



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

ELEKTRIMASINATE LABORIJUHENDI JA LABORIMAKETI VALMISTAMINE

MAKING ELECTRICAL MACHINES LABORATORY KIT BLUEPRINTS AND INSTRUCTIONS

BAKALAUREUSETÖÖ

| | |
|------------------|------------------------|
| Üliõpilase nimi: | Richard Kerde |
| Üliõpilaskood: | 179083EAAB |
| Juhendaja: | Lektor Kristjan Pütsep |
| | |

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.

"....." 2022

Autor: Richard Kerde

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

"....." 202.....

Juhendaja: Kristjan Pütsep

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Richard Kerde

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
ELEKTRIMASINATE LABORIJUHENDI JA LABORIMAKETI VALMISTAMINE,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on lektor Kristjan Pütsep

(juhendaja nimi)

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

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

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

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

18.05.2022 *(kuupäev)*

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

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Richard Kerde

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Elektrimasinate laborijuhendi ja laborimaketi valmistamine

Kuupäev: 18.05.2022

53 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): lektor Kristjan Pütsep

Töö konsultant (konsultandid): doktorant-nooremteadur Hans Tiismus

Sisu kirjeldus:

Töö käigus valmisid laborijuhend ja laborimakett masinate labori tarbeks samm-mootori näitel.

Töötaustateadmiste osas on kirjeldatud elektrimasinaid üldiselt ja samm-mootorit täpsemalt.

Töö praktilises osas on laboriks vajalikud taustateadmised samm-mootoritest ja lühike kirjeldus magnetväljast, laborimaketiga seotud labori ülesanded ja ülesannete seletused. Töö praktilise osana valmistati ette makett laboris kasutamiseks ja valmisid joonised maketi reprodutseerimiseks.

Märksõnad: Samm-mootor, elektrimasin, labor, laborimakett, joonised.

ABSTRACT

| | |
|---|---|
| <i>Author:</i> Richard Kerde <i>Title:</i> Title with small letters | <i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis |
| <i>Date:</i> 18.05.2022 | <i>53 pages (the number of thesis pages including appendices)</i> |
| <i>University:</i> Tallinn University of Technology <i>School:</i> School of Engineering <i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics | |
| <i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Lector Kristjan Pütsep <i>Consultant(s):</i> Early stage researcher Hans Tiismus | |
| <i>Abstract:</i> <p>As a result of this research paper an electrical machines laboratory kit was prepared using a stepping motor as an example.</p> <p>The theory part of this research paper describes different electrical machines, their working principles and use cases. The working principle and use cases of a stepping motor are described in more detail.</p> <p>In the main body the necessary background knowledge was gathered and prepared as a part of the laboratory kit. Tasks to be completed using the kit were also prepared and explained. The kit to be used in the laboratory work was prepared and blueprints were made so the kit could be reproduced.</p> | |
| <i>Keywords:</i> Stepping motor, electrical machine, laboratory work, laboratory kit, blueprints. | |

SISUKORD

| | |
|---|----|
| LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE | 4 |
| ABSTRACT | 5 |
| EESSÕNA | 7 |
| SISSEJUHATUS | 8 |
| 1 TAUSTATEADMISED ELEKTRIMASINATEST | 9 |
| 1.1 Elektrimasinate tutvustus ja tööpõhimõte | 9 |
| 1.2 Samm-mootori detailsem tutvustus ja tööpõhimõte | 15 |
| 2 LABORIJUHEND JA MAKETI KOOSTAMINE | 20 |
| 2.1 Olemasoleva maketi kirjeldus | 20 |
| 2.2 Uue maketi loomine olemasoleva maketi põhjal | 22 |
| 2.3 Laborimaketi joonised ja arvutused | 25 |
| 2.4 Juhtimisloogika ja kood | 30 |
| 2.5 Laborijuhend | 32 |
| KOKKUVÕTE | 36 |
| SUMMARY | 37 |
| KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU | 38 |
| LISAD | 40 |

EESSÕNA

Haridusteel Tallinna Tehnikaülikoolis sain teada palju elektrimasinate kohta, kuid soov reaalselt midagi ühendada, katsuda ja lähemalt vaadata jäi poolikuks. Millegi töös vaatamine ja lähemalt nägemine on mulle oluline osa õppimisel, mõistmisel, arusaamisel.

SISSEJUHATUS

Lõputöö eesmärgiks on õppematerjali koostamine masinate labori tarbeks. Õppematerjal sisaldab endas laborijuhendit ja laboritöö käigus kokku pandava samm-mootori komponente.

Elektrimootorid on elektrimasinad, mis muundavad elektrienergia mehaaniliseks energiaks. Elektrimootorid ümbritsevad meid kõikjal – käekellades on seierite liigutamiseks mootor, nutikellades kasutatakse mootorit vibratsiooni ja haptilise tagasisidesaavutamiseks, kohvimasinas purustab mootor kohviube ja pumpab vett, suuremad masinad pumpavad linna torustikku vett ja gaasitorudesse gaasi. Elektrimasinaid leidub ka elektrivõrgus: nii tuule- kui ka hüdroenergia toetub elektrimootorite tööle. [1] [2]

Elektrimootoreid on erinevaid ja need jagunevad laiemalt alalis- ja vahelduvvoolu toitel töötavateks mootoriteks, sealt edasi on võimalik liigitada mootoreid veel omakorda alamgruppidesse ehituse, tööpõhimõtte ja muude füüsiliste omaduste põhjal.

Teema uudsus seisneb õppematerjalide loomises. Hetkel on olemas võimalused selleks, et katsetada nii alalis- kui ka vahelduvvoolu mootorite pinge- ja voolukarakteristikuid, mootori sisemuse nägemiseks ja masina osade kokku panemise jaoks aga materjale pole. Lisaks pole ülikoolil materjale samm-mootori tutvustamiseks labori formaadis.

Lõputöö käigus valmistatakse ette laboris kokku pandava samm-mootori komponendid ja lisatakse vajalikud joonised ja andmed, et hiljem oleks võimalik komplekte juurde toota. Ette valmistatud komponentide hulka kuuluvad püsिमagnetitega rootor, staator koos poolidega, juhtelement, juhtpaneel ja samm-mootori draiverid.

Laborijuhend sisaldab endas mootori kokku panemise juhendit, katse kirjeldust ja arvutuskäiguks vaja minevaid valemeid, lisaks on välja toodud nõutud andmed ja mõõtetulemused, mis tuleb labori tulemusena arvutada ja esitada.

Labori tulemusena võiksid üliõpilased saada parema ülevaate elektrimootori komponentidest, ehituslikust poolest ja saada parema ülevaate sellest, kuidas elektrimootor töötab.

Lisaks kirjeldatakse töös labori vajalikkust, mootorite ja eriti samm-mootorite tööpõhimõtteid ja kasutusalasid ning analüüsitakse ette valmistatud laborikomplekti.

1 TAUSTATEADMISED ELEKTRIMASINATEST

1.1 Elektrimasinate tutvustus ja tööpõhimõte

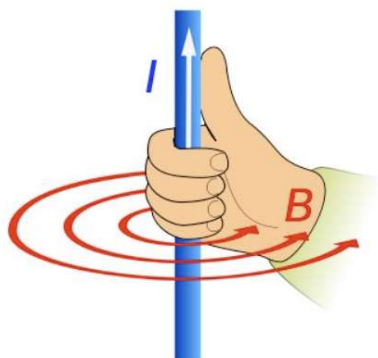
Elektrimasin on masin, mis muundab elektrienergia mehaaniliseks energiaks või vastupidi. Elektrimasinate hulka kuuluvad elektrimootorid ja -generaatorid. Elektrimasinate hulka kuuluvad ka transformaatorid, mis ei muunda energia liiki, kuid muudavad elektrienergia pingest. Et antud töö keskendub elektrimootoritele, vaatame lähemalt just elektrimootoreid. [1]

Et mõista elektrimasinate tööpõhimõtet, tuleb kõigepealt aru saada magnetitest ja magnetväljast. Iga materjal koosneb aatomitest, millel on positiivsed ja negatiivsed osakesed. Elektronid keerlevad ümber aatomi tuuma ja kannavad imepisikest laengut ning seetõttu on iga aatom nagu väike magnet. Mõned materjalid on nõrgalt magneetuvad ehk elektronid materjali tuumade ümber liiguvad eri suundades ning seega ei kannu magnetvälja hästi edasi, sest osakesed töötavad üksteisele vastu. Mõned metallid aga kannavad magnetvälja hästi edasi, sest suurem osa elektrone pöörleb ümber aatomite samas suunas. See ei tee metallidest veel magneteid, kuid see tähendab, et teatud metallid magneetuvad hästi. [3]

Magneteid on mitut sorti: ajutised magnetid, püsिमagnetid ja elektromagnetid. Ajutised magnetid tekitavad enda ümber magnetvälja kui nad on kokku puutunud magnetväljaga. Aja vältel ajutise magneti magnetväli kaob. Püsिमagnetid ei kaota oma magnetvälja nii lihtsalt, kui ajutised magnetid. Püsिमagneteid esineb ka looduses ja püsिमagnetid võivad olla teatud rauasulamid. Elektromagnetid on elektrijuhid, milles on vool. Kui vool katkeb, kaob ka elektromagnetite elektriväli. Tavaliselt on elektromagnetid pooli kujuga. See aitab suunata ja kontsentreerida tekitatud magnetvälja. [4]

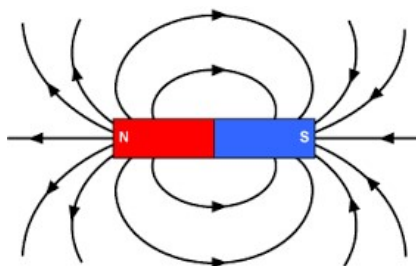
Magnetid tekitavad enda ümber magnetvälja, mida ei saa küll näha, kuid mis on siiski olemas. Magnetitel on lõuna- ja põhjapoolus, mis omavahel tõmbuvad. Samamärgilised poolused tõukuvad omavahel. [5] [1]

Elektromagnetite magnetvälja suunda saab määrata parema käe reegli järgi. Kui parema käe põial asetada voolu suunda, siis näppude loomulik pööramise suund on samas suunas elektrijuhite tekitatud magnetväljaga. Joonisel 1.1 on näha juhite oleva voolu suunda, tähistatud I -tähega, ja juhite ümber tekkiva magnetvälja suunda, tähistatud B -tähega. Magnetvälja jõujooned on samasuunalised sõrmedega. [6]



Joonis 1.1: Parema käe reegel [7]

Mähise elektrivälja suuna määramiseks võib kõrvutada joonist 1.1 joonisega 1.2, kus on näha püsिमagneti põhja- ja lõunapoolus. Põhjapoolus on tähistatud tähega N ja lõunapoolus tähega S. Jooniselt 1-2 on näha, et püsिमagneti magnetvälja jõujooned väljuvad põhjapooluselt ja sisenevad lõunapooluse poolt.[5] Samamoodi määratakse ka elektromagneti pooluseid.

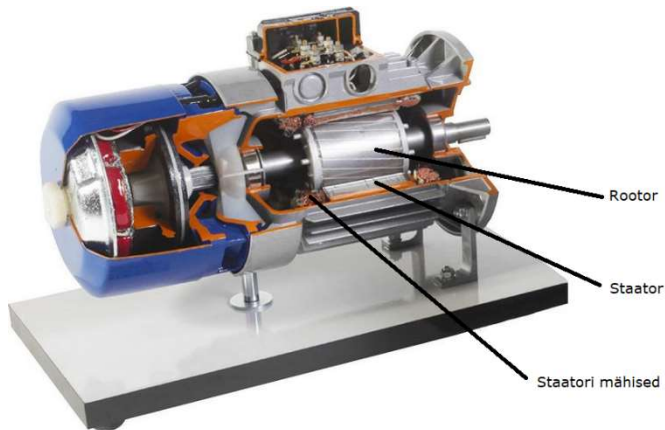


Joonis 1.2: Magneti põhja- ja lõunapoolus ning magnetvälja jooned [8]

Eletrimasinaid on mitut tüüpi, need erinevad ehituse ja osati ka tööpõhimõtete poolest. Mõned masinad kasutavad lisaks voolu kandvate juhtide abil tekitatud magnetväljale ka püsिमagneteid. Pöörlev liikumine tekib tänu rootori ja staatori elektriväljadele – rootori ja staatori erimärgilised magnetväljad püüavad saavutada kohakuti olekut ning samamärgilised poolused tõukuvad.

Magnetvälja koondamiseks ja juhtimiseks kasutatakse elektrimasinates ferromagnetilist südamikku. Magnetväli levib ka läbi õhu, kuid magnetiline takistus on ferromagneetiku sees palju väiksem. Et takistus on väiksem, liigub magnetvoog pigem mööda ferromagneetikut kui läbi õhu. See omakorda suunab magnetvälja staatori ja rootori vahel olemasse õhupilusse ja suurendab nii magnetvälja tihedust just seal, kus elektrienergia muundatakse mehaaniliseks energiaks. Magnetvälja suunamine vähendab magnetvälja leket masinast välja ja suurendab kasutegurit. [4]

Elektrimasin koosneb staatorist, rootorist ja mähisest, lisaks on elektrimootoril kest ja sõltuvalt masina suurusest ka jahutus. [1] Staator on elektrimasina seisev osa, mis ei pöörle. Rotor on elektrimasina osa, mis pöörleb. Mähised on tavaliselt vasktraadist keritud poolid, mis moodustavad pingestatuna elektromagnetid. [1] Sõltuvalt masina tüübist võivad mähised asuda staatoril, rootoril või ka mõlemal. Joonisel 1.3 on hästi näha reluktantsmasina rootorit ja staatorit. Mähised on märgatavad rootori ja staatori vahel.



Joonis 1.3: Reluktantsmasina osaline väljalõige [9]

Elektrimasinatel on ka ühiseid jooni. Üks nendest joontest on seos voolu tarbe ja koormuse vahel. Mida suurem on koormus, seda suuremaks läheb voolu tarbimine. Liiga suure koormuse korral mootor väärtab ega pöörle enam nii nagu enne liigkoormuse rakendamist. Lisaks on masina käivitamisel väiksema kiiruse tõttu suurem voolu tarbimine ning kui voolu pole piisavalt või soovitud kiirus on liiga erinev algkiirusest, võib sõltuvalt olukorrast masin mitte liikuda või teha midagi ettearvamatut. Lisaks võib ülekoormus liigse voolu tõttu masinat kahjustada. Elektrimasinaid ühendab omavahel ka see, et liikumine toimub magnetvälja mõjul. [4]

Enamlevinud elektrimasinate liigid on sünkroonmasin, asünkroonmasin ja alalisvoolumasin, mis omakorda jagunevad veel alaliikideks. Masinaid on võimalik ehitada nii pöörd- kui ka kulgliikumisega. Kuna pöördliikumisega elektrimasinad on levinumad ning töö tulemusena valmib pöördliikumisega elektrimasin, keskendume pöördliikumisega elektrimasinatele. [1]

Sünkroonmasin kujutab endast vahelduvvoolul töötavat elektrimasinat, kus mähised asuvad staatoril ja rootoril, masina magnetvälja illustreeriv läbilõige on joonisel 1.4 ning näitab, kuidas rootor pöörleb magnetväljaga sünkroonis ning jääb jõu tekitamiseks magnetväljast veidi maha. [1] Vahelduvvooluga toidetakse staatorimähiseid ja vahelduvvool tekitab staatoris nii-öelda pöörleva magnetvälja. Sünkroonmasina rootorit nimetatakse ka induktoriks ja see on elektromagnet, millel on võlli suhtes staatiline magnetväli. Väiksemates sünkroonmasinates võib leida ka püsिमagnetiga rootoreid. Sünkroonmasina induktorit ergutatakse tavaliselt alalisvooluga. Nii pöörlebki võll vahelduvvoolu tekitatud magnetväljas. [5]

Sünkroonmasina kiirus sõltub vahelduvvoolu sagedusest ning sünkroonmasin suudab hoida konstantset kiirust suurel koormusvahemikul. Masina kiiruse muutmiseks tuleb muuta sisendsagedust. Sünkroonmasina kiirus sõltub ka pooluspaaride arvust ning masina kiirust on võimalik arvutada valemiga 1.1.

$$f = \frac{p * n}{60} \quad (1.1)[1]$$

Kus

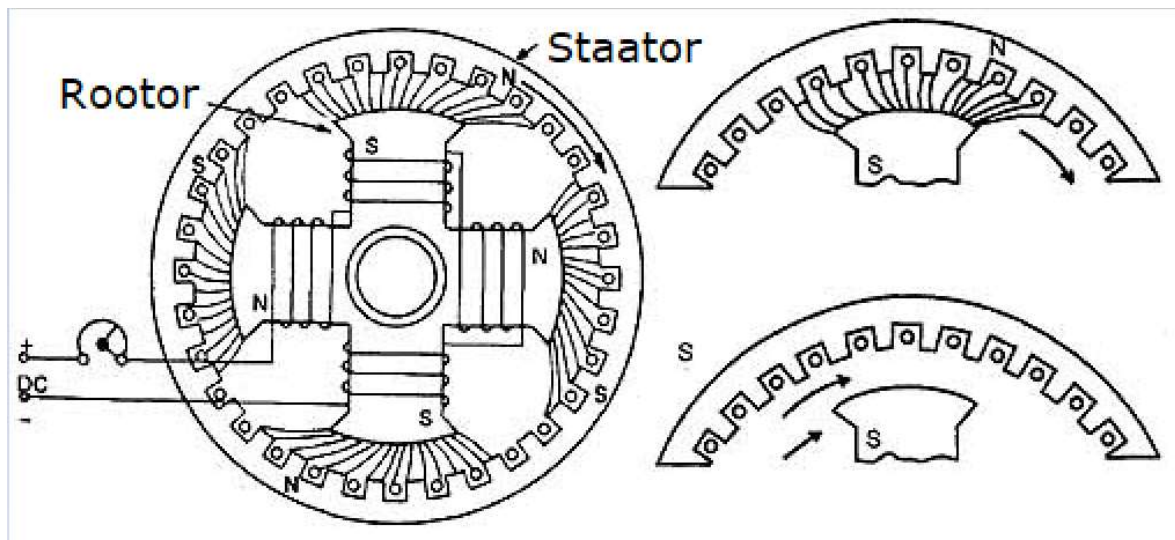
f on sagedus

p on pooluspaaride arv

n on sünkroonmasina kiirus

Valemist 1.1 saame

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



Joonis 1.4: Sünkroonmasina ristlõige [10]

Asünkroonmasin on vahelduvvoolul töötav elektrimasin. Asünkroonmasina staatoril on mähised ning rotor kujutab endast võllile asetatud silindrit. Asünkroonmasinale on omane libistus ehk kui palju rotor staatori indutseeritud elektromagnetvälja pöörlemisest maha jääb. [1] Sõltuvalt rotorist jagunevad asünkroonmasinad veel omakorda faasirootoriga ja lühisrootoriga asünkroonmasinateks.

