



INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

3D PRINDITUD LÜHISROOTORIGA ASÜNKROONMOTOR

3D PRINTED ASYNCHRONOUS SQUIRREL CAGE MOTOR

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Aleksandr Mogilenko

Üliõpilaskood: 192306AAAM

Juhendaja: Ants Kallaste, abiprofessor tenuuris
Hans Tiismus, doktorant-nooremteadur

Tallinn 2021

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

"....." 20.....

Autor:

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

Kaitsmisele lubatud

"....." 20.....

Kaitsmiskomisjoni esimees

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina _____ (autori nimi)

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

_____ ,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on

_____ ,

(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.

_____ (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: Aleksandr Mogilenko

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: 3D prinditud lühisrootoriga asünkroonmootor

Kuupäev:
21.12.2021

104 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendajad: Abiprofessor tenuuris Ants Kallaste, doktorant-nooremteadur Hans Tiismus

Selles töös käsitletakse asünkroonmootori projekteerimist valmistamiseks 3D-printeriga. Mootori projekteerimisel ei arvestata 3D-printimise iseärasusi. See on vajalik prinditud komponentide mõju analüüsimiseks mootori parameetritele. Staatori ja rootori südamikud prinditi SLM Solutionsi 3D-printeril SLM 280 2.0. Pöörisvoolude vähendamiseks moodustati südamikes laminatsioonid.

Valminud prototüüpi testiti tühijooksul ja koormusega. Katsete põhjal määrati valminud masina parameetrite nimiväärtused. Nimipinge on 16 V, nimivõimsus 70 W, nimipöördemoment 0,51 Nm ja kasutegur täiskoormusel 34,70 %. Kasuteguri nii väike väärtus tuleneb suurtest kadudest südamikes.

Prototüübi näitel võib öelda, et praegu ei võimalda 3D-printimise tehnoloogia tagada suurt kasutegurit pöörisvooludest tingitud suurte kadude ja vahekihtide väikese magnetjuhtivuse tõttu. Kasuteguri suurendamiseks on vaja valida laminatsioonide optimaalsed parameetrid.

Märksõnad: asünkroonmootor, 3D-printer, metalliprintimine, südamiku lamineerimine, asünkroonmootori disain, simulatsioon, FEMM, SLM

ABSTRACT

Author: Aleksandr Mogilenko	Type of the work: Master Thesis
Title: 3D printed asynchronous squirrel cage motor	
Date: 21.12.2021	104 pages (the number of thesis pages including appendices)
University: Tallinn University of Technology	
School: School of Engineering	
Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
Supervisors of the thesis: Tenured Assistant Professor Ants Kallaste, Early Stage Researcher Hans Tiismus	
<p>This thesis discusses the design of an asynchronous motor for printing on a 3D printer. The motor is designed without accounting for the unique features of 3D printing. This was required to analyse the effect of the printed components on the engine parameter values. Stator and rotor cores were printed on the 3D printer SLM 280 2.0 by SLM Solutions. laminations were formed in the cores to reduce the eddy currents.</p> <p>The finished prototype has been tested under no load and load conditions. Based on the tests, the nominal parameters of the finished engine were determined. The nominal voltage is 16 V, the nominal power is 70 W, the nominal torque is 0,51 Nm, and the efficiency for the full load is 34,70 %. Such a low efficiency is due to high losses in the cores.</p> <p>Using the prototype as an example, we can say that currently, the 3D printing technology does not allow achieving a high efficiency due to high losses on eddy currents and a decrease of magnetic conductivity due to the insulation layers of laminated cores. To improve the efficiency, it is necessary to find optimal parameter values for lamination.</p>	
Keywords: asynchronous motor, 3D printer, metal printing, core lamination, asynchronous motor design, simulation, FEMM, SLM	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	3D prinditud lühisrootoriga asünkroonmootor
Lõputöö teema inglise keeles:	3D printed asynchronous squirrel cage motor
Üliõpilane:	Aleksandr Mogilenko, 192306AAAM
Eriala:	Energiamuundus- ja juhtimissüsteemid
Lõputöö liik:	Magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Ants Kallaste
Lõputöö kaasjuhendaja:	Hans Tiismus
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	2021/2022 õppeaasta suvesemester
Lõputöö esitamise tähtaeg:	21.12.2021

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Tänapäeval kasutatakse asünkroonmootoreid ja muid elektrimootoreid aktiivselt erinevates tööstusharudes. Mootorite tootmist saab tagada 3D-printimise abil. See võimaldab kiirendada tootmise kiirust ja vähendada mootorite tootmise kulusid, samuti toota spetsiaalsete parameetritega spetsiaalsed mootoreid. Selles töös vaadeldakse kolmefaasilist, kahepooluselise asünkroonmootorit printimiseks.

2. Töö eesmärk

Töö põhieesmärk on kolmefaasilise, kahepooluselise asünkroonmootori projekteerimine, printimine, kokkupanek ja katsetamine.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu

1. Milline disain tagab maksimaalse efektiivsuse, hea jahutamise ja kokkupaneku lihtsust?
2. Milline on mootori tegelik efektiivsus?
3. Millised on staatori ja rootori mähiste optimaalsed parameetrid?
4. Millist töörežiimi see mootor suudab tagada?

4. Lähteandmed

- Projekteeritava mootori tüüp on kolmefaasiline, kahepooluseline asünkroonmootor.
- Mootori osa maksimaalsed mõõtmed on 70x70x70 mm. Piirang tuleneb 3D-printeri tööpiirkonnast.
- Tööpinge on 24 V, sagedus 50 Hz.
- Toiteallikaks kasutatakse sagedusmuundurit, mis võimaldab seadistada töötamist erinevates režiimides.

5. Uurimismeetodid

Uuringute põhimeetodid:

- Teoreetiline meetod: parameetrite uurimiseks ja arvutamiseks kasutatakse teoreetilisi andmeid tavapärase asünkroonmootori struktuuri ja töö kohta.
- Simulatsioon: uurimine mootori töö simulatsiooni kaudu. Simulatsiooni tulemuste abil määratakse mehaanilise pinge, soojusjaotuse, magnetvälja tugevuse ja muud mootori parameetrid.
- Testimine: prototüübi kokkupanek ja katsetamine erinevate koormuste ja erinevate töörežiimide korral, et võrrelda neid teoreetiliste arvutustega.

6. Graafiline osa

Graafiline osa sisaldab:

- Mootori ja selle osade 3D-mudel
- Simulatsiooni tulemused
- Elektriskeem
- Mootori juhtimisahel
- Graafikud valminud prototüübi testimiseks

Graafikud ja joonised on nii põhitöös kui ka lisades.

