhurõhk. Seejärel suletakse kolmas klapp. Avatakse klapp 1, mille abil lastakse kompressorist õhku survepaaki, kuni rõhk jõuab u. 400 kPa-ni. Seejärel suletakse klapp 1. Sellega on lõppenud mõõtmiste eelnev süsteemi valmis seadmine. Mõõtmiste läbiviimiseks registreeritakse rõhk rõhuanumas, avatakse klapp 2, et ühtlustada rõhk kolviga mõõtetoru ja survepaagi vahel. Klapp 2 suletakse ning seejärel mõõdetakse rõhu muutus klappide lülitamiste vahel. Edasi avatakse klapp 3, millega silindrist taas suruõhk välja lastakse. Seejärel kordub rõhu ühtlustamine ja rõhu mõõtmine klapp 2 avamisega.

4.5 Mõõtmiste tulemuste analüüs

Mõõtmised viidi läbi kolvi asendi muutmisega asendites 10, 20, 30 ja 40 mm, kui kolvi kogu käiguulatus oli 50 mm.

Rõhu muutuste tulemused on esitatud graafikul (joonis 14).



Joonis 14. Kolvi nihke ja rõhu vahe mõõtmiste tulemused

Tulemused näitavad suurt hajuvust ja antud süsteem ei ole usaldusväärne. Kuigi üldine sõltuvus on lineaarse seosega iseloomustatav, on tulemuste hajuvuse osa oluliselt suurem, kui mõõdetav nihe.

Katsete käigus osutus, et suruõhu rakendamise kaasneb oluline koormus konstruktsioonile. Vähemalt osaliselt saab suurt hajuvust seostada mõõtmisel rõhu rakendamisel ja vabastamisel esinenud nihkumiste ja liikumistega. Antud süsteem esitatud kujul vajab olulist täpsustamist ja täiustamist, enne kui sellega asendit saab usaldusväärset määrata.

5 TULEMUSTE KIRJELDAMINE

Lõputöö eesmärgiks oli disainida katsete läbiviimiseks sobilik pöördlaud, leida laua pööramiseks sobilik mootor ning leida meetod pöördlaua asendi tagasiside saamiseks.

Bakalaureusetöö raames saavutati järgmised tulemused:

- 1) Disainitud standarditele vastav pöördlaud, mis võimaldab läbi viia vajalikke mõõtmisi ning on metallivaba.
- 2) Kirjeldatud laua pööramiseks ajam ja dimensioneeritud see nii, et tagada piisav kiirus ja moment. Lõputöös on pakutud välja mootori mudel ja mootori kasutamiseks kuluv suruõhu hulk.
- 3) Pakutud välja asenditagasiside süsteem, määramaks pöördlaua asukoha pööramise ajal. Koostatud prototüüp ja testitud lahenduse töötamist, viidud läbi mõõtmised ning mõõtmiste analüüsi põhjal on näha, et lahendus täidab eesmärgi.

Välja pakutud edasised arendused:

- 1) Mootoril puudub reverseerimise mehhanism. Standard näeb ette, et vajadusel pööratakse mõõdetavat vahendit mõlemas suunas. Võimalik lahendada mootori disaini muutes ning lisades täiendava suruõhu klapi.
- 2) Lahendusele oleks vaja disainida kasutajaliides, mis arvutaks kasutajale välja asendi ning oleks võimalik jälgida paremini pöörlemist.

6 Kokkuvõte

Antud lõputöö eesmärgiks oli töötada välja metallivaba juhtimise ja jälgimisega pöördlaud elektromagnetilise ühilduvuse alaste katsete läbiviimiseks. Töö käigus tutvuti asjakohaste standarditega ning pakuti välja sobilike mõõtmete ja võimekusega pöördalus. Elektromagnetilise läbipaistvuse saavutamiseks kasutati materjalideks akrüülklaasi ja vineeri.

Järgmise osana lahendati pöördlaua pööramist, kasutades metalli- ja vedelikuvabasid lahendusi. Selleks prinditi välja 3D printeriga mootor, millel leiti spetsifikatsiooni määramiseks moment ja pöörlemiskiirus. Arvestades laboris, kuhu lahendust kavandati, olevaid vahendeid määrati mootori võimalik dimensioneerimise tegur. Seejärel leiti platvormi pööramiseks vaja oleva momendi hulk ning platvormi pööramiseks vaja olev hammasratasülekande ülekandetegur.

Kolmanda osana lõputööst uuriti pöördlaua asendi tagasiside edastamise võimalust suruõhusüsteemi kasutamiseks. Metallivabaduse nõude tõttu ei olnud võimalik kasutada selleks standardseid lahendusi ning töös võeti kasutusele x- ja y-telje suunas asendimuutust mõõtev kolbsüsteem. Kolbsüsteem töötab suruõhu põhimõttel, kus rõhuanduri abil on võimalik mõõta kolvi asendist tulenevat rõhu muutust.

Antud töös ilmnes, et pneumomootor võiks olla sobiv lahendus pöörlemise saavutamiseks. Selline mootori saavutab hästi töös ette nähtud kriteeriume. Asendi tagasiside osas selgitati suur hälbe esinemine mõõtmisel ja on vaja teha lisaarendus, et muuta süsteem täpsemaks. Võimalusel kaaluda asendi tagasiside lahenduseks optilisi sensoreid.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] E. p. j. E. L. nõukogu, „Euroopa Liidu EMÜ direktiiv,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/HTML/?uri=CELEX:32014L0030>. [Kasutatud 02 04 2023].
- [2] „EMÜ standard,“ Eesti standardiseerimis- ja akrediteerimiskeskus, 15 01 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-55032-2015-a11-a1-2020-consolidated>. [Kasutatud 15 03 2023].
- [3] „Mootori silindri mõõtmete juhised,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://x-engineer.org/engine-piston-cylinder-parameters/>. [Kasutatud 25 04 2023].
- [4] „Pneumaatika juhend,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ato.com/how-does-a-pneumatic-motor-work>. [Kasutatud 02 05 2023].
- [5] „Laboris kasutatava kompressori datasheet,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mgfcompressors.com/industrial/lubricated-silent-compressors/silent-lubricated-50-lt/sil-eol-24-50-1.html>. [Kasutatud 05 05 2023].
- [6] „Multimeediaseadme elektromagnetiline ühilduvus. Kiirgusnõuded,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-55032-2015-a11-a1-2020-consolidated>.
- [7] „Electromagnetic compatibility - Requirements for household appliances, electric tools and similar apparatus - Part 1: Emission,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iec-55014-1-2021>. [Kasutatud 17 04 2023].
- [8] „Mõõtmiseks kasutatud sensori datasheet,“ honeywell, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tme.eu/Document/6429863a00649a3c0ae15d32e0500d50/ABP2%20Series%20Datasheet%20-%20Issue%20C.pdf>. [Kasutatud 01 05 2023].
- [9] „Mõõtmisel pinget muundamiseks kasutatud releemoodul,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.oomipood.ee/product/oky3013_2_5v_4_channel_relay_module_with_op_tocoupler_1. [Kasutatud 20 04 2023].
- [10] „Mõõtmiseks kasutatud releemoodul,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.oomipood.ee/product/oky3013_2_5v_4_channel_relay_module_with_op_tocoupler_1. [Kasutatud 03 05 2023].