Lühisrootoriga asünkroonmasina rotor kujutab endast kahte rõngast, mille vahel on vardad. Kuju tõttu on tal veel teinegi nimi: oravaratas (*ing. k squirrel cage*) sest see meenutab näriliste jooksuratast. Faasirootoriga asünkroonmasin on väga sarnane lühisrootoriga asünkroonmasinale, kuid faasirootoriga masinat on tänu rootorimähisele võimalik käivitada väiksema käivitusvooluga, mis säästab toitesüsteemi. Asünkroonmasinale on omased märgatavad kaod nii staatoris kui ka rotoris, kuid masin ise on odav ja töökindel tänu lihtsale konstruktsioonile ja vähestele liikuvatele osadele.

Harjastega alalisvoolumootor koosneb staatorist, mille elektrivälja tekitab kas mähis või püsimagnetid, ja rotorist, millel on mähised. Mähised on ühendatud kommutaatori külge. Kommutaator kujutab endast elektrimasina võlli osa, mida katavad rootorimähise kontaktid. Rotori mähised saavad toite harjaste kaudu, mis on libisevas kontaktis kommutaatoriga. [5]

Vahelduv-reluktantsmootor sarnaneb oma tööpõhimõttelt vägagi vahelduvvoolu sünkroonmootorile. Mõlema puhul pöörleb masina rootor staatori tekitatud magnetvälja kiirusel, kuid jääb sellest teatud nurga jagu maha. Maha jäämise nurk sõltub koormusest, mida väiksem koormus, seda lähemal on rootor staatori tekitatud magnetväljale. Vahelduv-reluktantsmootor kuulub alalisvoolumootorite hulka.

Vahelduv-reluktantsmootori rootoril on tavaliselt püsिमagnetid ning mähised asuvad rootoril. Seega pole rootor elektriliselt staatoriga ühendatud, kuid masina kiirust on võimalik üpriski täpselt juhtida. Seepärast nimetatakse antud mootorit ka harjasteta mootoriks – mootoril pole harjaseid, mis on tavaliselt alalisvoolu masinale iseloomulikud. Masina juhtimine käib positsioonianduri ja kontrolleri abil. Kontrolleri juhivad staatorimähiste pingestamist ning seeläbi on võimalik määrata masina kiirust. Harjasteta mootoril on kõrge kasutegur ja oma suuruse kohta on seetõttu tegu tavalisest võimsamate mootoritega. Levinud kasutusala on elektritööriistad, puldiautod, dronid, aga ka näiteks arvutite ventilaatorid. [1] Levinud on ka tagurpidise konstruktsiooniga vahelduv-reluktants-mootorid, kus staator ja rootor on kohad vahetanud. Staator koos mähistega on asetatud rootori sisse ning rootor keerleb ümber mootori. Kinnitamiseks on üks mootori ots. Antud mootorit nimetatakse ka *outrunneriks*.



Joonis 1.5: *Outrunner* vahelduv-reluktantsmootor [11]

1.2 Samm-mootori detailsem tutvustus ja tööpõhimõte

Samm-mootor kuulub harjadeta alalisvoolumootorite hulka [1] ning erineb teistest mootoritest selle poolest, et antud masin pöörleb sammude kaupa. Iga samm on teatud suurusega ning sõltuvalt masina ehitusest võib sammu suurus erineda. Tavaliselt jääb sammu suurus vahemikku $1,8^{\circ}$ - 90° . [5]

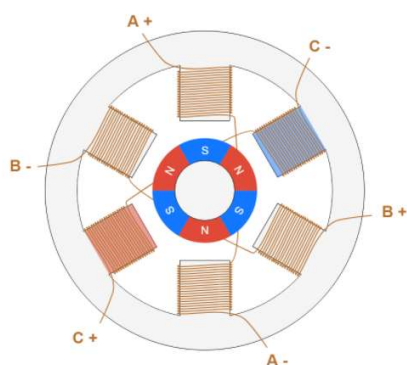
Staator

Samm-mootori staator on sarnane alalisvoolu vahelduv-reluktantsmootori staatorile. Mootori mähised asuvad staatoril ning mähiste pingestatust juhib kontrolleri. Staatoril on paarisarv mähiseid, mis moodustavad omavahel pooluspaarid, ehk kui ühel pool staatorit on mähis pingestatud põhjapoolusena, siis vastaspoolel staatoris on teine mähis, mida pingestatakse vastassuunas ehk lõunapoolusena. See võimaldab mootoril saavutada maksimaalse võimsuse kasutades olemas olevat riistvara. [4]

Rooror

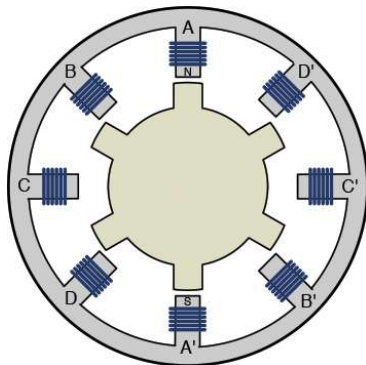
Samm-mootori tööpõhimõte seisneb nähtusel, kus magnetväljas vabas olekus olev metall- või raudobjekt üritab saavutada magnetväljaga pärisuunalist olekut. Põhimõttelt ei ole nähtus erinev kompassinõelast, mis pöörab end piki Maa magnetvälja jooni. [5] Samm-mootoreid on peamiselt kolme tüüpi: püsिमagnetrootoriga samm-mootor, vahelduv-reluktantsmootor ja hübriid-tüüpi mootor. [4]

Püsिमagnetrootoriga samm-mootori rootoris on kasutatud püsिमagneteid, mis võimendavad rootori magnetvälja. Püsिमagnetrootoriga samm-mootori struktuur on näha joonisel 1.6. Võimsama magnetvälja tulemusena on masinal rohkem väändejõudu, et pöörata rootori ja staatori magnetväli paralleelseks. [4]



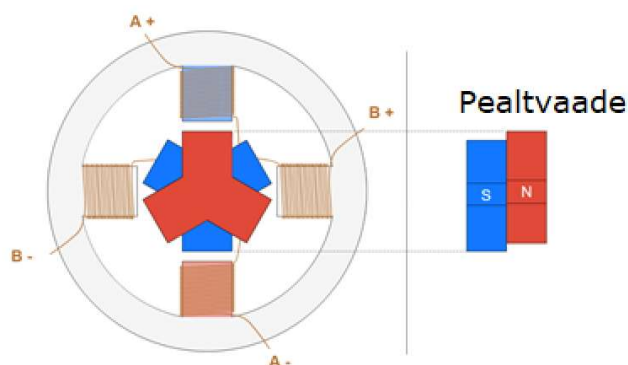
Joonis 1.6: Püsिमagnetrootoriga samm-mootor [12]

Vahelduv-reluktantsmootori rootor on metallist ning sellel ei ole oma magnetvälja. Staatorimähised tekitavad magnetvälja ning indutseerivad magnetvälja ka rootoris. Kui mähistes voolu pole pöörleb rootor vabalt. Vahelduv-reluktantsmootori struktuur on näha joonisel 1.7. Staatorimähiseid ja ka rootori pooluseid on paarisarv, et korruga oleks kohakuti paarisarv pooluseid rootorilt ja staatorilt. See on vajalik selleks, et saavutada maksimaalne võimsus ja väändejõud. Tavaliselt on aga staatorimähiseid rohkem paare kui rootori pooluseid, et oleks võimalik tekitada liikumine seisevast olekust ja määrata liikumisele suund. [4]



Joonis 1.7: Vahelduv-reluktantsrootoriga samm-mootor [13]

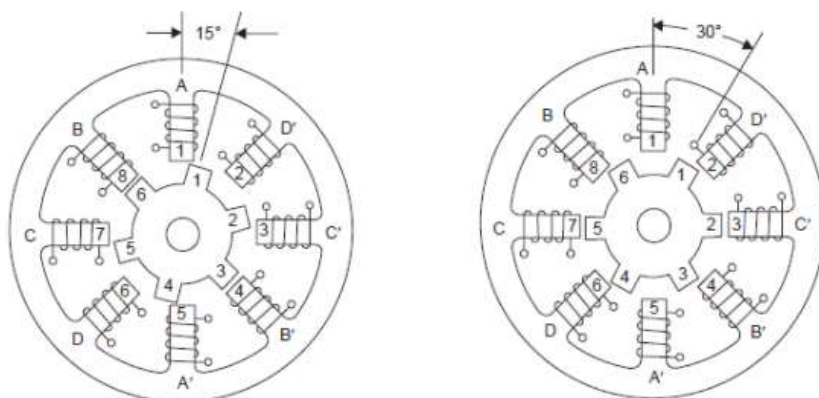
Hübriidrootoriga samm-mootor (joonisel 1.8) on oma nime saanud sellest, et tegu ei ole puhtalt püsिमagnetmootori ega ka reluktantsmootoriga. Erinevalt vahelduv-reluktantsmootorist on hübriidmootoril kaks kihti hambaid, mida ühendab püsिमagnet. Nii on hübriidmootoril magnetväli ka siis, kui staatorimähistel voolu pole ning rootor ei keerle vabalt. Kihtide hambad on vahelduvad ning kui ühe kihi hammas on suunatud staatoril aktiivse põhjapooluse suunas, siis teises kihis on suunatud vastasmärgiline poolus lõunapooluse suunas, seda teisel pool mootorit. Hübriidsamm-mootor on eriline ka selle poolest, et rootoril on tavaliselt väga palju pooluspaare, millest tuleneb suur sammude arv ühe ringi kohta. [4]



Joonis 1.8: Hübriidrootoriga samm-mootor [12]

Juhtimine

Samm-mootorit on võimalik juhtida ühe sammu, poolsammu ja mikrosammu kaupa. Täissammu astumiseks nimetatakse samm-mootori edasi liikumist mootori sisestruktuurist määratuna kõige väiksema vahemiku edasi astumiseks.



Joonis 1.9: Vahelduv-reluktants samm-mootori ühe ja kahe sammu astumine [14]

Joonisel 1.9 on näha, kuidas kaheksapooluselise staatori ja kuuepooluselise rootoriga samm-mootor teeb esimese ja teise sammu algpositsiooni suhtes. Täissamm on 15° ning kui algpositsioonil oli aktiveeritud A-pooluspaar, siis esimese sammu astumisel lülitati A-pooluspaar välja ning aktiveeriti B-pooluspaar. Teise sammu astumiseks lülitati B-pooluspaar välja ning aktiveeriti C-pooluspaar. Poolsammu astumiseks on vaja aktiveerida nii juba aktiivne pooluspaar kui ka järjekorras järgmine pooluspaar, mis juhul astub samm-mootor pool täissammust, näite puhul oleks täissamm $7,5^\circ$. Joonise 1.9 korral tähendaks see näiteks pooluspaaride A ja B korraga aktiveerimist, mis juhul oleks esimene samm olnud $7,5^\circ$. Nii on võimalik juhtida samm-mootorit täpsemalt kui olemas olev masina konstruktsioon täissammudega lubaks, säilitades suurema konstruktsiooniga mootori eelised. [15]

Samm-mootorit juhitakse enamasti eraldi draiveri abil. On võimalik ehitada ka ise transistorsild, mis juhiks samm-mootori staatorimähiste pingeid, kuid enamasti pole see ajaliselt põhjendatud. Nii ise ehitades kui olemas olevat draiverit kasutades on vaja lisaks jõukomponentidele mingit kontrolleri, mis saadaks vajalikud signaalid kas transistorisillale või draiverile. [15]

Faaside arv näitab, mitmeks erinevaks grupiks on staatorimähised jaotatud. Faaside arv võib erinevatel samm-mootoritel olla erinev. Tavaliselt leidub kahe, kolme ja neljafaasilisi, on olemas ka ühefaasilisi ja rohkem kui nelja faasiga samm-mootoreid. Ka

rootori sammude arv sõltub faaside arvust, kuid ka rootori hammaste arvust. Kasutades valemit 1.3 on võimalik arvutada, mitu sammu samm-mootor ringi jooksul teeb.

$$S = m * N_r \quad (1.3)[14]$$

Kus

S on sammude arv ringi jooksul,

m on staatori faaside arv ja

N_r on rootori hammaste arv.

Draivereid kasutades on juhtimine korraldatud peamiselt sammu ja suuna määramisega, leidub ka teisi versioone. Sammu tegemiseks saadetakse pingepulss draiveri teatud kontaktile ning sammu suuna määrab pingetase suunakontakti. Tavaliselt sisaldavad draiverid H-silda, lisaks võib draiveritelt leida sõltuvalt mudelist veel komponente ja funktsioone. Draiveri valik sõltub vajalikest funktsioonidest, koormusest ja hinnast. [15]

Samm-mootori eelised, kasutusala ja olulisus

Samm-mootori eelisteks on täpne juhitavus ja mitteliituv viga mootori pöörlemisel, mis teeb mootori täpseks ja seega ideaalseks valikuks näiteks printerites ja mõnedes tööstusmasinates – kohtades, kus on vaja täpset liikumist ja head juhitavust. Lisaks on sammu suurust teades võimalik vältida kalleid positsiooni määramise süsteeme, mis juhul on samm-mootor odavam ja seega eelistatud lahendus. [5] Lisaks on samm-mootoritel hea võime hoida positsiooni, mis on teatud juhtudel soovitud omadus. [15] Tänu kasutatavatele kontrolleritele on võimalik lihtsasti reguleerida ka samm-mootori kiirust ja võimsust. [4] Kiiruse reguleerimine on mootorite seas omane peamiselt sünkroonmootoritele ning samm-mootori puhul on see kasulik näiteks CNC masinapinkides ja liikuvates kaamerasüsteemides, kus vajalikud kiirused vahelduvad, kuid täpne liikumine on oluline.