7. Töö struktuur

1. Sissejuhatus
2. Teoreetiline osa
 - a. Asünkroonmootori põhiprintsiipide kirjeldus
 - b. Mehaaniline disain
 - c. Elektriline disain
 - d. 3D-mootori mudeli loomine
3. Simulatsioon
 - a. Mootori töö simulatsioon erinevatel koormustel
 - b. Staatori ja rootori magnetvälja simulatsioon
 - c. Soojusenergia simulatsioon

4. Asünkroonmootori prototüübi loomine
 - a. Mootori põhiosade printimine 3D-printeri abil
 - b. Rootori mähise kerimine
 - c. Staatori mähiste kerimine
 - d. Mootori kokkupanek
5. Asünkroonmootori prototüübi katsetamine
 - a. Asünkroonmootori koormamata töö
 - b. Asünkroonmootori töö koormuse all
 - c. Kiirendus ja pidurdamine erinevates töörežiimides
 - d. Katse andmete analüüs
6. Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

1. Вешеневский С.Н., Характеристики двигателей в электроприводе, Москва: kirjastus ЭНЕРГИЯ, 1977.
2. Voldek A., Popov V., Elektrimasinad, Tallinn: kirjastus Valgus, 1972.
3. Мальц Э. Л., Мустафаев Ю. Н., Электротехника и электрические машины, Москва: kirjastus КОРОНА-Век, 2010.
4. Sarap M., Elektrimasinate valmistamise võimalused 3D printeriga, Tallinn: kirjastus TalTech, 2018.

9. Töö etapid ja ajakava

Töö jagatakse etappideks:

1. Kirjanduse läbitöötamine ja lähteandmete kogumine (01.01.2021-01.02.2021)
2. Teoreetilise osa kirjutamine (02.02.2021-15.03.2021)
3. Simulatsiooni osa kirjutamine ja katsetamine (16.03.2021-01.05.2021)
4. Asünkroonmootori prototüübi loomine (02.05.2021-15.06.2021)
5. Asünkroonmootori prototüübi katsetamine (15.08.2021-01.10.2021)
6. Kokkuvõtte koostamine (02.10.2021-15.10.2021)
7. Töö esimene versioon valmis ja juhendajale läbilugemiseks saatmine (16.10.2021)
8. Paranduste sisseviimine (17.10.2021-01.11.2021)
9. Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (02.11.2021)
10. Töö lõplik versioon valmis (16.11.20)

EESSÕNA

Lõputöö teema oli pakutud abiprofessor tenuuris Ants Kallaste poolt. Antud teema oli valitud isikliku huvi põhjal elektriajamite valdkonna uurimises. Prototüübi tootmine ja katsed olid läbi viidud Tallinna Tehnikaülikoolis.

Soovin tänada minu lõputöö juhendajat abiprofessor tenuuris Ants Kallastet. Ta konsulteeris mind prototüübi projekteerimise ajal ja samuti võttis osa valminud töö korrigeerimisel. Samuti soovin tänada kaasjuhendajat doktorant-noorentedur Hans Tiismust valminud prototüübi katsetel abistamise ja aktiivse osavõtu eest kokkuseadmise protsessis.

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	9
SISUKORD.....	10
SISSEJUHATUS	12
1. TEOREETILINE OSA.....	14
1.1 Asünkroonmootori töö põhimõte	15
1.2 Lähteandmete valik	16
1.3 Mootori mõõtude määramine	17
1.4 Staatori ja rootori südamik materjal	21
1.5 Mähiste ja uurete arvutamine	22
1.5.1 Staatori mähise parameetrite arvutamine.....	22
1.5.2 Staatori hammaste parameetrite määramine	27
1.5.3 Rootori mähiste ja hammaste parameetrite määramine.....	30
1.6 Magnetahela arvutamine	34
1.7 Aseskeemi parameetrite määramine.....	37
1.7.1 Staatori mähise takistuste arvutamine	37
1.7.2 Rootori mähise takistuste arvutamine	40
1.7.3 Magneetimisahela arvutamine.....	42
1.8 Teoreetilise kasuteguri arvutamine	44
2. MUDELDAJINE JA PROTOTÜÜPIMINE	48
2.1 Mudeli ettevalmistamine	48
2.2 Laminatsiooni moodustamine	50
2.3 3D-printeri parameetrid ja mudeli printimine	51
2.4 Lõõmutamine ja töötlemine pärast printimist.....	53
2.5 Valminud osade lõõmutamine	55
2.6 Prototüübi koostamine	56
2.7 Südämike magnetvälja simulatsioon.....	57
2.7.1 Simulatsiooni parameetrid	57
2.7.2 Simulatsiooni tulemused	58
3. MOOTORI KATSETAMINE	60
3.1. Katsetingimused	60
3.2 Katsetulemused	62
3.2.1 Töö tühijooksul	62
3.2.2 Käivitusmomendi määramine.....	64
3.2.3 Takistuste määramine tühijooksu andmete jargi.....	65

3.2.4 Takistuste määramine käivitusmomendi andmete jargi	68
3.2.5 Töötamine konstantse koormusega.....	70
3.2.6 Töötamine suureneva koormusega	72
3.3 Võrdlus teoreetiliste näitajatega	75
KOKKUVÕTE	78
SUMMARY.....	80
KASUTATUD KIRJANDUS	82
LISAD	84
Lisa 1 Terasemarkide 2013 ja 2312 magneetumusomadused	85
Lisa 2 Printimisterase magneetumusomadused.....	86
Lisa 3 Juhi parameetrid erinevate läbimõõtude korral.....	87
Lisa 4 staatori ja rootori diferentsiaalhajumise sammu tegurid	88
Lisa 5 Pilu laiuse ja õhuvähe sõltuvus.....	89
Lisa 6 Printimisterase omadused.....	90
Lisa 7 Valmis 3D prinditud lühisrootoriga asünkroonmootor	91
Lisa 8 Magnetväljade jaotus asendise 7,5° ja 90° vahel sammuga 7,5°	92
Lisa L8.1 Magnetväljade jaotus asendis 7,5°	92
Lisa L8.2 Magnetväljade jaotus asendis 15°	93
Lisa L8.3 Magnetväljade jaotus asendis 22,5°	94
Lisa L8.4 Magnetväljade jaotus asendis 30°	95
Lisa L8.5 Magnetväljade jaotus asendis 37,5°	96
Lisa L8.6 Magnetväljade jaotus asendis 45°	97
Lisa L8.7 Magnetväljade jaotus asendis 52,5°	98
Lisa L8.8 Magnetväljade jaotus asendis 60°	99
Lisa L8.9 Magnetväljade jaotus asendis 67,5°	100
Lisa L8.10 Magnetväljade jaotus asendis 75°	101
Lisa L8.11 Magnetväljade jaotus asendis 82,5°.....	102
Lisa L8.12 Magnetväljade jaotus asendis 90°	103
Lisa 9 Koormusmootori tühijooksu katsed.....	104