Samm-mootorid ei ole veatud. Kui pärast tehtud sammu peab masin seisma jääma, liigub samm-mootor veidi üle soovitud positsiooni ja jääb sihtkoha ümber edasi-tagasi liikuma enne, kui hoog otsa saab ja masin soovitud sihtkohas seisma jääb. Kõnealust nähtust võib märgata näiteks kui kella sekundiosuti teeb sammu ning kohe pärast sammu tegemist vibreerib näidatava numbri juures, jääb seisma ning liigub siis järgmise vahemikuni edasi. Lisaks võib tagasisideta süsteemi juures tekkida probleeme, kui masin pingestamata olekus teatud positsioonilt liigub või kui ülekoormuse tõttu samm vahele jääb. Tagasiside puudumise tõttu pole süsteemile teada, et positsioon on vale ning sisse tekib korrigeerimata viga. Mootori üks eripäradest tuleneb võimest hoida positsiooni. Samm-mootor tarbib võimsust ka positsiooni hoides, [15] mistõttu pikalt

positsiooni hoidma jäänud samm-mootoril võib tekkida probleeme ülekuumenemisega, seda isegi juhul kui mootoril ei ole koormust. [5] Samm-mootorid ei ole tavaliselt ka väga kiired ning võrreldes teiste elektrimasinatega kipub nende kasutegur olema madal. [1]

2 LABORIJUHEND JA MAKETI KOOSTAMINE

2.1 Olemasoleva maketi kirjeldus

Olemasolev makett on ühes tükis terviklik komplekt, mis vajab kahte toitepinget: üks 5 V Arduinole tarbeks ning üks 5-35 V sisend masina jaoks. Makett on võimeline toitepinge vahemikus 5-12 V ise alaldama loogikapingeks ning sel juhul on maketti võimalik kasutada vaid 5-12 V toitepingega. Maketi näol on tegemist samm-mootoriga, mille staatoril on neli faasi ja neli pooluspaari. Iga pooluspaar on ühendatud eraldi faasiks. [16]

Staatori peamine osa on metallist rõngas, millele on puuritud võrdsete vahede tagant kaheksa auku. Puuritud augud on mähiste kinnituskohad. Staatori rõngas on 12 mm paks ning see on labori mõistes kasulik, sest tegu on väga tugeva konstruktsiooniga ning on vähe tõenäoline, et see võiks katki minna. Staator on tehtud kõrgsüsinikrauast ning on olemasoleva komplekti nõrk koht ja vähendab maketi kasutegurit. [16]

Olemasolevad mähised on keritud 12*12 mm ruudukujulise ristlõikega poolidele ning mähistele on keritud 400 ringi 0,2 mm² suuruse ristlõikega elektrimootori mähise traati. Mähist hoiab pooli peal paigas 3D prinditud hoidik. Lisaks asetsevad staatori pool mähise hoidiku peale kinnitatud ühenduse küljes mähise kontaktid ja kahesuunaliselt ühendatud LED-pirn. Iga mähis on kinnitatud staatori külge kasutades üht M6x16 kuusnurkpeaga polti. [16]

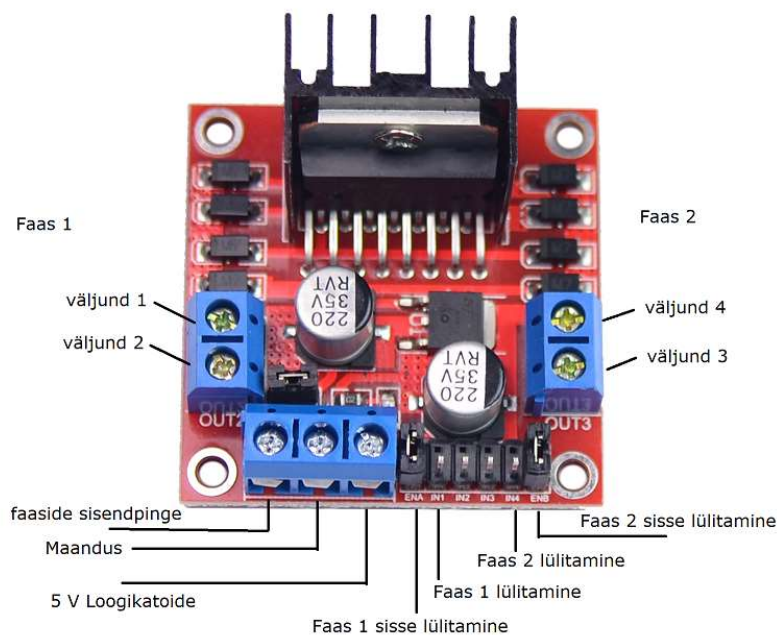
Maketi rootor on neljapooluseline püsimagnetitega rootor, mis on tehtud magnetvälja juhtivast rauast. Rootori igal poolusel on kaks magnetit, mis moodustavad igal poolusel ühe tervikliku, suurema magneti. Kasutatud on NdFeB magnetiteid, magnetite täpseid andmeid leida ei õnnestunud. Neodüümmagnetid on tuntud oma suuruse kohta tugeva magnetvälja poolest. Magnetid on orienteeritud pooluspaaride kaupa, kusjuures kaks kõrvuti olevat magnetit on orienteeritud põhjapoolusega sissepoole ja ülejäänud kaks kõrvuti olevat magnetit on orienteeritud põhjapoolusega väljapoole. [16]

Maketi juhtimine on korraldatud juhtpaneeli ja kahe Arduino plaadi abil. Juhtpaneel koosneb kahest keeratavast nupust ja puutetundlikust ekraanist. Eelmainitud keeratavad nupud kujutavad endast potentsiomeetreid, milledest ülemisega saab reguleerida masina võimsust kasutades pulsilaiusmodulatsiooni ja alumisega saab reguleerida masina kiirust. Puutetundlik ekraan annab masina juhtimiseks kaks valikut: *Auto* ja *Manual*. Automaatjuhtimisega on võimalik potentsiomeetreid kasutades

seadistada pöörlemise kiirus ja pulsilaiusmodulatsiooni läbi masina tarbitav võimsus ning vaadata, kuidas masin pöörleb. Manuaaljuhtimisega on võimalik igat pooluspaari vastavalt soovile pingestada ja välja lülitada. Pooluspaare on võimalik pingestada vaid ühte pidi. [17]

Arduino plaadid on omavahel ühendatud, kasutajaliidesel asuv Arduino tegeleb kasutaja sisestatud parameetritega ning mõõdab masina pinge ja voluparameetreid. Lisaks on puutetundlik ekraan ühendatud kasutajaliidese juures asuva Arduino külge. Masina sees paiknev Arduino saadab draiveritele vajalikke signaale vastavalt juhtpaneelil asuvalt Arduinolt saadud andmetele. Mõlemad Arduinod saavad toite ühelt L298N draiveri alaldilt. Komponentide ja potentsiomeetrite toiteks on ehitatud eraldi trükkplaadi peale 5 V toite ja maanduse latid. [17]

Draiveriteks on kaks L298N baasil valmis komponenti. Üks L298N draiver võimaldab kahe faasi juhtimist mõlemas suunas ning draiveri nimivool on 2 A. Draiver on näidatud joonisel 2.1. Olemasolevas maketis kasutatakse faaside lülitamiseks Arduino PINe 8-11. Joonisel on näha veel draiveri PINide vahelisi silde faaside lülitamiseks PINide juures, nimelt on draiverile sisse ehitatud võimalus faaside pidevaks aktiivsena hoidmiseks kasutades draiveri enda loogikapinget. Lisaks on draiverile võimalus ühendada sillaga 5 V loogikatoide, mis on nähtaval faaside sisendpinge ühendusklemmi taga. Nii saab piiratud voolu kasutades toita loogikakomponente kasutades draiveri alaldatud loogikapinget ning ei pea kasutama eraldi toidet mikrokontrolleri jaoks. [17]



Joonis 2.1: L298N draiver

Olemasoleva maketi korpus on 3D prinditud ja robustne ning tõenäoliselt peaks labori tingimustes hästi vastu. Korpus koosneb kolmest osast: karbi põhjast, kaanest ja kasutajaliidese osast. Karp sisaldab endas draivereid, Arduinot ning 5 V ja maanduse latte. Lisaks on karbi vasakul küljel mootori toiteklemmid ja sisse prinditud draiverite pingevahemik 5 – 36 V. Karbi kasutajaliidese poolne sein on avatud ning karbi põhja on prinditud kanalid signaalkaablite vedamiseks. Karbi kaanel asub maketi mootori osa. Karbi kaane pealmine osa on rootori jaoks süvendatud 10 mm võrra, veel lisaks on veidi sügavam süvend selleks, et olemas olevad mähiste otsad ära mahuks. Karbi kaas on kinnitatud poltidega karbi külge, lisaks hoiavad staatorit masina küljes neli 3D prinditud detaili. Kasutajaliidese osa on kolmnurkse profiiliga ning kasutaja poolsele küljele on kinnitatud puutetundlik ekraan NEXTION NX4832K035 2,4", teisel pool ekraani on ka kasutajaliidese poolne Arduino. [17]

Maketi töötamise puhul on aktiveeritud pooluspaar magnetilise põhja suunaline. See vähendab vajalikke juhtkontakte, kuid ei kasuta ära masina kogu potentsiaali, nimelt ei kasutata ära rootori üht pooluspaari ega sellega seotud staatoril olevaid pooluspaare. Pöörlemisel väikse täiteteguriga teeb masin vaid täissamme, täitetegurit suurendades hakkavad juhtimpulsside signaalid kattuma ning masin teeb ka poolsammud. See on nii sõltumata masina kiirusest ning pulsilaiusmodulatsiooni täitetegur ja kiirus ei ole omavahel seotud. Masin on võimeline pöörlema vaid päripäeva. [17]

2.2 Uue maketi loomine olemasoleva maketi põhjal

Olemasoleva maketi põhjal loodi uus makett, mis on sobilikum laboris kasutamiseks. Maketi osadeks jaotamine annab võimaluse maketti labori käigus kokku panna, mis aitab visualiseerida masina reaalsel kasutamist ja selle omadusi.

Samm-mootori kasutamiseks on vajalikud komponendid masin ise, draiver ja juhtimisimpulsse tekitav kontroller ning selle järgi jaguneb uus makett kolmeks osaks.

Samm-mootori mähised, staator ja rootor moodustavad esimese osa laboriks ette valmistatud komplektist. Staator ja mähised töötavad hästi ka olemasolevas konfiguratsioonis, muutmist vajasisid maketi põhi ja staatorit kinni hoidvad detailid. Maketi põhi valmistati 3D printimise teel ning on väga sarnane olemasoleva detailiga kuid uus korpus on ringikujuline vähendamaks materjali kulu printimisel. Lisaks on prinditavad komponendid seest täidetud sõrestikuga, et veelgi vähendada printimise kulu ja säilitada detaili tugevus. Staatori kinnituseks kasutatavad detailid muudetakse.

Praegu kasutuses olevad neli kinnitusdetaili vahetati ühe detaili vastu, mis sarnaneb küll olemasolevatele detailidele, kuid mille ülaosas on staatori rõngast jälgendav rõngas, kuhu toodi mähiste kontaktid. Kontaktid on vajalikud selleks, et saaks kasutada banaanühendusega kontaktidega juhtmeid maketi ühendamiseks labori käigus. Banaanühendus valiti just seetõttu, et seni on laboris analoogseid ühendusi kasutatud ning vajalikke juhtmeid on ülikoolis piisavalt, lisaks on neid lihtne ühendada. Uuel detailil vahetati välja varem kinnitamiseks kasutatud lapikpeaga plastikkruvid ning asendati M3x35 poltidega, korpuse kaane alumisele küljele prinditi augud M3 mutrite tarbeks. Kõik masina detailid on lisades 1-9.

Roor ja rootori võll jaotatakse kaheks osaks: rootori kuju jääb sarnaseks olemasolevaga, kuid seekord prinditakse rootor laserpaagutuse meetodil. Roori sisse paigutati ka püsomagnetid. Püsimateks kasutati igal rootori haral viit 2x10x10 mm N45 tüüpi magnetit, mis paigutati lapikult üksteise otsa, tulemuseks oli 10 mm pikkuste külgedega kuubiku kujuline magnet. Magnetid orienteeriti nii, et ühe faasi magnetid olid põhjasuunaga rootori keskmesse ja teise faasi magnetid olid põhjasuunaga rootorist väljapoole. Võll treitakse ning tehakse pikem, kui praegusel versioonil. Võlli pikemaks muutmine võimaldab kinnitada rootorit kahe laagriga, mis on vajalik, sest olemasoleva komplekti kerge kasutamise järel ei suutnud üks olemasolev laager rootorit sirgena hoida, selle tulemusena kolises rootor vastu staatori mähiseid, see aga häiris masina tööd. Selleks, et hoida masina konstruktsioon lahtisena, asetati üks laagerrootori alla rootorile väga lähedale ning teine laager asub masina korpuse põhja lähedal. Võlli fikseerib alumise laagri all olev kinnitus. Roor ja rootori võll on lisades 4 ja 7. Kasutusel olev laager vahetati kahe 608ZZ laagri vastu. Vahetuse põhjuseks oli parem kättesaadavus ja väiksem hind. Laagriga sobivuseks ja kaalu vähendamiseks muudeti võll peenemaks, võllil säilitati ülemisele laagri toetumiseks vajalik serv. Võll ja laager on ühendatud nelinurkse väljalõikega rootoril ja nelinurkse otsaga võllil.

Draiver moodustab teise eraldiseisva osa laborimaketist. Olemasoleval maketil on kasutatud kaht kahefaasilist draiverit, kuid kahe pooluspaariga rootor ja nelja pooluspaariga staator võimaldavad oma konstruktsiooni poolest kasutada kokku kaht faasi. Uue draiveri mooduli jaoks valiti välja üks MAKER MDD3A draiver, mis on võimsam, kui varem kasutatud L298N draiverid. Draiverite võrdlus on toodud tabelis 2.1. Lisaks on varem kasutatud L298N draiveril suur pingelang, kui läheneda reklaamitud 2 A faasivoolule.

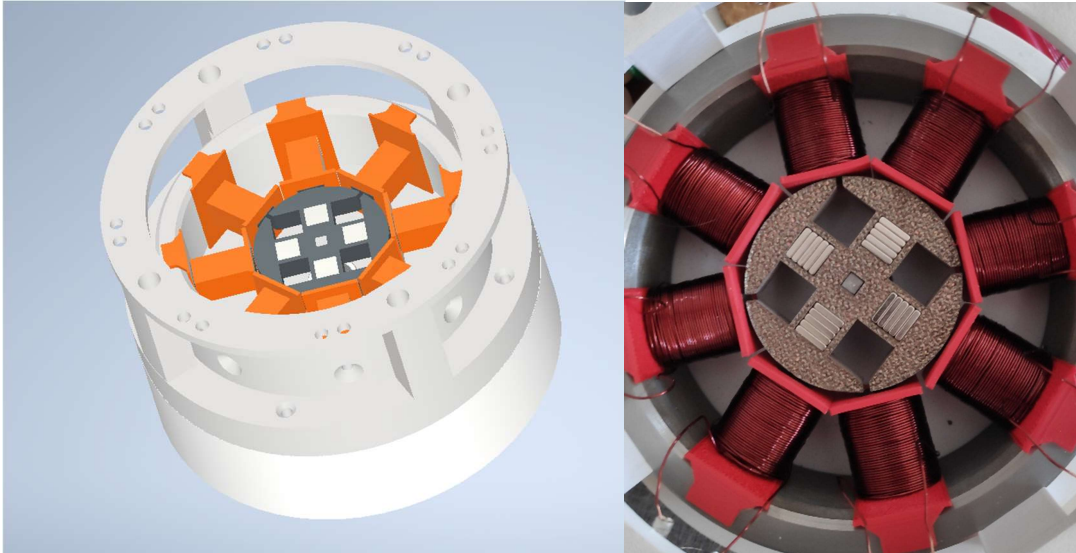
Tabel 2.1: Draiveri valik

| Draiver | Faasi nimivool | Pingelang 12 V / 2 A juures | Vajab lisaks jõukomponente masina tööks | Pingevahemik | Sisaldab alaldit |
|----------------|-------------------------|-----------------------------------|---|--------------|---------------------|
| L298N | 2 A | 4,9 V | Jah | 5-36 V | Jah |
| MAKER MDD3A | 3 A, hetkeliselt 5 A | 0,3 V | Ei | 4-16 V | Jah |

Draiver valiti peamiselt selle pärast, et MAKER MDD3A suutis mootori käima panna. Varem kasutatud L298N baasil draiverit kasutades ei olnud võimalik masinat käima panna, katsetamise käigus lakkas töötamast kaks eksemplari ning antud draiver vajab veel lisaks jõukomponente, et masinat lülitada. MAKER MDD3A ei vajanud lisakomponente ning töötas veatult. Vaatamata väiksemale pingevahemikule tööparameetrites on suurem maksimaalne vool ja töökindlus piisavalt mõjuvad põhjused, et valida MAKER MDD3A draiver. Kuna draiveri põhjal on kontakte, mis ei ole isoleeritud, tuleb need laboris võimalikult ohutu keskkonna tagamiseks ja masina töö tagamiseks isoleerida. Kindla aluse, ohutuse ja professionaalse välimuse eesmärgil kinnitatakse draiver pleksiklaasist alusele M3 5 mm kõrguste distantspoltidega. Draiveri faaside kontaktid ühendatakse draiveri tagumise poole juurde eraldi pleksiklaasist riiulile. Draiveri jõukontaktid ühendatakse võimalikult lähedale algsele asukohale ja grupeeritakse paaridena. Draiveri PINe eraldi ühendustega ringi ei ühendata ning nende asukoht jääb samaks.

Juhtpaneeliks on kaks potentsiomeetrit, millega saab reguleerida masina kiirust ja pulsilaiusmodulatsiooni täitetegurit. Nii Arduino Uno mikrokontroller kui ka potentsiomeetrid on ühendatud ühele fikseeritud alusele, et potentsiomeetreid oleks võimalik lihtsalt keerata ja et ühendused kasutamise käigus lahti ei tuleks.

Masina 3D mudel ja pilt valmis masinast on kõrvuti joonisel 2.2. Võrreldes olemasoleva maketiga on suurimad erinevused kindlalt kinnitatud ja vabalt keerlev völli, völli ja rootori eraldatus, masina osadeks jagamine ja banaanühendused, millede abil makett kokku tuleb panna. Funktsionaalse poole pealt on magnetitel väiksem jõud ning kleepumine on vähenenud, lisaks kui varem kleepus rootor kahe pooli vahele ehk poolsammu peale, siis nüüd on kleepumine täissammu peal, mis peaks tähendama lihtsamat ja sujuvamat pöörlemist.

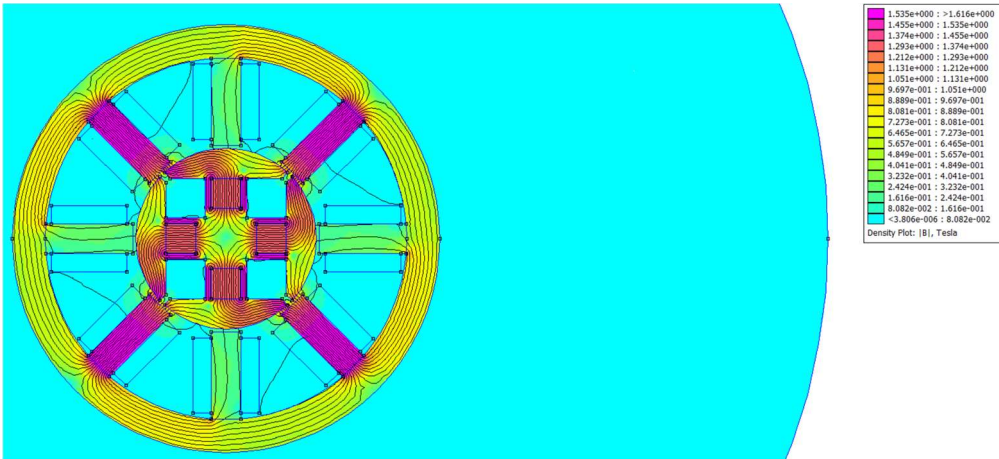


Joonis 2.2: Masina 3D mudel (vasakul) ja pilt valmis masinast (paremal)

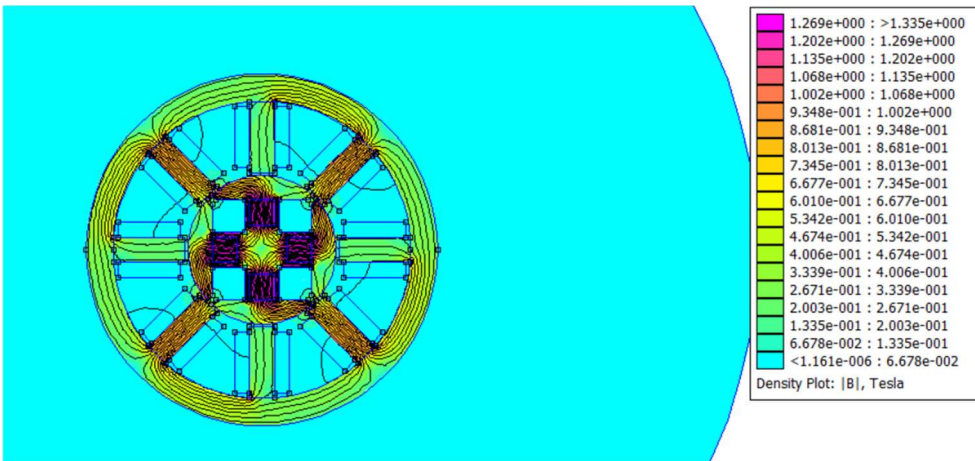
2.3 Laborimaketi joonised ja arvutused

Masina analüüs

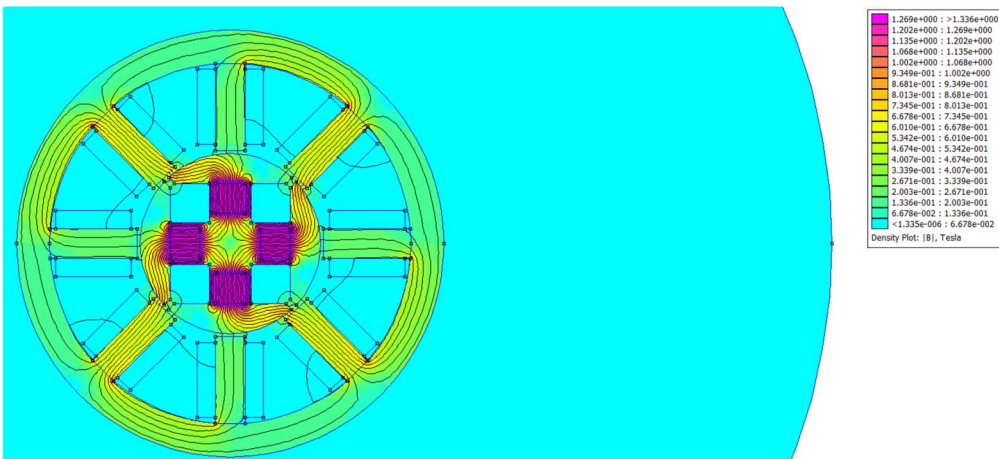
Kasutades FEMM tarkvara tehti magnetanalüüsid ning need on leitavad joonistelt 2.3-2.6. Analüüsi parimat võimalikku keermete arvu, et masin saaks töötada ka väiksemal voolutugevusel, kui draiveri maksimaalsel voolutugevusel. Kuna pingete vahemik on suur, otsustati alles jätta pulsilaiusmodulatsiooni võimalus, et mitte ületada draiveri maksimaalset lubatud voolutugevust 3 A. Mähise pöörete arvu valimisel võeti arvesse staatori ja poolide sisu magnetilist täituvust. Komponentid on tehtud süsinikterasest, mille magnetiline täituvus on ligikaudu 1,5 T [18]. Selle saavutamiseks oleks vaja 800 pööret 2 A voolutugevuse juures. Vastav analüüs on joonisel 2.3 ning analüüs on tehtud kasutades voolutugevust 2 A. Mähisele mahtus realselt 216 pööret ning kasutades voolutugevusi 1 A, 2 A ja 3 A. Nendele väärtustele vastavad analüüsid on joonistel 2.4, 2.5 ja 2.6. Reaalse talitlemise korral arvestades olemasolevate draiverite piiranguid on võimalik saavutada ligikaudu 1 T, mis on kaugel materjalidest tingitud piiridest.



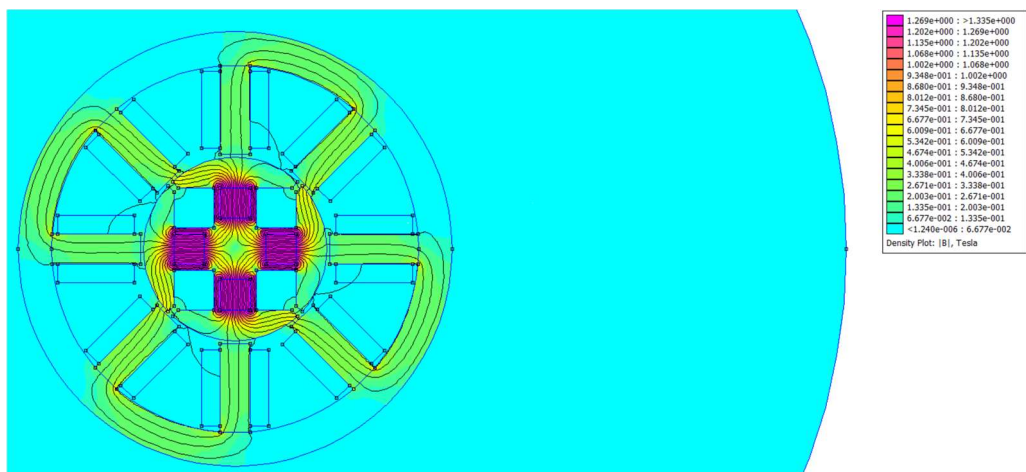
Joonis 2.3: 800 pöoret, 2 A



Joonis 2.4: 216 pöoret, 3 A



Joonis 2.5: 216 pöoret, 2 A



Joonis 2.6: 216 pööret, 1 A

Peale magnetilise täituvuse on piiravaks teguriks ka see, kui palju mähisetraati realselt poolile mahub. 3D-prinditud mähise hoidik on pärast printimist 24,5 mm pikk ning madalaimas punktis 25 mm kõrge, seega võeti need mõõdud piiravateks teguriteks. Mähisetraadi diameetriks valiti kättesaadavusest ja eeldatavast voolust tulenevatel põhjustel 0,6 mm. Vastavate parameetritega tehti arvutused. Mähised keriti poolile kihtidena. [4]

Kihile mahtuvate keermete arv arvutati valemiga 2.1:

$$N_{kiht} = \frac{l}{d} = \frac{25}{0,6} = 41\frac{1}{3} \quad (2.1)$$

Kus N_{kiht} on pöörete arv mähise kihil,

l on detaili pikkus ja

d on mähisetraadi diameeter.

Keermed keeratakse maksimaalse mahutamise eesmärgil kihtidena. Et kerimisel ühelt kihilt teisele vahetumine ei ole sujuv, läheb mõlemast servast kaotsi 2 pööret kihi kohta. Lisaks tekib ligikaudu ühe pöörde võrra kadu kihi kerimise jooksul, sest mähisetraat ei ole rullis täiesti sirge ning kõiki traadi kõverusi ei ole võimalik käsitsi kerimise käigus eemaldada. Reaalne kihilemahtuvate keerdude arv arvutati valemiga 2.2.

$$N_{kiht,realne} = N_{kiht} - 2 * 2 - 1 = 41\frac{1}{3} - 5 \approx 36 \quad (2.2)$$

Kus $N_{kiht,realne}$ on realselt kihile mahtuvate pöörete arv.

Eeldatav kihtide arv on leitav kasutades pooli maksimaalset kõrgust. 3D prinditud mähise hoidva detaili mõõtused arvestades on keritava pooli maksimaalne kõrgus 5,5 mm, seega ei tohi keritav pool olla kõrgem, vastasel juhul hakkab keritud mähis poolilt

maha vajuma ning ei täida enam oma eesmärki. Teades juhtme ristlõiget saab arvutada maksimaalse kihtide arvu. Maksimaalne kihtide arv on ümardatud alla, et vältida mähiste vajumist üle pooli serva. Selleks jäeti varuruum, mis on väiksem, kui ühe kihi kõrgus.

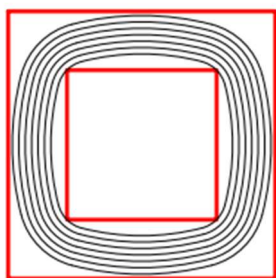
Teoreetiline maksimaalne kihtide arv on arvutatud valemiga 2.3.

$$k = \frac{H}{d} = \frac{5,5}{0,6} \approx 9 \quad (2.3)$$

Kus k on maksimaalne kihtide arv ja

H on detaili kõrgus alumisest äärest ülemise ääreni.

Käsitsi kerides ei ole võimalik saavutada 90° nurki, tuleb arvestada ka painderaadiuseid ja sellest tuleneva mähisetraadi kumerusega. Kerimisel saavutati ligikaudu viiekordse diameetriga painderaadius ehk 3 mm, mis on viiekordne traadi diameeter. Kihtide paiknemine on kujutatud joonisel 2.7.



Joonis 2.7: Mähise kihtide paiknemine

Ühele poolile mahutati kuus kihti mähist. Sõltuvalt sellest, kui sirge mähisetraat vastaval lõigul oli ning kui tugevalt mähist keriti, olid tulemused väikse erinevusega. Kahe pooli korral oleks mahtunud ka seitsmes kiht, kuid masina sujuvaks tööks oli olulisem, et poolid oleksid samaväärsed. Keritud poolidest kaks olid pärast kerimist lühises ning tuli uuesti kerida. Lühises poolid olid keritud kasutades suuremat jõudu ja seega väiksema painderaadiusega, kui 3 mm. Teades kihtide arvu ja kihile mahtuvate keermete arvu arvutatakse valemiga 2.4 välja kogu keermete arv.

$$N_{kogu} = N_{reaalne} * k = 36 * 6 = 216 \quad (2.4)$$

Kus N_{kogu} on tervele poolile keritud pöörete arv.

Järgnevateks arvutusteks on vaja teada mähise takistust, mis tuleb valemist 2.5.

$$R = \frac{\rho * l}{A} \quad (2.5)$$

Kus ρ on vase eritakistus,
 l on juhtme pikkus ning
 A on juhtme ristlõike pindala.

Vase eritakistus on $1.72 * 10^{-8} \Omega m$ (4).

Juhtme pikkus arvutati valemiga 2.6.

$$l = (r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5 + r_6) * N_{kiht} \quad (2.6)$$

Kus l on juhtme pikkus,
 r_{1-6} on pooli kihtide ühe keeru pikkused.

Pooli kihtide ühe keeru pikkused on saadud CAD tarkvaras koostatud jooniselt 2.7 (vt üles). Erinevatel kihtidel paiknevate mähisekeerdude pikkused on toodud tabelis 2.2

Tabel 2.2: Erinevatel kihtidel paiknevate mähiste pikkused.

| Kiht | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. |
|-------------|------|------|------|------|------|------|
| Pikkus (mm) | 60,2 | 64,0 | 67,7 | 71,5 | 75,3 | 79,0 |

Juhtme pikkus on:

$$l = (r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5 + r_6) * N_{kiht} = (60,2 + 64 + 67,7 + 71,5 + 75,3 + 79) * 36 \approx 15,04 m \quad (2.7)$$

Et kerimisel arvestada kadudega, kasutatakse töös 5% lisapikkust. Kaod tulenevad keermelt keermele liikumisest, mähisetraadi kõverustest ning lisaks tuleb jätta ühendamiseks vajalikud otsad.

$$l_{reaalne} = l * 1,05 \approx 15,79 m \quad (2.8)$$

Kuna kasutati 0,6 mm diameetriga traati, saab arvutada traadi ristlõike pindala kasutades ringi pindala valemit. Kuigi traat on lakikattega, on katte kiht õhuke ja selle töö raames loetud tühiseks.

$$A = \pi * r^2 \quad (2.9)$$

Kus r on masinatraadi raadius

$$r = \frac{d}{2} = \frac{0,6}{2} = 0,3 mm \quad (2.10)$$

Kus d on masinatraadi diameeter

$$A = \pi * r^2 = \pi * \left(\frac{0,6}{2}\right)^2 \approx 0,283 mm^2 = 2,83 * 10^{-7} m^2 \quad (2.11)$$

$$R = \frac{\rho * l}{A} = \frac{1,72 * 10^{-8} * 15,79}{2,83 * 10^{-7}} = 0,96 \Omega \quad (2.12)$$

Mõõdetud poolide takistused ning protsentuaalne erinevus arvutatust on tabelis 2.3.

Tabel 2.3: Mõõdetud poolide takistused

| Pooli nr | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $R_{mõõdetud}, \Omega$ | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Delta % | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |

Neli keritud pooli ühendatakse jadamisi üheks faasiks, seega ühe faasi takistus tuleneb valemist 2.13:

$$R_{faas} = R_1 + R_3 + R_5 + R_7 = 3,6 \Omega \quad (2.13)$$

Kus R_{faas} on kogu faasi arvutuslik takistus

$R_{1,3,5,7}$ on ühe faasi alla ühendatud takistid

Katsetamisel kasutati masina toitepingena 12 V pinget, mis pulsilaiusmodulatsiooni kasutamata teeb nõutud vooluks

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{3,6} = 3,3 A \quad (2.14)$$

Maksimaalne nõutav vool ületab valitud draiveri pideva voolu piiri, kuid jääb alla hektelise voolu maksimumi. Draiver on valitud hästi, kuid pulsilaiusmodulatsiooni kasutamine on endiselt vajalik.

2.4 Juhtimisloogika ja kood

Kuna tegu on samm-mootoriga, tuleb masinat juhtida kasutades draiverit ja mikrokontrollerit. Mikrokontrolleriks valiti Arduino Uno. Valiku põhjuseks oli, et sellel on piisavalt kontakte, et katta draiveri vajadused ning lülitamisloogika on 5 V, mis on piisav, et lülitada draiverit. Lisaks otsustati juhtida masinat kahe faasiga ning jäädavalt lülitamisloogikasse sisestada poolsammud. Nii saab kindlamini määrata mootori pöörlemise suunda.

Juhtimiseks kasutati digitaalväljundeid 3 ja 9-11 ning pulsilaiusmodulatsiooni saavutamiseks kasutati Arduino Unole funktsiooni DigitalWrite(), mille väljund pulsilaiusmodulatsiooniks võimelistel väljundkontaktidel meenutab analoogsignaali. Signaali sagedus on 490 Hz ning täiteteguri määramiseks kasutati potentsiomeetrit

saadud lugemid kasutades AnalogRead() käsku. Samal meetodil loeti mootori kiirust reguleeriv väärtus. Mootori kiiruse piiramiseks oli iga täispöörde kohta lisaks ka ooteaeg 80 ms, mis teeb koos piiranguga maksimaalseks pöörlemiskiiruseks

$$s = \frac{1}{t_{\text{ooteaeg}}} = \frac{1}{0,08} = 12,5 \text{ Hz} \quad (2.15)$$

Kus s on mootori kiirus ja

T_{ooteaeg} on sisse programmeeritud minimaalne viiteaeg.

Pulsilaiusmodulatsiooni sõltumatus ülejäänud koodist andis võimaluse kasutada Delay käsku ning samal ajal hoida pulsilaiusmodulatsiooni käimas, lisaks saab täiteteguri hoida täpse ja stabiilsena. Kordamööda lülitati faasidel aktiivseks üks kontakt, siis teine. Väljundsignaalide põhjal aktiveeris draiver vajalikud faasid ja juhtis sellega mootorile jõudvat voolu ja mootori kiirust.

2.5 Laborijuhend

Labori eesmärgiks on anda tudengile ülevaade samm-mootori tööpõhimõttest, visualiseerida elektrimasinate tööpõhimõtet üldiselt ning tuua välja elektrimasinate eripärad, millega tuleb arvestada elektrimasinate kasutamise juures.

Labori läbimiseks on tudengil vaja omandada eelteadmised samm-mootori tööpõhimõttest ja juhtimisest. Lisaks peab tudeng eelnevalt teadma samm-mootori häid ja halbu külgi, et teada, millele laboris tähelepanu pöörata. Eelteadmised on vaja läbi töötada enne labori toimumist. Laboris eeldatakse, et tudeng oskab lugeda elektriskeeme, et laborimakett kokku panna. Lisaks on vajalikud ohutustehnilised teadmised, et labori kulg oleks ohutu. Lisas 10 on laborile eelnevalt loetav informatsioon samm-mootori olemusest ning eripäradest. Lisas 10 on ka labori ülesanded ja küsimused, küsimuste selgitused ja põhjendused on lisatud töösse järgnevalt.