SISSEJUHATUS

Tänapäeval kasutatakse elektrimasinaid laialdaselt paljudes erinevates valdkondades. Olenevalt rakendusest erinevad need tüübi ja võimsuse poolest. Kõige levinum tüüp on lühisrootoriga asünkroonmootor. Seda kasutatakse tohtu hulga mehhanismide ajamina tööstuses, põllumajanduses, automaatikasüsteemides ja kodumasinates. Asünkroon masinate puudusteks võib lugeda masina pöörlemiskiiruse sõltuvust koormusest ning reaktiivenergia vajadust. Selle peamised eelised on:

- tarindi lihtsus,
- väikesed tootmiskulud,
- kõrge kasutegur,
- kõrge töökindlus,
- juhtimis lihtsus.

Tänapäeva on tekkinud uus tööstusharu milleks on 3D printimine. 3D printimise tehnoloogia on kiirelt arenev ning turule tulevad üha võimekamad printerid mis võimaldavad ka printida metalli. See võimaldab aga ka laiendada 3D printimise rakendusvaldkonda ning antud tehnoloogiat saab kasutada mehhanismide ja elementide tootmiseks.

Töö eesmärgiks ongi elektrimasinate valmistamise kombineerimine 3D printimis tehnoloogiaga, kus lühisrootoriga asünkroon masina projekteeritakse nii et seda oleks võimalik valmistada 3D printeriga. Töö käigus kasutatakse kavandatud mootori projekteerimiseks nii teoreetilisi arvutusi kui ka simulatsioone ning tulemusi kontrollitakse reaalsete katsetega.

Väikese võimsusega prototüübi loomine võimaldab seda valdkonda uurida ja laiendada minimaalsete rahaliste vahendite kaasamisega, samuti vähendada riske valminud prototüübi katsetamisel. Töö võib jagada järgmisteks etappideks:

- Teoreetiline osa. Selles osas valitakse mootori kõigi osade mõõdud ning arvutatakse mootori parameetrid. Projekteerimine põhineb väikese võimsusega üldotstarbelise asünkroonmootori arvutustel. See aitab hinnata klassikaliste arvutusmeetodite aktuaalsust 3D-printeriga prinditud mootorite puhul.
- 3D-mudeli ja simulatsiooni loomine töö analüüsimiseks. Enne mootori printimist ja koostamist tuleb kontrollida arvutuste käigus saadud karakteristikute õigsust. Samuti saab simulatsiooni tulemusi võrrelda katseandmetega, et tuvastada erinevused.

- Mootori printimine ja koostamine. Selles osas kirjeldatakse mootori komponentide printimise, staatori mähiste moodustamise ja ka valmis mootori lõppkoostamise protsessi. Kirjeldatakse seda tüüpi mootorite koostamise iseärasusi ja protsessi optimeerimisvõimalusi seeriatootmise korral.
- Valminud mootori prototüübi katsetamine. Selles osas tehakse katseid teoreetiliste arvutuste ja simulatsioonide võrdlemiseks mootori tegelike karakteristikutega. Määratakse mootori kasutegur töötamisel erinevates režiimides ja erinevate koormustega.

Mootor prinditakse Tallinna Tehnikaülikoolis 3D-metalliprinteriga. Katsed viiakse läbi ülikoolis. Mootori projekteerimise ja töö simulatsiooni tarkvara tagab samuti Tallinna Tehnikaülikool.

Selle töö tulemus on lühisrootoriga asünkroonmootori töötava prototüübi loomine. See prototüüp võimaldab võrrelda teoreetilisi arvutusi mootori tegelike karakteristikutega. Need andmed on kasulikud keskmise ja suure võimsusega lühisrootoriga asünkroonmootorite projekteerimisel ning seda tüüpi väikese võimsusega mootorite konstruktsiooni optimeerimisel.

Samuti viiakse läbi uuringud kasulikud tehnoloogiate väljatöötamisel ja 3D-printimise protsessi optimeerimisel. See valdkond on perspektiivne ja võimaldab tulevikus kasutada 3D-printimist võimsamate ja keerukamate elektrimasinate ja muude seadmete tootmiseks.

1. TEOREETILINE OSA

Teoreetilises osas käsitletakse asünkroonmootori tööpõhimõtet, füüsiliste mõõtmete määramist, mehaanilisi ja elektrilisi omadusi ning optimaalset konstruktsiooni 3D-printimiseks. Valitud parameetrite alusel luuakse mootori 3D-mudel. See on vajalik mootori komponentide printimiseks, samuti mootori töö simuleerimiseks ja teoreetiliseks analüüsiks. Teoreetilise osa võib jagada järgmisteks etappideks:

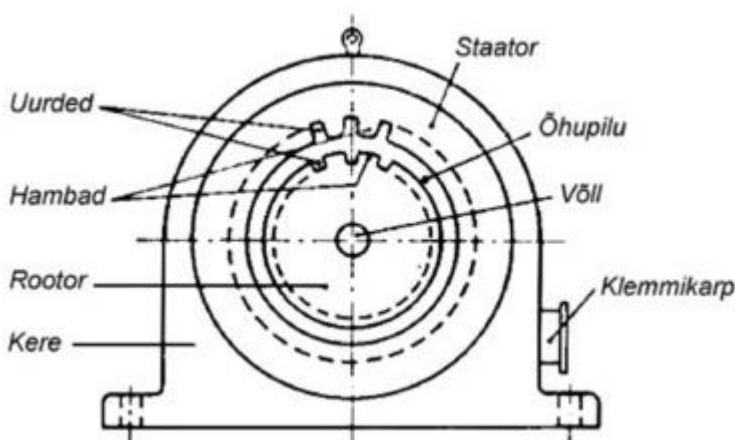
- Projekteeritava mootori lähteandmete määramine. Need parameetrid määravad mootori põhimõõdud ja -omadused. Käsitletakse ka lühisrootoriga asünkroonmootori töö põhimõtet.
- Mootori kõigi osade mõõtude määramine. Selles etapis on projekteerimisülesandes seatud eesmärkide saavutamiseks vaja valida mootori ja selle osade sobivad põhimõõdud. Kõige olulisemad mõõdud on staatori ja rootori välis- ja siseläbimõõt ning õhuvahe pikkus ja laius.
- Mähiste projekteerimine. On vaja valida mähiste juhtme sobiv läbimõõt, isolatsiooni paksus ja mähiste paigaldusviis. Samuti on oluline määrata staatori mähiskeerdude ja rootori varraste arvu suhe, staatori ja rootori uurete arv ning kuju.
- Elektriparameetrite arvutamine. Mootori simuleerimiseks ja karakteristikute arvutamiseks on vaja arvutada mähiste takistused, staatori ja rootori ahelate pinged ning magnetahela parameetrid. Need andmed on vajalikud mootori jõudluse hindamiseks ja simulatsioonide läbiviimiseks.
- Teoreetilise kasuteguri arvutamine. Mootori projekteerimise alguses võrdlusarvutustes valitakse kasuteguri ja $\cos\varphi$ väärtused ilma arvutusteta. Kui masina parameetrid on määratud, saab kasuteguri ja $\cos\varphi$ väärtused välja arvutada ning võrrelda neid alguses valitud väärtustega. Samuti on pärast nende parameetrite testimist võimalik hinnata teoreetiliste arvutuste õigsust.