Masina kokku panemine on esimene samm laboris. Komplekti kokku panemine on oluline samm, sest see võimaldab esiteks komponente eraldi näha ja katsuda ning teiseks mõelda läbi komponentide töö ja omavaheline koostöö. Komponentide eraldi nägemine ja katsumine annab võimaluse teemat paremini meelde jätta. Komponentide ühendamine pärast nende eraldi nägemist ja katsumist aitab mõista komponentide omavahelist toimimist ja koosmõju ning seeläbi saab labori läbija paremini aru elektrimootori tööst üldiselt ja samm-mootori tööst täpsemalt.

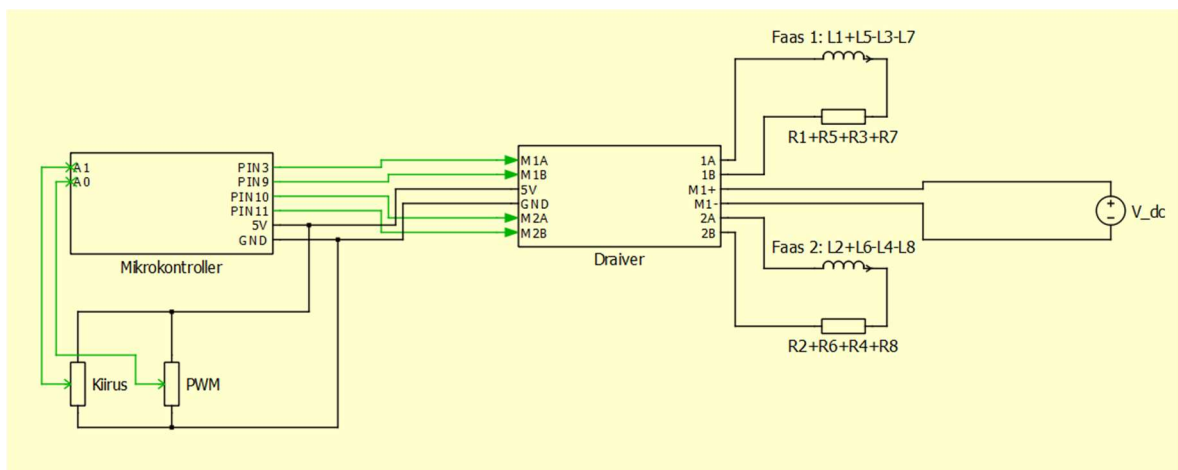
Labori komplekt koosneb mikrokontrollerist, draiverist ja mootorist endast. Mikrokontrolleriks on Arduino Uno, millele on eelnevalt peale laetud kood. Draiveriks on MAKER MDD3A, mis on kinnitatud alusele ja mille kõik kontaktid on lihtsasti ühendatud. Mootor on spetsiaalselt labori tarbeks ehitatud ning eelnevalt kirjeldatud samm-mootoril põhinev elektrimasin, mida saab kasutada ka alalisvoolu sünkroonmootorina. Jooniste 2.8 ning 2.9 põhjal tuleb ühendada mikrokontroller draiveriga ning draiver masinaga. Joonistel on toiteühenduseg märgitud mustade joontega ja loogikaühendused märgitud roheliste ühendustega.

Joonis 2.8 põhjal tuleb ühendada omavahel potentsiomeetrid, mikrokontroller Arduino Uno ja draiver. Lisaks on joonisel 2.8 kirjeldatud kujundlikult faaside ühendamist ja ühendamise suunda. Mikrokontroller Arduino Uno on ühendatud 5 V ja GND kontaktidega kahe potentsiomeetri külge, mida loevad analoogsisendid A0 ja A1. Arduino on ühendatud draiveri külge kontaktide 3, 9, 10, 11 kaudu, lisaks saab mikrokontroller toite ja maanduse draiveril asuvalt alaldilt, mis toodab 5 V pinget.

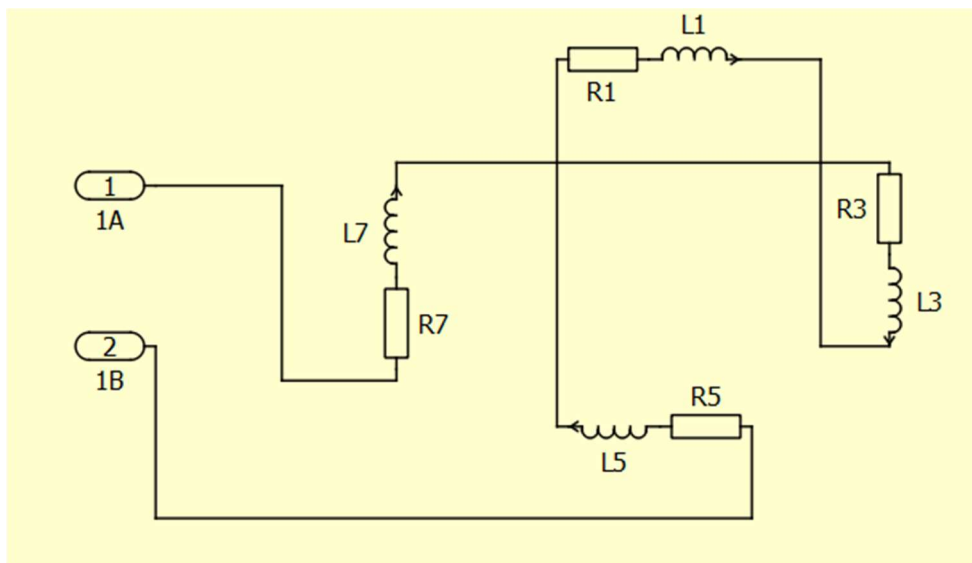
Mikrokontrolleri toide tuleb ühendada otse 5 V latile, et vältida mikrokontrolerile ehitatud pingeregulaatorit, millel on omakorda pingelang.

Joonis 2.9 kirjeldab faasi 1 ühendamist. Üks faas koosneb kahest üksteisega risti asetsevast pooluspaarist. Pooluspaar, mis koosneb poolustest 7 ja 3, on ühendatud kokkuleppeliselt „+“-poolega ning pooluspaar, mis koosneb poolustest 1 ja 5, on ühendatud vastupidi ehk „-“-poolega.

Labori käigu sujuvuse hoidmiseks ning et ühendatavad kontaktid aja jooksul paremini vastu peaks, kasutatakse masina toite ühendamiseks banaanühendusi ning juhtimisloogika ühendamiseks maketeerimisjuhtmeid.



Joonis 2.8: Arduino ja draiveri ühendamine



Joonis 2.9: Esimese faasi ühendamine

Katsete ja küsimuste selgitused

Katse 1 iseloomustab samm-mootori liikumise täpsust, mõõtkava ja korratavust ilma tagasisideta. Sammude täpsuse mõõtmine annab aimu sellest, et samm-mootori tehtud sammud on sama suured ning sellest omaduset tulenevad ka samm-mootori levinud kasutusala ja eelised.

Sammude arvu saame arvutada valemist 1.3:

$$S = m * N_r = 2 * 4 = 8 \quad (1.3)[14]$$

Kus

S on sammude arv ringi jooksul,

m on staatori faaside arv ja

N_r on rootori hammaste arv.

Arvestades ka poolsamme on

Arvestades poolsamme on sammude arv S kaks korda suurem, ehk $S = 2 * 4 = 8$.

Sammu pikkus kraadides:

$$S = \frac{360}{n} = \frac{360}{16} = 22,5^\circ \quad (2.16)$$

Katse 2 sisaldab endast masina seisu olekust käivitamist ning kohe suure kiiruse nõudmist. Laborikomplekt kasutab voolu piiramiseks pulsilaiusmodulatsiooni meetodit, reaalne võimsus on väike ja 10 Hz pöörlemiskiirus on lähedal masina maksimumkiirusele. Väikse võimsuse ja kiiresti pöörleva magnetvälja tõttu masin ei käivitu, vaid kas seisab või vibreerib koha peal, mõnedel juhtudel keerleb aeglaselt tagurpidi, sõltuvalt pulsilaiusmodulatsiooni täitetegurist ja rootori algspositsioonist.

Raskused käivitamisega on omased eriti suurtele elektrimasinatele, mille käivitusvoolu on raske või rahaliselt mitteotstarbekas saavutada. Suur käivitusvool on omane kõikidele mootoritüüpidele ning käivitusvool on suurem ka väiksema võimsusega masinatel, kuid korraks suurema voolu saavutamine ei ole väga väiksel skaalal tavaliselt määrav.

Probleemi saab antud juhul lahendada masinat aeglaselt käivitades, mis juhul jõuab rootor masina antud võimsust kasutades pöörlevale magnetväljale järele. Aeglasemal käivitamisel ja kiiruse tõstmisel, kui rootor juba pöörleb, töötab masin probleemideta. Veel on abiks masinale saadaoleva voolu suurendamine, mis tõstab masina võimsust ja seeläbi on võimalik masinat kiiremini kiirendada.

Katse 3 annab ülevaate konkreetse masina omadustest ja seeläbi ülevaate ka samm-mootori kasutamisel nähtavate suuruste mastaapidest. Pulsilaiusmodulatsiooni kasutades on võimalik masin saada ligikaudu 0,8 A kasutades tööle. Täitetegurit tuleb kontrollida arvutuslikult. Erinevus kasuteguri ja eeldatava kasuteguri vahel võib tulla

kadudest masinas või juhtimiskomponentides, lisaks võib rolli mängida ka laboris kasutatud mõõtevahenditest.

10 Hz kiirusel 12 V toitepingel on eeldatav masina tarbitav vool 0,8 A. Faasi võimsus arvutatakse valemiga 2.17.

$$P = I^2 * R = 0,8^2 * 3,6 = 2,3 \text{ W} \quad (2.17)$$

Katse 4 kasutab ära pulsilaiusmodulatsiooni, et vähendada masina võimsust ilma, et masin töö katkestaks. Nii on võimalik suurendada masina kasutegurit, säästa elektrit ja ennetada komponentide läbi põlemist liiga suure voolu tõttu. Lisaks on võimalik täitetegurit vastavalt vajadusele suurendada ja vähendada, mis annab eelise erinevate koormuste juures. Sünkroonmasin pöörleb vahelduvvoolu tekitatud magnetväljas sama kiiresti, kui magnetväli ja kui võimsus on piisav, ei ole lisavõimsusest peale soojuste tekitamise kasu. Nähtus on omane sünkroonmootoritele ja alalisvoolu harjasteta mootoritele. Märgi aruandesse minimaalne saavutatud vool ja masina kiirus antud hetkel.

Katse 5 eesmärk on näidata pulsilaiusmodulatsiooni kasutamist elektrimasinates. Katse esimese mõõtmise käigus mõõdetakse pulsilaiusmodulatsiooni ühe perioodi pikkus millisekundites ja arvutatakse pulsi täitetegur. Täitetegurit võrreldakse masina täiteteguriga. Tõenäoliselt on tulemus sarnane, kuid mitte täpselt sama. Mõõtetulemuse ja ekraanil kuvatud suuruse erinevus võib tuleneda masina komponentide reaktsiooni- ja lülitusajast või muudest teguritest. Pulsi pikkus tuleb mõõta ostsilloskoobiga. Täiteteguri arvutamiseks kasutatakse valemit 2.17.

$$T\% = \frac{T_{on}}{T} \quad (2.17)$$

Kus $T\%$ on täitetegur,

T_{on} on mõõdetud mähise töös olev aeg

T on kogu perioodi mõõdetud aeg

Katse 6 vähendab täitetegurit piirini, kus masina töös hoidmine on suurem koormus, kui masinal parasjagu võimsust on ehk piltlikult masin koormatakse üle. Masin ei ole enam sünkroonis pöörleva magnetväljaga ja väärtab või seiskub. Katse eesmärk on demonstreerida väärtuspunkti, mis on omane kõikidele masinatele.

KOKKUVÕTE

Töö teooriaosas seletati põgusalt lahti levinumad mootori tüübid ning see oli hea kordamine juba õpitule. Täpsemalt seletati lahti samm-mootori erinevad tüübid ja nende tööpõhimõtted ja suurem osa kirjutatut oli ka mulle uus. Huvitav oli näha, kuidas sünkroonmootorist on digitaalajastu tulekuga välja kasvanud harjasteta alalismootor ja samm-mootor, kaks väga erineva kasutusala masina tüüpi, mis on konstruktsioonilt üllatavalt sarnased.

Töö praktilises osas koostati labori tarvis taustateadmiste pagas, mis tuleks läbi lugeda enne labori sooritamist, labori küsimused ja vajalikud elektriskeemid. Lisaks valmistati olemas olev makett laboriks ette lisades vajalikud ühendused, mis sobivad laboris kasutatavate juhtmetega.

Taustateadmiste osa jaoks vajaliku informatsiooni valimine oli keerulisem, kui algul tundus, sest kõik teadmised tundusid olulised. Ajapikku sai välja valitud täpsema suunitlusega teadmiste pagas, mida pole liiga palju.

Labori küsimuste koostamine oli samuti huvitav ning küsimused valmisid laborimaketti katsetades. Erinevaid seadeid proovides tulid esile erinevad elektrimasinate omadused, millest oli küll loengus räägitud, kuid mida polnud siiani katsetada saanud. Valminud küsimuste ja katsete abil loodan, et tudengitel on sama palju avastamisrõõmu ning teooria ja praktika seostamist, kui mul oli neid katseid kirjeldades.

Maketi ette valmistamine nõudis suurt ümber disainimist, sest olemas olev makett näeb terviklik välja ja töötab kui tervik, kuid labori näol on võimalikud tegevused piiratud. Laborimaketi osadeks jaotamine andis võimaluse tutvuda samm-mootori draiveriga ja lähemalt mõista seda, kuidas samm-mootor ja seeläbi ka mootorid üldiselt ühendatud on. Maketi avatud konstruktsioon on väga hea viis visualiseerida masina kui sellise tööd.

Elektriskeemide ja jooniste tegemine oli väljakutse ning ootamatute takistuste, nagu näiteks sobiva kirjanurga puudumine, sundis mind juba tuttavaid programme palju lähemalt tundma õppima ja tegemise käigus avastasin, et AutoCad ja Inventor on palju võimsamad ja mahukamad programmid, kui ma siiani arvasin.

SUMMARY

In the theory part of the thesis the more common electric motor types were briefly explained. Different types of the stepping motor and their working principles were explained in more detail. It was interesting to see how with the rise of the digital world the synchronous motor developed into the brushless DC motor and the stepping motor, two different types with wildly different use cases, yet very similar in construction.

In the practical part of the thesis background knowledge required for completing the laboratory work was prepared. Background knowledge is meant to be read before starting the laboratory work. Questions and necessary electrical schematics were prepared, as well as the laboratory kit complete with banana connectors to ensure compatibility with existing wires in the laboratory.

Selecting the necessary information for the background knowledge was more difficult than expected, as there were many details and bits of information that seemed important for completing the laboratory work. In time the most necessary information was selected.

Compiling the questions for the laboratory work was interesting and were completed while testing the laboratory kit. While testing different settings different qualities appeared that had previously been covered in class but there were no possibilities to test or see them. With the questions and the laboratory kit prepared, it is expected that the students completing the laboratory work will have the joy of trying what was described in class, discovering, and connecting practice and theory.

Preparing the laboratory kit required a redesign, as the existing kit that was used as an example was one complete package that limited the possibilities in the laboratory work. During the laboratory work it was important that the kit would be assembled to represent the different components needed to run a stepping motor. Creating a kit that can be assembled gives the students a chance to see and better understand the control algorithms, the driver, and the motor and how they interact together. The open construction of the motor helps visualise the working principles of electrical machines in general.

Making the electrical schematics and technical drawings was a challenge and revealed that the already familiar programs such as AutoCad and Inventor had many more options and functions that were not used before by the author.

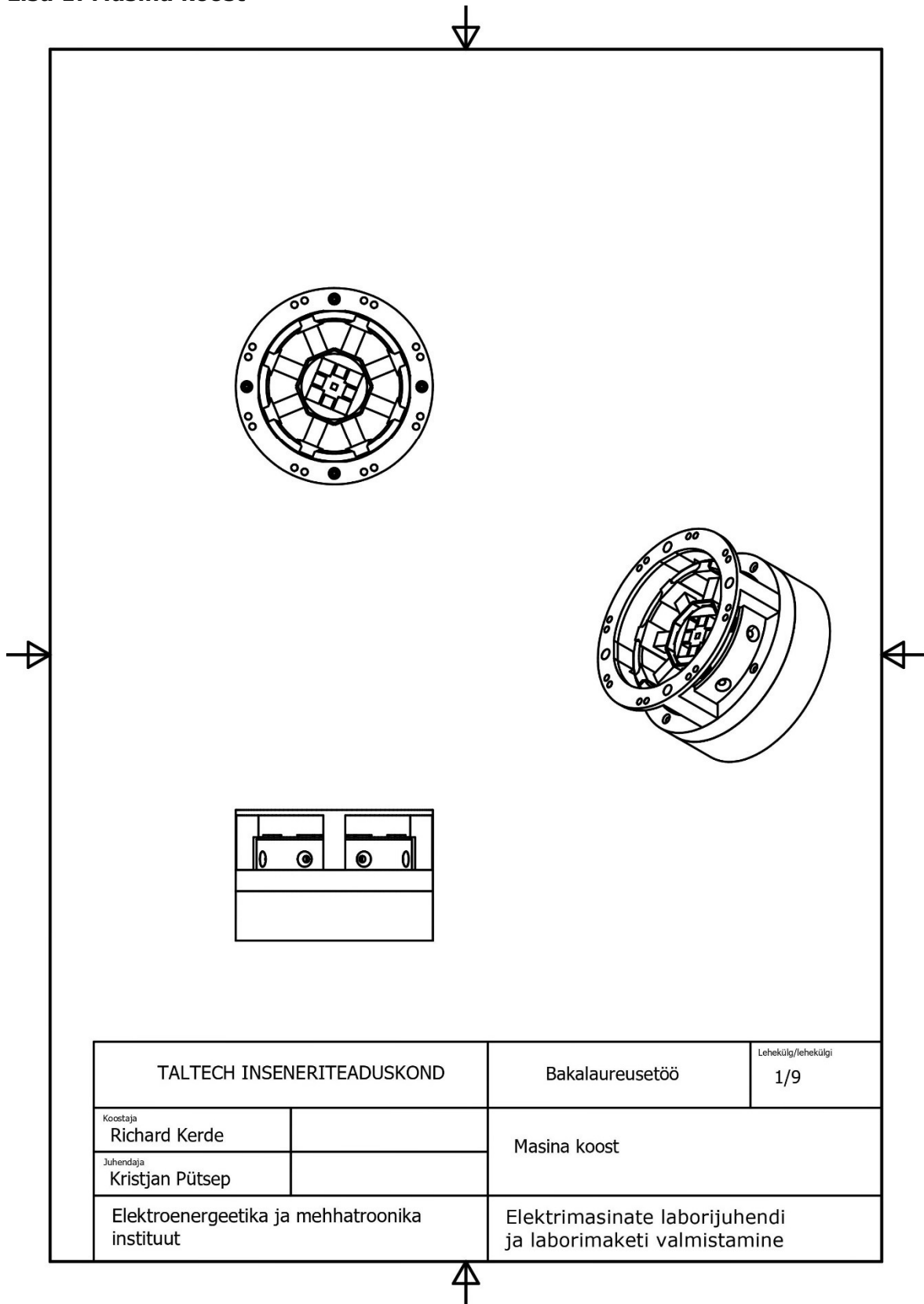
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. K. Janson ja A. Kallaste, Elektrimasinate alused. TTÜ Kirjastus, 2017.
2. V. L. Hanson, *Haptic visions: rhetorics of the digital image, information, and nanotechnology*. Anderson: Parlor Press, 2015.
3. National Geographic Society, "magnetism," National Geographic Society, 09-Oct-2012. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/magnetism/>. [Vaadatud: 10.05.2021]
4. D. Hanselman, Brushless motors: magnetic design, performance, and control of brushless dc and permanent magnet synchronous motors. Ballston Spa, NY: E-Man Press LLC, 2012.
5. A. Hughes, Electric motors and drives, 3rd ed. Oxford: Elsevier Ltd, 2006.
6. J. Keljik, Electricity 4: AC/DC motors, controls, and maintenance, 8th ed. New York: Thomson Delmar Learning, 2006.
7. "Why does the right hand rule work for determining the direction of magnetic field around a straight current carrying wire?," *Physics Stack Exchange*, 01.03.2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://physics.stackexchange.com/questions/343192/why-does-the-right-hand-rule-work-for-determining-the-direction-of-magnetic-fiel>. [Vaadatud: 10.05.2021].
8. *How Magnets Work*. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ece.northeastern.edu/fac-ece/nian/mom/work.html>. [Vaadatud: 10.05.2021].
9. "Three-Phase Self-Braking Electric Motor," NADA Scientific. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://nadascientific.com/technology_education/three-phase-self-braking-electric-motor.html. [Vaadatud: 15.05.2021].
10. The Synchronous Motor. [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.industrial-electronics.com/electy4_20.html. [Vaadatud: 10.05.2021].
11. "Rctimer 5010 360KV Multicopter Brushless Motor," *RCTimer Hobby Online Shop*. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.rctimer.com/rctimer-5010-360kv-multicopter-brushless-motor-p0233.html>. [Vaadatud: 15.05.2021].
12. C. Fiore, "Stepper Motors: Types, Uses and Working Principle: Article: MPS," Stepper Motors: Types, Uses and Working Principle | Article | MPS. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses>. [Vaadatud: 10.05.2021].
13. M. Scarpino, Motors for makers: a guide to steppers, servos, and other electrical machines. Indianapolis, IN: Que, 2016.
14. Sivaranjith, "Stepper motors working types," Industrial Automation, PLC Programming, scada & Pid Control System, 08.08.2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://forumautomation.com/t/stepper-motors-working-types/4346>. [Vaadatud: 10.05.2021].
15. T. Kenjo and A. Sugawa, Stepping motors and their microprocessing controls, 2nd ed. New York: Oxford University Press Inc, 1994.
16. A. Tammiksaar, "LAHTISE KONSTRUKTSIOONIGA SAMM-MOOTORI PROJEKTEERIMINE JA VALMISTAMINE," praktiline töö, 2018.
17. A. Tsikin, "3D PRINDITUD ELEKTRIMASINATE JUHTIMISMUUNDURI EDASIARENDUS," magistritöö, 2018.

18. F. Rumiche, J. Indacochea and M. Wang, "Assessment of the Effect of Microstructure on the Magnetic Behavior of Structural Carbon Steels Using an Electromagnetic Sensor", *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 17, no. 4, pp. 586-593, 2008. Saadaval: 10.1007/s11665-007-9184-2.

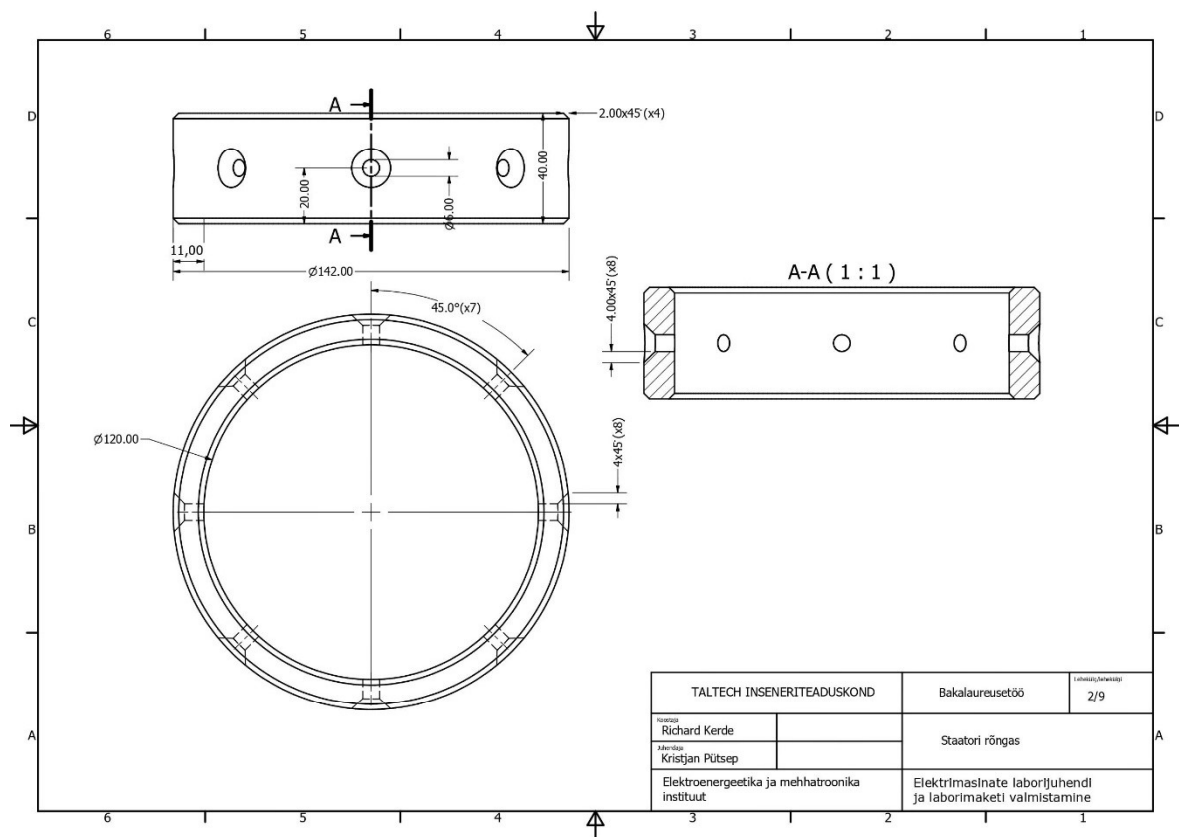
LISAD

Lisa 1: Masina koost

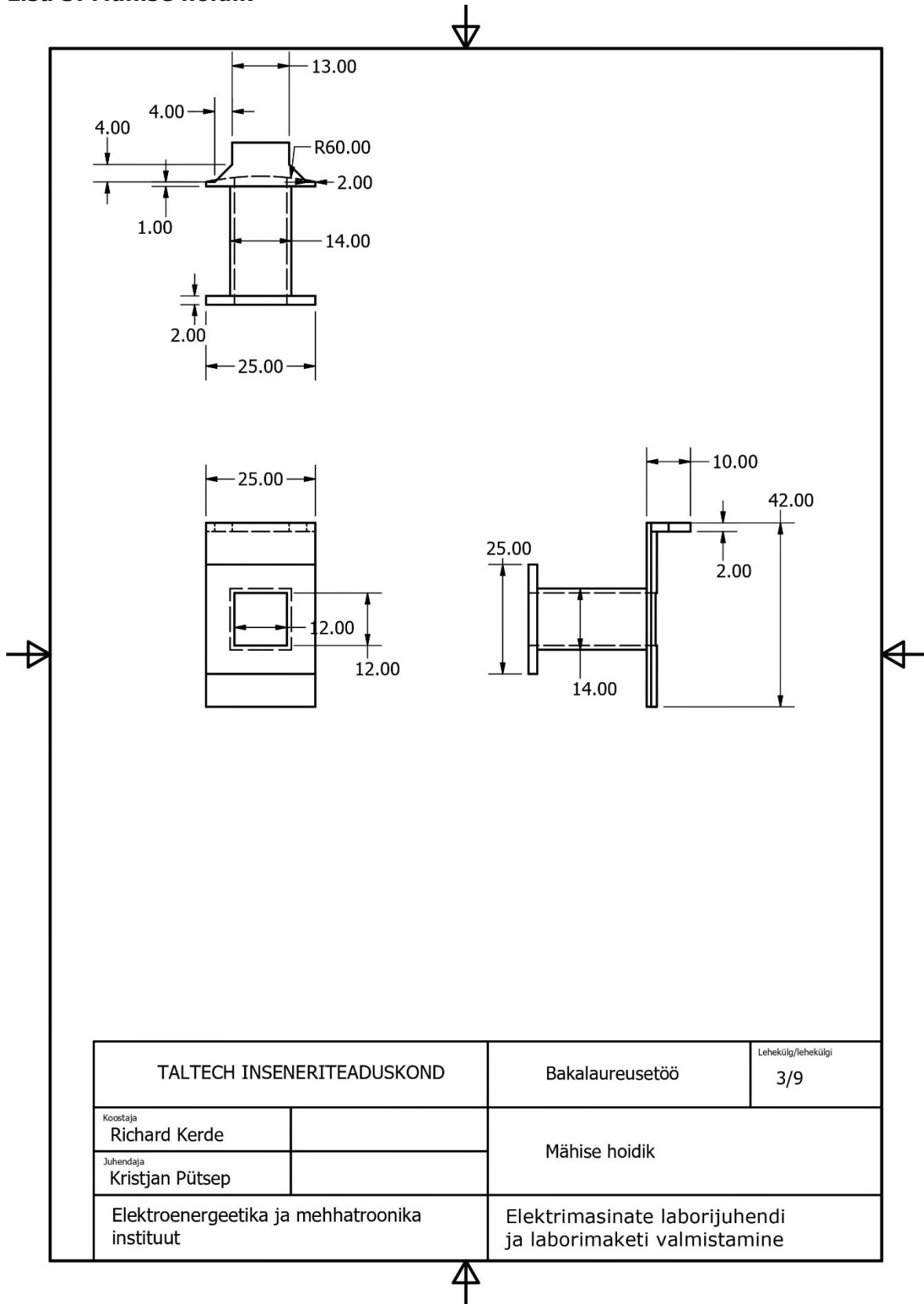


| | | | |
|---|--|--|---------------------------|
| TALTECH INSENERITEADUSKOND | | Bakalaureusetöö | Lehekülg/lehekülgi 1/9 |
| Koostaja Richard Kerde | | Masina koost | |
| Juhendaja Kristjan Pütsep | | | |
| Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut | | Elektrimasinate laborijuhendi ja laborimaketi valmistamine | |