1.1 Asünkroonmootori töö põhimõte

Asünkroonmootor on elektrimasin, mis muundab elektrienergia mehaaniliseks energiaks. Mootor töötab ühe- või kolmefaasilisel vahelduvvoolul. Asünkroonmootori põhikomponendid on:

- Staator — jääb mootori töötamise ajal paigale. See osa tekitab pöörleva magnetvälja. Magnetvälja pöörlemiskiirus sõltub toitevoolu sagedusest ja staatori mähiste pooluspaaride arvust. Mähisteks kasutatakse lakitud vaskjuhi, mille läbimõõt sõltub toitevoolu tugevusest ja pingest.
- Rotor — mootori töö ajal pöörleb. Mootoris võib olla lühisrotor või faasirotor. Esimesel juhul on rootori südamik moodustatud alumiiniumvarrastest, mis on lühistatud otsarõngastega (nn oravapuur). Teisel juhul on rotoril tähte ühendatud kolmefaasiline mähis.
- Võll — ühendatud rotoriga ja edastab pöördemomenti rotorilt välistäiturile või reduktorile. Tavaliselt toetub see kummastki otsast laagrite kaudu korpusele.
- Korpus on osa, mille külge on kinnitatud staator, laagrid ja staatori faasijuhtmete klemmid. Võimaldab omavahel kindlalt ühendada kõik mootori komponendid ja juhtida mootorist eralduvat soojust keskkonda.

Tööpõhimõte seisneb selles, et staator ja rotor tekitavad sisselülitamisel erineva sagedusega pöörlevad magnetväljad. Rootori magnetvälja pöörlemissagedus on alati väiksem kui staatori magnetvälja pöörlemissagedus. Staatori mähiste tekitatud magnetvoog tekitab rootori juhtides elektromotoorjõu (EMJ). Staatori magnetvälja ja rootori mähises indutseeritud voolu vastastikmõjul tekib elektromagnetjõud, mis paneb pöörlema mootori võlli. Rootori pöörlemissuuna muutmiseks on vaja vahetada suvalise kahe faasi ühendusjärjestust.



Joonis 1.1. Asünkroonmootori skemaatiline lõige. [1]

1.2 Lähteandmete valik

Masina projekteerimise jaoks on esmalt vaja ära määrata lähteandmed, mis annavad ette projekteerimiseks piirväärtused. Töös on võetud eesmärgiks projekteerida lühisrootoiga asünkroon masina mida saaks valmistada 3D printeriga. Sellest tuleneb ka esimene piirang millist masinat saab valmistada, kuna printer määrab ära kui suuri detaile saab valmistada. Mootori mõõdud võivad olla printeri tööulatusest suuremad, kui valmistoode koostatakse moodulitest. Sel juhul koostatakse staator ja rootor osadest, mille suurus sobib printimiseks ja mis ühendatakse omavahel mehaaniliselt.

3D printeriga saab valmistada väikeste mõõtudega masinat, siis sellest lähtuvalt valitakse töös masina toitepingeks 24 V. See pinge on optimaalne mootoritele, mille võimsus on väiksem kui 150 W. Masin projekteeritakse 3 faasilisena ning projekteerimisel lähtutakse võrgusagedusest 50 Hz. Staatori mähised ühendatakse tähte.

Rootori mähised on lähtuvalt mootori tüübist lühistatud. Rootorina kasutatakse tarindit, mille südamikute uures on vardad ja otstes lühisrõngad. Staatori ja rootori mähiste volud määratakse arvutustest, mis põhinevad mähiste EMJ-il ja takistustel. Mootori väikeste mõõtude tõttu on pooluspaaride arv piiratud. Sellest lähtuvalt projekteeritakse masina 2 pooluspaariga. Masina sünkroon pöörlemiskiiruse arvutatakse valmiga:

$$n_s = \frac{60 \cdot f_n}{p_1} \quad (1.1)$$

kus f_n – staatori magnetvälja sagedus, Hz,
 p_1 – staatori pooluspaaride arv,
 n_s – rootori sünkroonkiirus, p/min.

Projekteeritava mootori sünkroonne pöörlemiskiirus on 1500 p/min. Kuna staatori ja rootori magnetväljad ei pöörle sünkroonselt, on nende pöörlemiskiirused erinevad – toimub libistus. Enamiku asünkroonmootorite puhul on nimikiirusel libistus vahemikus 0,01 kuni 0,05. Sellest lähtuvalt valitakse masina esialgseks libistuse väärtuseks 0,03:

$$n_n = n_s \cdot (1 - S_n) \quad (1.2)$$

kus S_n – nimilibistus,
 n_n – rootori nimipöörlemiskiirus, p/min.

Projekteeritava mootori puhul on nimipöörlemiskiirus ligikaudu 1455 p/min. Tabelis 1.1 on esitatud mootori projekteerimise algparameetrid.

Tabel 1.1. Mootori projekteerimise algparameetrid.

Parameeter	Sümbol	Väärtus
Nimipinge, V	U_n	24
Nimivõimsus, W	P_n	100
Nimipöörlemiskiirus, p/min	n_n	1455
Sünkroon pöörlemiskiirus, p/min	n_s	1500
Staatori pooluspaaride arv	p_1	2
Nimisagedus, Hz	f_n	50
Nimilibistus	S_n	0,03

1.3 Mootori mõõtude määramine

Mootori mõõdud sõltuvad võimsusest, nurkkiirusest ja elektromagnetkoormusest. Mõõtude ja nimetatud suuruste vahelist seost väljendab valem [2]:

$$\frac{D_{s,1}^2 \cdot l_\delta \cdot \Omega_s}{S'} = \frac{2}{\pi \cdot a_\delta \cdot K_B \cdot K_{m1} \cdot B_\delta \cdot A} \quad (1.3)$$

kus $D_{s,1}$ – staatori siseläbimõõt, m,
 l_δ – õhuvahe pikkus, m,
 Ω_s – sünkroonne nurksagedus, rad/s,
 S' – arvutuslik võimsus, VA,
 A – voolukate, A/m,
 a_δ – pooluste kattuvustegur,
 K_B – magnetvälja kujutegur,
 K_{m1} – staatori mähisetegur,
 B_δ – magnetilineinduktsioon õhuvahe, T.