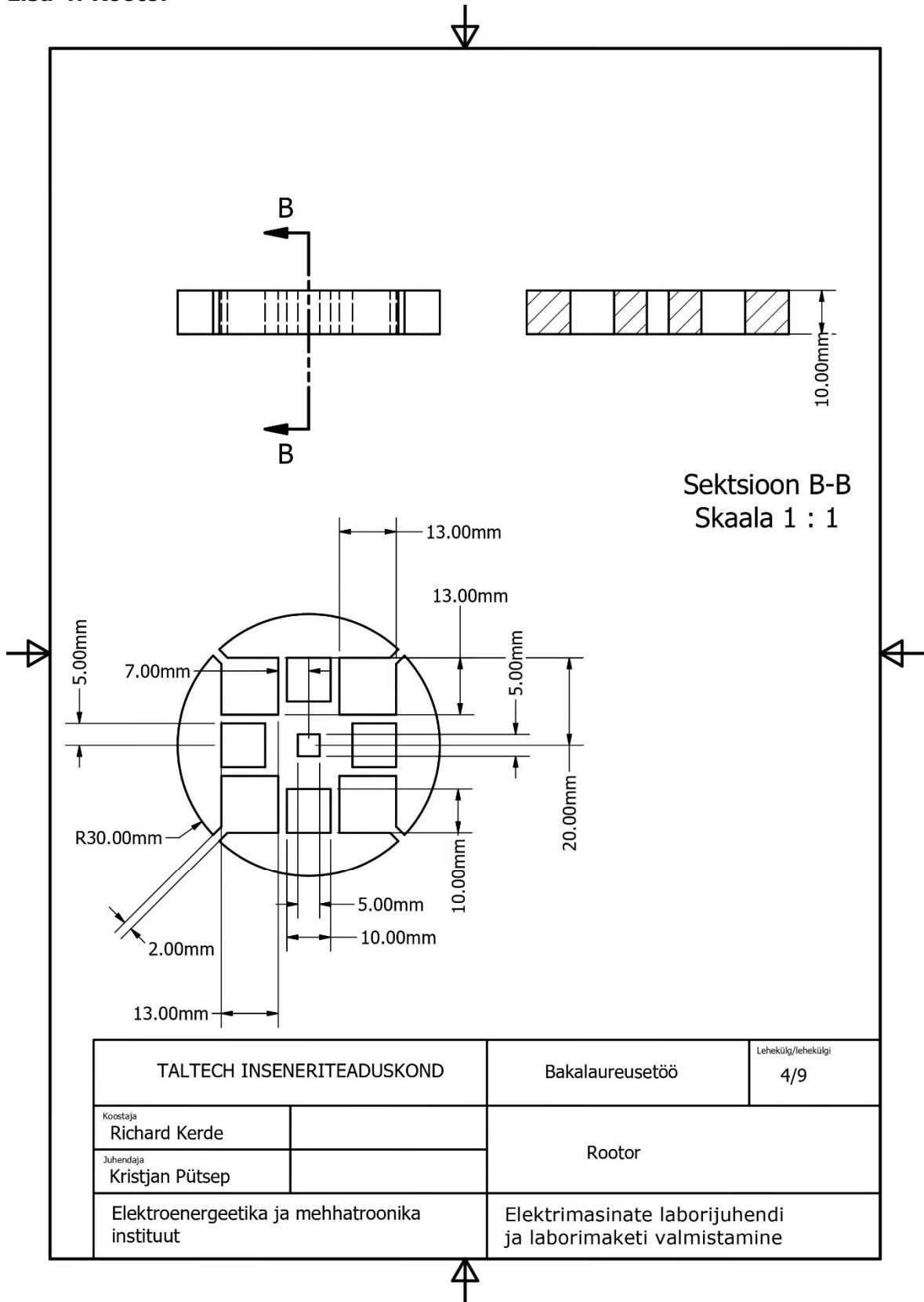
Lisa 2: Staatori rõngas



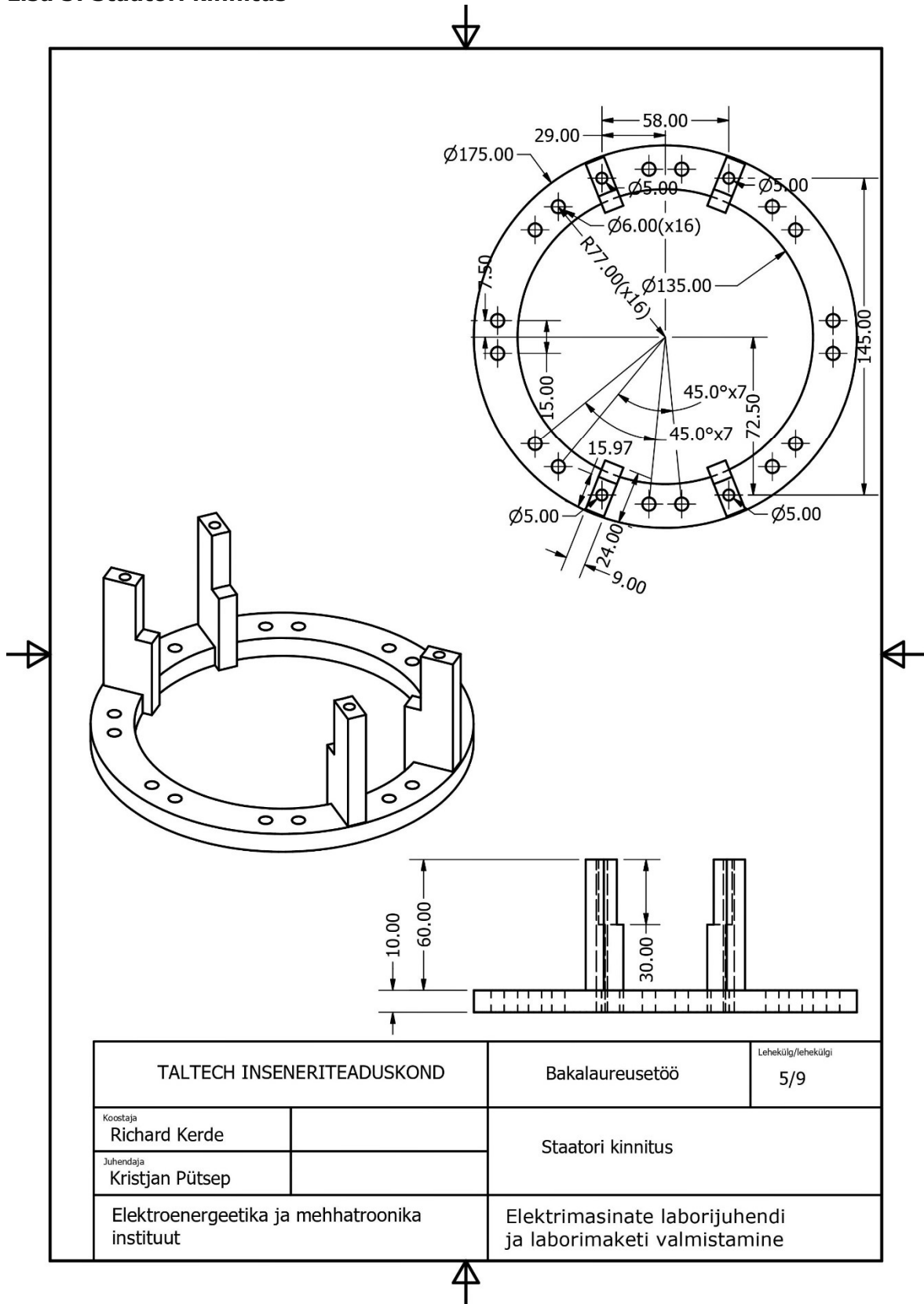
Lisa 3: Mähise hoidik



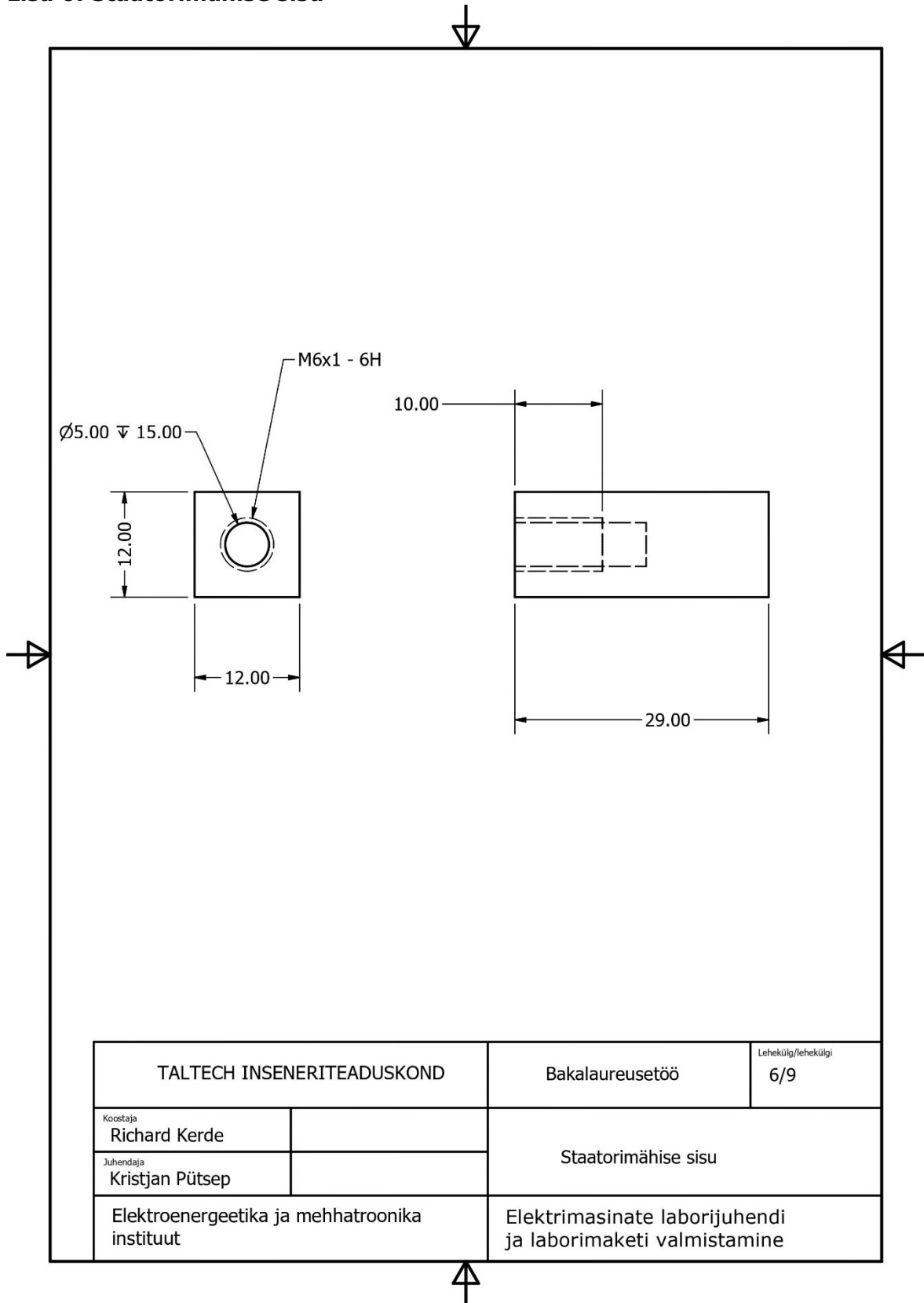
Lisa 4: Rotor



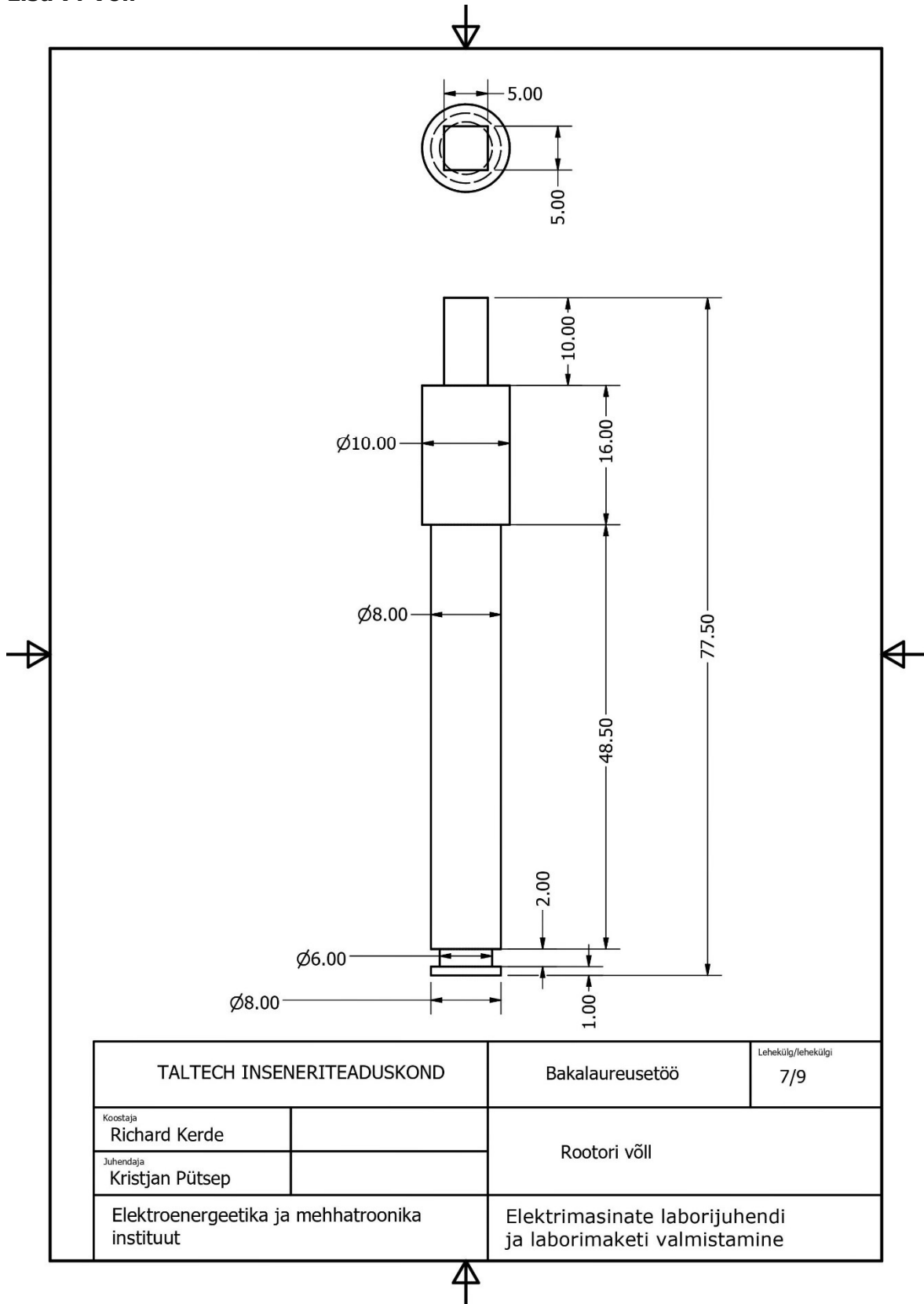
Lisa 5: Staatori kinnitus



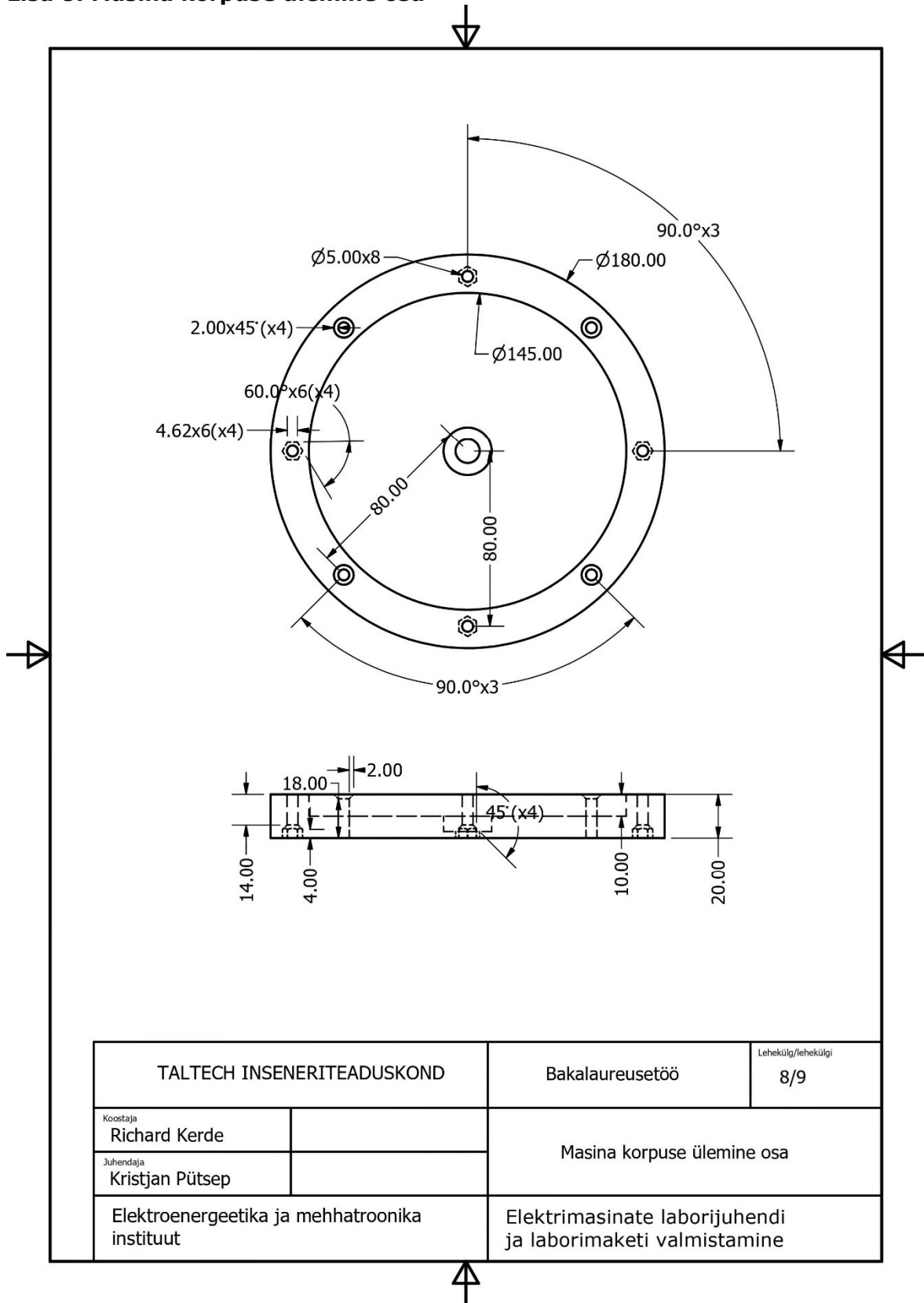
Lisa 6: Staatorimähise sisu



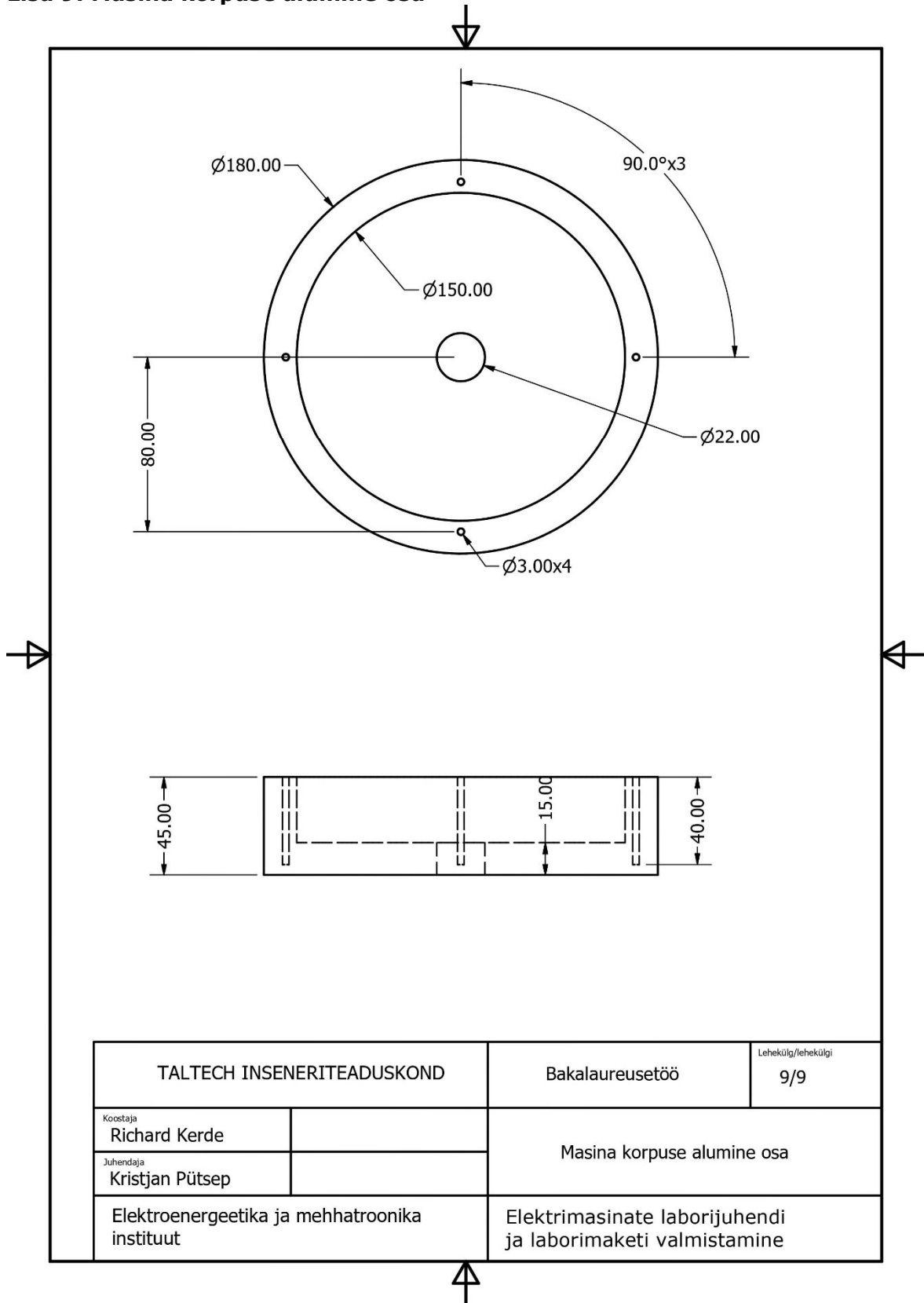
Lisa 7: Võll



Lisa 8: Masina korpuse ülemine osa



Lisa 9: Masina korpuse alumine osa

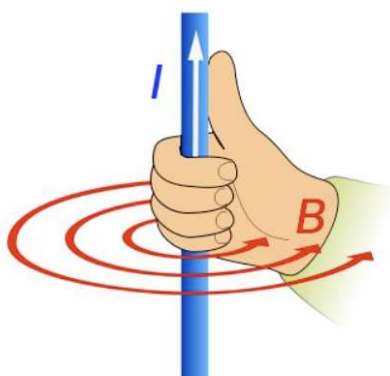


Lisa 10: Laborijuhend

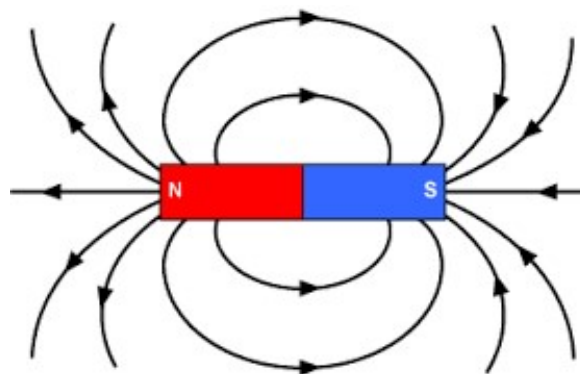
Laboriks vajalikud eelteadmised

Elektromagnetite magnetvälja suunda saab määrata parema käe reegli järgi. Kui parema käe põial asetada voolu suunda, siis näppude loomulik pööramise suund on samas suunas elektrijuhi tekitatud magnetväljaga. Joonisel 0.1 on näha juhis oleva voolu suunda, tähistatud I -ga, ja juhi ümber tekkiva magnetvälja suunda, tähistatud B -ga ning on samasuunaline sõrmedega. [6]

Mähise elektrivälja suuna määramiseks võib kõrvuata joonist 0.1 joonisega 0.2, kus on näha püsिमagneti põhja- ja lõunapoolus. Püsिमagneti põhjapooluselt väljuvad magnetvälja jõujooned ning sisenevad lõunapooluse poolt. Samamoodi määratakse ka elektromagneti pooluseid. [5]



Joonis 0.1: parema käe reegel [7]



Joonis 0.2: magneti põhja- ja lõunapoolus ning magnetvälja jooned [8]

Samm-mootori detailsem tutvustus ja tööpõhimõte

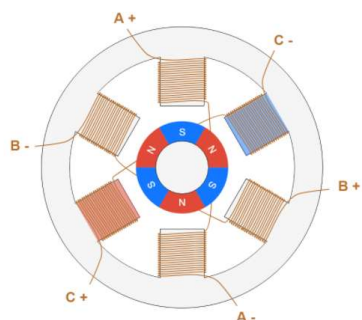
Samm-mootor kuulub harjadeta alalisvoolumootorite hulka ning erineb teistest mootoritest selle poolest, et antud masin pöörleb sammude kaupa. Iga samm on teatud arv kraade, sõltuvalt masina ehitusest võib sammu suurus erineda. Tavaliselt jääb sammu suurus vahemikku $1,8^\circ - 90^\circ$. [5][1]

Samm-mootori staator on sarnane alalisvoolu vahelduv-reluktantsmootori staatorile. Mootori mähised asuvad staatoril ning mähiste pingestatust juhib kontrolleri. [4]

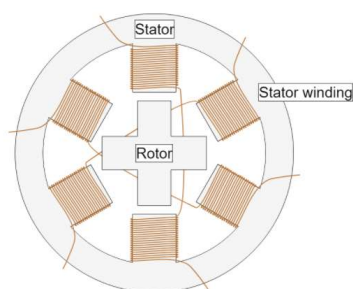
Samm-mootori tööpõhimõte seisneb nähtusel, kus magnetväljas vabas olekus olev metall või raudobjekt üritab saavutada magnetväljaga pärisuunalist olekut. Põhimõttelt on rootor nagu kompassinõel, mis pöörab end piki Maa magnetvälja jooni. [5] Samm-mootoreid on peamiselt kolme tüüpi: püsिमagnetitest rootoriga samm-mootor, vahelduv-reluktantsmootor ja hübriid-tüüpi mootor. [4]

Püsिमagnetitest rootoriga samm-mootori rootoris on kasutatud püsिमagneteid, mis võimendavad rootori magnetvälja ning võimsama magnetvälja tulemusena on

masinal rohkem väändejõudu, et pöörata rootori ja staatori magnetväli paralleelseks. Püsimagnetrootor ei keerle vabalt ning kleepumisjõud on tavaliselt tuntavad. [4] Püsimagnetrootoriga samm-mootor on joonisel 0.3.



Joonis 0.3: püsimagnetrootoriga samm-mootor [12]

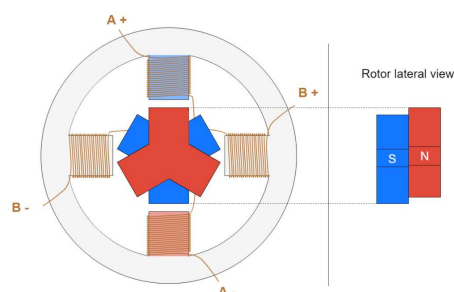


Joonis 0.4: vahelduv-reluktantsrootoriga samm-mootor [12]

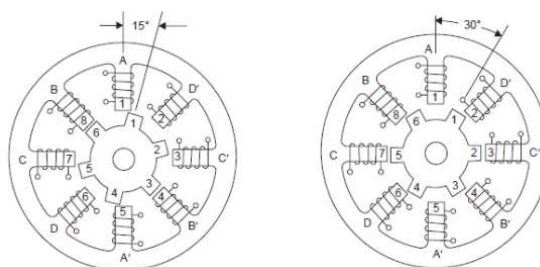
Vahelduv-reluktantsmootori rootor on metallist ning sellel ei ole oma magnetvälja. Magnetvälja tekitavad staatorimähised ning indutseerivad magnetvälja rootoris. Kui mähistes voolu pole, pöörleb rootor vabalt. Staatorimähiseid ja ka rootori pooluseid on paarisarv, et saavutada maksimaalne võimsus ja väändejõud. Vahelduv-reluktantsrootoriga samm-mootor on joonisel 0.4. [4]

Hübriidsamm-mootor on oma nime saanud püsimagnetitelt rootoris, mistõttu ei ole tegu puhtalt püsimagnetmasina ega ka reluktantsmasinaga. Hübriidmootoril on kaks kihti hambabid, mida ühendab püsimagnet. Kihtide hambad on vahelduvad ning kui ühe kihi hammas on suunatud staatoril aktiivse põhjapooluse suunas, siis teises kihis teisel pool rootorit on suunatud vastasmärgiline poolus lõunapooluse suunas. Joonisel 0.5 on näha hübriidrootoriga samm-mootori lihtsustatud joonist. Tegelikult võib hübriidsamm-mootoril olla sadu hambaid ja väga väike täissamm. [1]

Samm-mootori juhtimine on võimalik ühe sammu, poolsammu ja mikrosammude kaupa. Täissammu astumiseks nimetatakse samm-mootori edasi liikumist mootori sisestruktuurist määratuna kõige väiksema täisvahemiku edasi astumiseks.



Joonis 0.5: hübriidrootoriga samm-mootor [12]



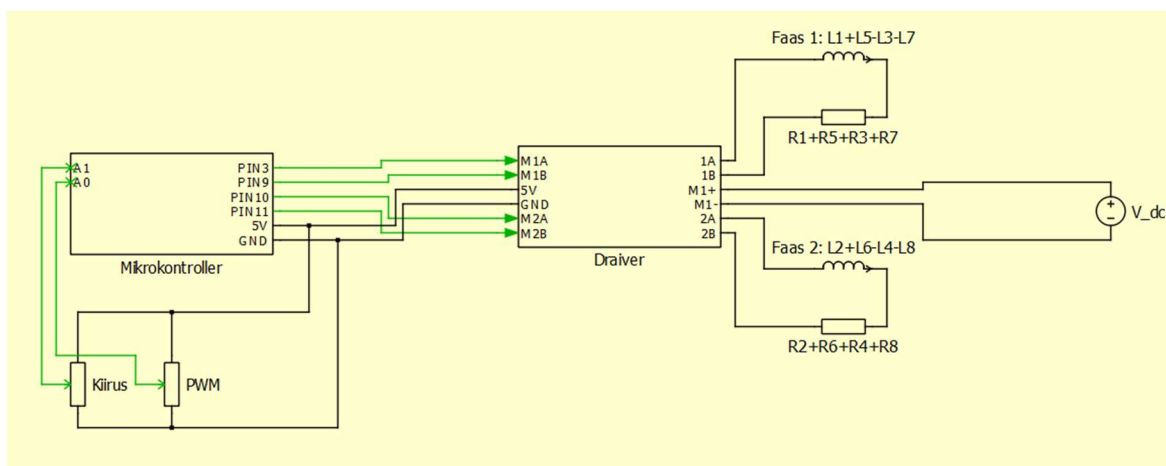
Joonis 0.6: vahelduv-reluktants samm-mootori ühe ja kahe sammu astumine [14]