Valemis on muutujaid, mille väärtused on mootori teatud võimsuste korral teada kitsastes vahemikes. Kõigepealt on vaja määrata völli kõrgus ja staatori välisläbimõõt.

Tabel 1.2. Völli kõrguse ja staatori välisläbimõõdu sõltuvus mootori arvutuslikust võimsusest. [2]

P , W	60 - 120	120 - 250	250 - 550	550 - 1100	1100 - 2200
h , mm	50 - 56	56 - 63	63 - 71	71 - 80	80 - 100
$D_{s,2}$, mm	81 - 89	89 - 100	100 - 116	116 - 131	131 - 168

Vastavalt tabelile 1.2 valime 100 W masina jaoks masina mõõdudeks võlli kõrguse 56 mm ja staatori välisläbimõõdu 89 mm. Staatori siseläbimõõdu määramiseks on vaja teada mähiste paigaldusviisi. Praeguses etapis need andmed puuduvad, seetõttu kasutatakse paigaldustegurit K_D . Teguri väärtused on esitatud tabelis 1.3 ja staatori siseläbimõõdu arvutamiseks kasutatakse valemit:

$$D_{s.1} = D_{s.2} \cdot K_D \quad (1.4)$$

kus K_D – paigaldustegur,
 $D_{s.2}$ – staatori välisläbimõõt, m.

Tabel 1.3. Staatori mähiste paigaldusteguri väärtused erineva arvu pooluspaaride korral. [3]

p_1	1	2	3	4-6
K_D	0,52 - 0,57	0,60 - 0,68	0,70 - 0,72	0,74 - 0,77

Vastavalt tabelile 1.3 samme staatori siseläbimõõduks 58,75 mm. Staatori siseläbimõõdu põhjal arvutatakse poolusjaotus:

$$\tau_1 = \frac{\pi \cdot D_{s.1}}{2 \cdot p_1} \quad (1.5)$$

kus τ_1 – staatori poolusjaotus, m.

Edasi tuleb arvutada arvutuslik võimsus valemitega [4]:

$$S' = P_n \cdot \frac{K_E}{\eta \cdot \cos \varphi} \quad (1.6)$$

$$K_E = \frac{X_{12}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{12})^2}} \quad (1.7)$$

kus K_E – staatori mähise EMJ-i ja nimipinge teoreetiline suhe,
 η – mootori teoreetiline kasutegur, %,
 $\cos \varphi$ – võimsutegur,
 X_{12} – vastastikinduktiivsus, Ω ,
 X_1 – staatori mähise reaktiivtakistus, Ω ,
 R_1 – staatori mähise aktiivtakistus, Ω .

Kuna töös käsitletakse prototüüpi, ei saa täielikult juhendada sarnaste mootorite parameetritest, seega valime arvutuslikuks võimsuseks võimsuse, mis on 2,35 korda suurem nimivõimsusest, seega $S' = 235$ VA. K_E väärtuseks on valitud 0,85, mootori kasuteguri η väärtuseks on valitud 60% ja $\cos \varphi$ väärtuseks 0,60.

Mähiste aktiivtakistuse väärtused määratakse pärast mähiste paigaldusviisi ja paksuse valimist. Mähiste ja õhuvahe reaktiivtakistused arvutatakse pärast uurde tüübi ja mähiste paigaldusviisi valikut.

Induktsioon õhuvahe B_δ ja voolukatega A valitakse arvestades sellega, et need suurused iseloomustavad magnet- ja elektrisüsteemi. Nende suhtest sõltuvad mootori töö- ja käivitusomadused. B_δ ja A suurendamine võimaldab vähendada mootori mõõtmeid, kuid B_δ väärtust piirab mootori magnetahela küllastumine ja magnetmüra taseme tõus. A suurendamine on piiratud kuumuskindlusklassiga ja isolatsiooni nõutava paksusega.

Valitakse esmase arvutuse magnetvootiheduse väärtuseks $B_\delta = 0,6$ T. Voolukate valitakse $A = 120$ A/cm. Voolukate konservatiivne väärtus on valitud lähtudes uurde väikesest täitetegurist. Väikese võimsusega masinates on poolusjaotuse τ_1 ja magnetvoo väärtused väikesed, seetõttu on vaja suhteliselt palju väikese ristlõikepindalaga juhtmeid mähiskeerde. Uurde täitetegur on tingitud isolatsiooni suhteliselt suurest osakaalust ja juhtide ebaühtlase asetusest uurdes.

Pooluskattuvustegur a_δ ja välja kujutegur K_B määratakse väljakõvera lamemisastme järgi uurdes, mis tulenevad staatori ja rootori hammaste täituvusest ning mida saab täpselt määrata alles pärast magnetahela arvutamist. Esimeses etapis on arvutuste tegemiseks lubatud kasutada siinusvälja ja võtta lamestamise mõju arvesse magnetvälja tugevuse arvutamisel magnetahela erinevates lõikudes. Edasistes arvutustes valitakse need tegurid järgmiselt [2]:

$$a_\delta = \frac{2}{\pi} \quad (1.8)$$

$$K_B = \frac{\pi}{(2 \cdot \sqrt{2})} \quad (1.9)$$

Lisaks pooluskattuvustegurile ja väljakujutegurile on vaja määrata mähistegur K_{m1} mis sõltub staatori mähise tüübist ja pooluspaaride arvust. Väikese võimsusega masinates kasutatakse tavaliselt ühekihilist jaotatud mähist, mida kasutatakse ka edasisel projekteerimisel. Staatori ja rootori mähise tegurid väärtuseks valitud $K_{m1} = K_{m2} = 0,96$.