Joonisel 0.6 on näha, kuidas kaheksapooluselise staatori ja kuuepooluselise rootoriga samm-mootori väikseim täissamm on 15° . Poolsammu astumiseks on vaja aktiveerida samal ajal järjekorras järgmine pooluspaar, misjuhul astub samm-mootor pool täissammust. Nii on võimalik juhtida samm-mootorit täpsemalt, kui olemas olev masina konstruktsioon täissammudega lubaks, säilitades suurema konstruktsiooniga masina eelised. Teatud draiveritega võimalik astuda ka väiksemaid sammuvahemikke. Lisaks sammu pikkuse reguleerimisele on võimalik reguleerida samm-mootori võimsust kasutades pulsilaiusmodulatsiooni meetodit. [15]

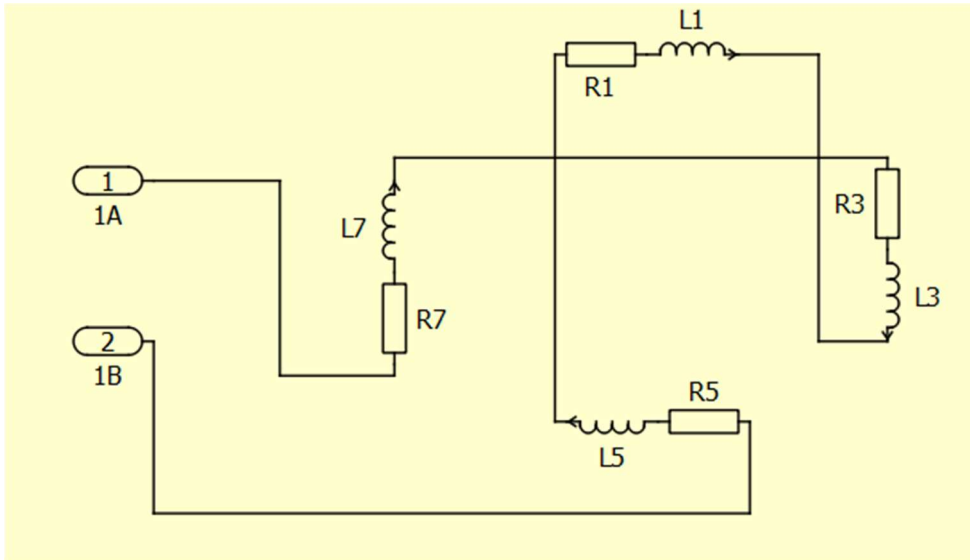
Samm-mootorit juhitakse enamasti eraldi draiveri abil. Lisaks on vaja kontrolleri, mis saadaks vajalikud signaalid kas transistorisillale või draiverile.[15]Faaside arv näitab, mitmeks erinevaks grupiks on staatorimähised jaotatud. Faaside arv võib erinevatel samm-mootoritel olla erinev, tavaliselt on faase 1-4.

Draivereid kasutades on juhtimine korraldatud peamiselt sammu ja suuna määramisega, on olemas ka teisi juhtimismeetode. Sammu tegemiseks saadetakse pingepulss draiveri teatud kontaktile ning sammu suuna määrab pingetase suunakontaktil. Tavaliselt sisaldavad draiverid H-silda, lisaks võib draiveritelt leida sõltuvalt mudelist veel komponente ja funktsioone. Draiveri valik sõltub vajalikest funktsioonidest, koormusest ja hinnast.

Ühendusskeemid



Joonis 0.7: Mikrokontrolleri ja draiveri ühendamine



Joonis 0.8: Esimese mähisepaari ühendamine

Joonisel 0.8 on näidatud esimese faasi ühendamine. Teine faas tuleb ühendada analoogselt. Üheks faasiks tuleb ühendada risti asuvad pooluspaarid, kusjuures üks pooluspaar ühendatakse põhjasuunaliseks ja teine lõunasuunaliseks.

Katse 1:

Arvuta mootori täissammu pikkus kasutades valemit 0.1. Arvesta ka poolsammudega.

$$S = m * N_r \quad (0.1)[14]$$

Kus

S on sammude arv ringi jooksul,

m on staatori faaside arv ja

N_r on rootori hammaste arv.

Fikseeri rootori algsuunas. Masin pöörab 90° võrra. Fikseeri lõpp-positsioon ning mõõda, mitu kraadi masin tegelikult pööras. Korda katset viis korda ja arvuta masina keskmine viga ja too välja maksimaalne ja minimaalne eksimus.

Katse 2:

Seadista kiiruseks 10 Hz ja alles siis pane masin käima.

Mis juhtub ja miks see nii on? Kirjelda kolme lausega.

Kuidas olukorda parandada? Kirjelda kaht erinevat viisi.

Kas olukord on unikaalne samm-mootorile?

Lahenda olukord, käivita masin ja sea masina kiiruseks 10 Hz.

Katse 3:

Mõõda tarbitav vool, pinge mähisel ja arvuta tarbitav võimsus.

Pane kirja ka pöörlemise kiirus.

Katse 4:

Kasutades pulsilaiusmodulatsiooni meetodit vähenda täitetegur vähimaks suuruseks, kus masin pöörleb samal kiirusel.

Mõõda tarbitav vool, mis siseneb masinasse ja pinge mähistel, arvuta tarbitav võimsus. Võrdle mõõtetulemust täitetegurit kasutades arvutatud eeldatava võimsusega ning eelmises katses arvutatud võimusega. Mida märkad ning milleks pulsilaiusmodulatsiooni kasutamine kasulik on? Seleta kuue lausega.

Kas olukord on unikaalne samm-mootorile? Seleta kahe kuni nelja lausega.

Katse 5:

Pane masin seisma ja ühenda masina vabalt valitud mähisele ostsilloskoop. Seadista ostsilloskoop pinge mõõtmiseks ning taasta katses 3 nähtud olukord. Mõõda ostsilloskoobiga mähise pingestatud aeg ja lisa aruandesse. Võimalusel mõõda ostsilloskoobiga ma sama mähise vool. Mõõtmisperiood peab sisaldama kogu aega, mille juures masina faas teeb ühe tükli. Arvuta saadud mõõtmistulemustelt pulsilaiusmodulatsiooni periood ja täitetegur ja võrdle täitetegurit masina ekraanil kuvatuga.

Täiteteguri arvutamiseks kasutatakse valemit 0.2.

$$T\% = \frac{T_{on}}{T} \quad (0.2)$$

Kus $T\%$ on täitetegur,

T_{on} on mõõdetud mähise töös olev aeg

T on kogu perioodi mõõdetud aeg.

Mida märkad? Kui esineb erinevusi, siis millest erinevused tuleneda võivad? Selgita kahe kuni nelja lausega.

Kirjelda kahe kuni nelja lausega mõõdetud pinge (ja voolu) kuju

Mõõda sama pikk periood ajal, mil mõõdetav faas ei ole draiveriga pingestatud. Mida märkad? Kirjelda kolme lausega.

Katse 6:

Kasutades pulsilaiusmodulatsiooni meetodit vähenda täitetegurit kuni masina pöörlemine ei ole enam ettenähtud 10 Hz.

Mida märkad ja kuidas masina puhul nähtust nimetatakse?