Tabel 1.4. Mähiseteguri väärtus olenevalt pooluspaaride mähkimisviisist. [2]

Mähise tüüp	$p_1 = 1$	$p_1 \geq 2$
Ühekihiline kontsentiline	0,95 – 0,96	0,96 – 1,00
Kahekihiline	0,90 – 0,91	0,91 – 0,92

Teades kõigi vajalike parameetrite väärtusi, saab õhuvahe arvutamiseks kasutada valemit[2]:

$$l_{\delta} = \frac{S'}{D_{s,1}^2 \cdot \Omega \cdot K_B \cdot K_{m1} \cdot B_{\delta} \cdot A} \quad (1.10)$$

$$\Omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_s}{60} \quad (1.11)$$

Valitud parameetrite puhul on õhuvahe pikkus ligikaudu 56,75 mm. Arvutuse õigsuse kontrollimiseks on vaja leida õhuvahe pikkuse ja poolusjaotuse suhe valemiga [2]:

$$\lambda = \frac{l_{\delta}}{\tau_1} \quad (1.12)$$

kus λ – õhuvahe pikkuse ja poolusjaotuse suhe.

Valitud mootoritüübi ja pooluspaaride korral on see suhe tavaliselt vahemikus 0,60 kuni 1,80. Arvutustulemuste kohaselt valitud parameetritega on see 1,22. Õhuvahe sõltub staatori siseläbimõõdust. Kasuteguri parandamiseks ja magneetimisvoolu vähendamiseks tuleb õhuvahe minimeerida. Teisest küljest suurendab väike õhuvahe tootmiskulusid ja -keerukust ning ka kõrgemate harmoonikute mõju. Väiksemat kui 0,2 mm õhuvahet kasutatakse ainult erimootorites, samas suuremat kui 0,4 mm suurune õhuvahe vähendab oluliselt kasutegurit. Optimaalne õhuvahe arvutatakse valemiga [4]:

$$\delta = 0,2 \cdot 10^{-3} + \frac{D_{s,1}}{2000} \quad (1.13)$$

kus δ – õhuvahe, mm.

Õhuvahe on umbes 0,25 mm. Rootori välisläbimõõd määratakse valemiga:

$$D_{r,2} = D_{s,1} - 2 \cdot \delta \quad (1.14)$$

Leitud mootori põhimõõdud on esitatud tabelis 1.5. Järgmises etapis valitakse ja arvutatakse asünkroonmootori staatori ja rootori mähiste parameetrid.

Tabel 1.5. Mootori põhimõõdud.

Parameeter	Sümbol	Väärtus
Staatori välisläbimõõt, mm	$D_{s,2}$	89,00
Staatori siseläbimõõt, mm	$D_{s,1}$	58,75
Rootori läbimõõt, mm	$D_{r,2}$	58,25
Õhuvahe, mm	δ	0,25
Õhuvahe pikkus, mm	l_{δ}	56,75
Staatori poolusjaotus, mm	τ_1	46,13
Võlli optimaalne kõrgus, mm	h	56,00

1.4 Staatori ja rootori südamikumaterjal

Staator ja rootor valmistatakse elektrotehnilisest terasest. Seda terast kasutatakse trafosüdamike, elektrimasinate staatorite ja rootorite valmistamiseks. Elektrotehnilise terase põhiparameeter on selle ränisisaldus. Printimisel kasutatakse üsna suure ränisisaldusega (3,7%) terast. Tavaliselt kasutatakse väikese võimsusega asünkroonmootorites terasemarke 2013 (ränisisaldus kuni 0,4%) ja 2312 (ränisisaldus 1,8–2,8%). Elektrotehnilise terase ränisisalduse suurenemisega kaasneb selle magnetiliste omaduste muutus. Mida suurem on ränisisaldus, seda väiksem on magneetumus väikeste induksiooniväärtuste korral ja suurem keskmiste ja suurte induksiooniväärtuste korral. Kuna prinditavate materjalide puhul ei ole veel täpselt teada, mis tema väärtused on, siis töös kasutatakse ikkes ja hammastes väärtustete määramiseks terasemarkide 2013 ja 2312 suhtelisi väärtuseid. [3]

Tabel 1.6. Töös kasutatava elektrotehnilise terase parameetrid. [5]

Parameeter	Sümbol	Väärtus
Takistus, $m\Omega/m$	R_{SI}	5,70
Tihedus, kg/m^3	γ_{SI}	7750
Ränisisaldus, %	K_{SI}	3,70
Terase erikaod, W/kg	$K_{\Delta,teras}$	1,30
Terase kaotustegur tüübi järgi	β_{Δ}	1,40

Käsiraamatu andmed näitavad, et keskmiselt erineb hammaste magneetumus markides 2013 ja 2312 induksiooni 0,5 T korral 4% ja induksiooni 1,5 T korral suureneb erinevus 37%-ni. Magneetumine ikkes induksiooni 0,5 T korral erineb 36% ja induksiooni 1,5 T korral suureneb erinevus 43%-ni. Mida suurem on induksiooniväärtus, seda suurem on magneetumuse erinevus. Käsiraamatu andmed esitatud lisas 1. Samuti võeti käsiraamatust nende terasemarkide üldised magneetumiskõverad. Nendest andmetest saab teada ikkes ja hammaste magneetumise suhte nimiväärtusega. Nendest andmetest saab arvutada 3D-printeris kasutatavast terasest hammaste ja ikkes magneetumise ligikaudsed väärtused. Suhtelised väärtused määratakse valemitega [3]:

$$K_{2013.z} = \frac{H_{2013.z}}{H_{2013.ref}} \quad (1.15)$$

$$K_{2013.s} = \frac{H_{2013.s}}{H_{2013.ref}} \quad (1.16)$$

$$K_{2312.z} = \frac{H_{2312.z}}{H_{2312.ref}} \quad (1.17)$$

$$K_{2312.s} = \frac{H_{2312.s}}{H_{2312.ref}} \quad (1.18)$$

kus $K_{2013.z}$ – ikke ja terasemargi 2013 magneetumise suhe,
 $K_{2013.s}$ – staatori ja terasemargi 2013 magneetumise suhe,
 $K_{2312.z}$ – ikke ja terasemargi 2312 magneetumise suhe,
 $K_{2312.s}$ – staatori ja terasemargi 2312 magneetumise suhe,
 $H_{2013.z}$ – ikke magneetumine margi 2013 korral, A/m,
 $H_{2013.s}$ – staatori magneetumine margi 2013 korral, A/m,
 $H_{2312.z}$ – ikke magneetumine margi 2312 korral, A/m,
 $H_{2312.s}$ – staatori magneetumine margi 2312 korral, A/m,
 $H_{2013.ref}$ – nimimagneetumine margi 2013 korral, A/m,
 $H_{2312.ref}$ – nimimagneetumine margi 2312 korral, A/m.

Elektrotehnilise terase markide 2013 ja 2312 magneetumise suhted võimaldavad määrata 3D-printeris kasutatavast metallist ikke ja hammaste magneetumise ligikaudsed väärtused:

$$H_{proto.z} = \frac{K_{2013.z} + K_{2312.z}}{2} \cdot H_{proto.ref} \quad (1.19)$$

$$H_{proto.s} = \frac{K_{2013.s} + K_{2312.s}}{2} \cdot H_{proto.ref} \quad (1.20)$$

kus $H_{proto.ref}$ – printimisterase nimimagneetumus, A/m,
 $H_{proto.s}$ – printimisterasest hammaste magneetumus, A/m,
 $H_{proto.z}$ – printimisterasest ikke magneetumus, A/m.

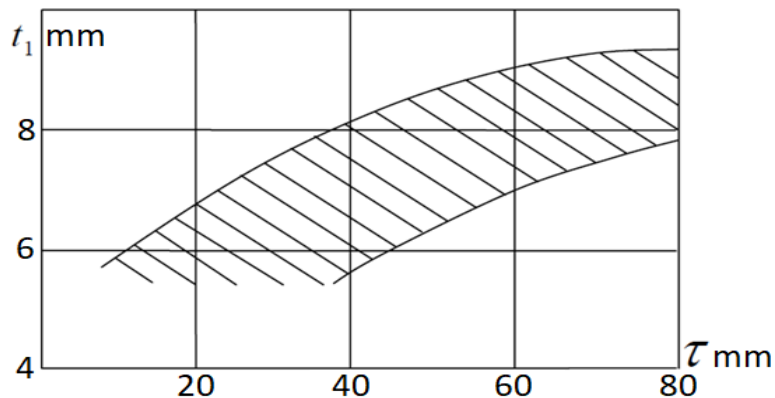
Printimisterasest hammaste ja ikke magneetumus andmed esitatud lisas 2.

1.5 Mähiste ja urete arvutamine

1.5.1 Staatori mähise parameetrite arvutamine

Staatori faasimähiste keerdude arv peab olema selline, et mootori volukate A ja induksioon õhuvahe B_δ langeksid kokku väärtustega, mis valiti eelnevalt põhimõõtude valimisel, ja et staatori urete arv tagaks mähispoolide piisavalt ühtlase jaotuse. Nende tingimuste täitmiseks valitakse esialgne hammaste jaotus t_1 olenevalt mähise tüübist ja masina poolusjaotusest. Suur arv uurdeid ja peen hammasjaotus tagavad mähispoolide ühtlasema jaotuse ümber õhuvahe.

Teisest küljest peab uure olema vasega täitmiseks piisavalt lai, ning peab mootori töötamise ajal taluma mehaanilist koormust. Samuti muutub uurete arvu suurenemisel keerukamaks tootmine ning töömahukamaks mähise valmistamine ja paigaldamine. Printimisel 3D-printeriga on staatori ja rootori valmistamisel raskusi palju vähem, seega tasub valida mähiste optimaalne tarind ja kerimismeetod. Projekteeritav mootor on prototüüp, kuna selle valmistusmeetodit ei ole veel piisavalt uuritud ja pole täpselt teada, milline on valitud parameetrite puhul uurete optimaalne arv, seetõttu kasutatakse tavaliste lühisrootoriga asünkroonmootorite tüüpilisi suhteid.



Joonis 1.2. Staatori hammaste jaotus olenevalt poolusjaotusest. [4]

Projekteeritava mootori poolusjaotus on 45,74 mm, seetõttu on hammaste jaotuse t_1 minimaalne väärtus umbes 6,50 mm ja maksimaalne väärtus umbes 9,000 mm. Võimalik uurete arv arvutatakse minimaalse ja maksimaalse hammasväärtuse jaoks, kasutades järgmisi valemeid:

$$Z_{s.min} = \frac{\pi \cdot D_{s.1}}{t_{1.min}} \quad (1.21)$$

$$Z_{s.max} = \frac{\pi \cdot D_{s.1}}{t_{1.max}} \quad (1.22)$$

kus $Z_{s.min}$ – staatori hammaste minimaalne arv,
 $Z_{s.max}$ – staatori hammaste maksimaalne arv,
 $t_{1.min}$ – staatori minimaalne hammaste jaotus, m,
 $t_{1.max}$ – staatori maksimaalne hammaste jaotus, m.

Hammaste minimaalne arv on 24 ja maksimaalne 32. Tarindi töökindluse tagamiseks ja tootmisprotsessi lihtsustamiseks kasutatakse 24 hammast. Hammaste jaotuse täpsustamiseks kasutatakse järgmist valemit:

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_{s.1}}{Z_1} \quad (1.23)$$

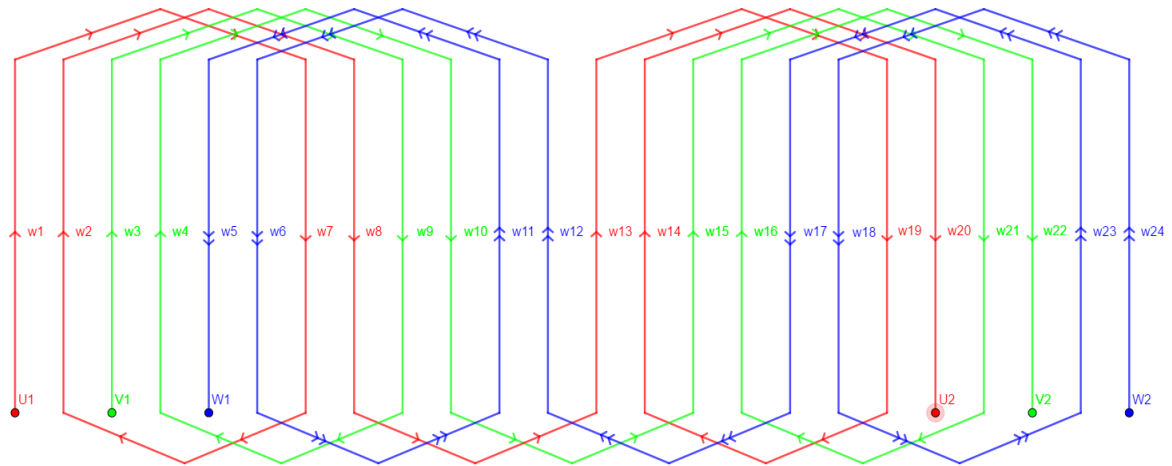
kus Z_1 – staatori hammaste optimaalne arv,
 t_1 – staatori optimaalne hammasjaotus, m.

Hammaste jaotus 24 hamba korral on 7,69 mm. Lahendus projekteeritavale masinale on ühekihilise mähise kasutamine. Ühekihilise mähise korral on väiksema isolatsioonipinna tõttu uurde täituvus mähisjuhidiga suurem kui kahekihilise mähise korral. Ühekihilise mähise teine eelis on selle uuretesse paigaldamise lihtsus. Mähis jaguneb igas poolusejaotuses mitme külgneva uurde vahel. Kahe pooluspaari ja 24 hamba puhul on iga faasi ja pooluse kohta 2 uuret. Sama faasi külgnevad poolid ühendatakse järjestikku, moodustades poolirühma. [6]

Staatoris kasutatakse kahetasandilisi silmusmähiseid. Uurde w_1 ja w_2 on faasi U_1 algus, järgmised uured w_3 ja w_4 on ühendatud faasi V_1 algusega, seejärel järgmised uured w_5 ja w_6 on ühendatud faasi W_1 algusega jne. Uured w_5 kuni w_{10} asuvad ühe polaarsusega pooluse all, järgmised 6 uuret w_{11} kuni w_{16} asuvad teise polaarsusega pooluse all jne. Kuna uured w_5 kuni w_{10} asuvad sama polaarsusega pooluse all, on kõikides nendes uuretesse paigutatud juhtides EMJ sama ja suunatud üles. Uurete w_{11} kuni w_{16} asuvad teise polaarsusega pooluse all ja nende uurete juhtide EMJ on suunatud vastassuunas. Järgmisel poolusjaotusel on juhtide EMJ suunatud uuesti üles ja viimasel alla.

Poolid moodustuvad, ühendades kokku juhid, mis asuvad antud faasi alguse ja lõpuga uuretes. Sel juhul pooli juhtide EMJ-id summeeruvad. Uurde w_1 juhid on ühendatud uurde w_7 juhtidega ja uurde w_2 juhid on ühendatud uurde w_8 juhtidega. Nii moodustavad nad pooluspaari. Pärast seda paigutatakse juht uurdest w_8 uurdesse w_{13} ja algab teise pooluspaari moodustamine. Seda tüüpi mähist nimetatakse silmusmähiseks.

Paarisarvu pooluspaaride korral on pooltel poolirühmadel pikad laupühendused, mis asuvad ühel tasandil, ja teisel poolel lühikesed laupühendused, mis asuvad teisel tasandil. Seetõttu nimetatakse selliseid mähiseid kahetasandilisteks. Paaritu arvu pooluspaaride puhul sisaldab iga faas paaritut arvu poolirühmi. Mähiste paigaldust on kujutatud joonisel 1.2. Voolu suunda mähistes on näidatud hetkel, kui $U_{U_{12}} + U_{V_{12}} = -U_{W_{12}}$. Jooniselt on näha, et voolu suunad jagunevad nelja põhirühma, mis vastab neljapooluselisele mähisele.



Joonis 1.3. Faasimähiste asetus staatori uures. Ühekihiline, kahetasandiline, kontsentriline paigaldusviis.

Staatori mähiste keerdude arvu määramiseks tuleb esmalt määrata nimivool järgmise valemiga [2]:

$$I_{n.s} = \frac{\pi \cdot D_{s.1} \cdot A}{U_n \cdot Z_1} \quad (1.24)$$

kus $I_{n.s}$ – staatori mähise nimivool, A.

Staatori mähise nimivool on 3,85 A. Mähistes puuduvad paralleelharud, seetõttu tegur $a = 1$. Keerdude arv staatori faasimähises määratakse järgmise valemiga [2]:

$$W_1 = \frac{U_n \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m_1} \quad (1.25)$$

kus W_1 – staatori faasimähise keerdude arv,
 a – paralleelharude tegur,
 m_1 – faaside arv mootori staatoris.

Projekteeritava mootori optimaalne keerdude arv on 96. Kontrollarvutus volukate väärtuse lõplikuks määramiseks [2]:

$$A' = \frac{2 \cdot I_{n.s} \cdot m_1 \cdot W_1}{\pi \cdot D_{s.1}} \quad (1.26)$$

kus A' – volukate lõplik väärtus, A/cm.

Kontrollarvutus näitas, et volukate jäi väärtusele 120 A/cm. Samuti tuleb arvutada magnetvoo väärtus valemiga [2]:

$$\phi_\mu = \frac{U_n \cdot K_e}{4 \cdot K_B \cdot W_1 \cdot K_{m1} \cdot f_n} \quad (1.27)$$

kus ϕ_μ – magnetvoog, Wb.

Tegur K_E näitab staatori mähise EMJ-i ja nimipinge suhet ning sõltub staatori ja rootori mähiste takistustest. Need väärtused pole veel määratud, seetõttu arvutatakse magnetvoog väärtuse 0,85 korral. Induktsioon õhuvahes määratakse valemiga:

$$B_{\delta}' = \frac{\phi_{\mu}}{l_{\delta} \cdot a_{\delta} \cdot \tau_1} \quad (1.28)$$

kus B_{δ}' – lõplik induktsiooniväärtus õhuvahes, T.

Praeguses projekteerimisetapis on õhuvahes induktsioon $B_{\delta}' = 0,60$ T, mis vastab teoreetilisele väärtusele $B_{\delta} = 0,60$ T. Magnetvoog on $\phi_{\mu} = 1,00$ mWb. Magnetvoo ja induktsiooni väärtused arvutatakse uuesti pärast mähiste takistuste väärtuste leidmist. Juhi ristlõige sõltub nimivoolust ja mähise lubatud voolutihedusest järgmise valemi kohaselt:

$$q_{ef.s} = \frac{I_{n.s}}{J_1} \quad (1.29)$$

kus $q_{ef.s}$ – staatori juhi ristlõige, mm²,

J_1 – voolutihedus staatori mähistes, A/mm².

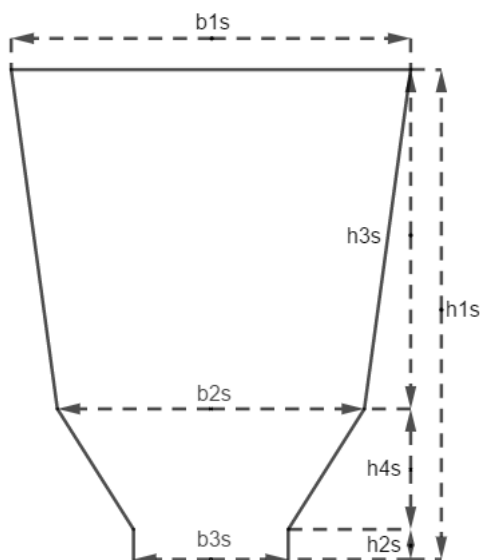
Kui voolutihedus J_1 on valitud liiga suur, suurenevad kaod mähises. Kadude suurenemine avaldub mähise temperatuuri tõusus ja mootori kasuteguri vähenemises. Teisest küljest, mida suurem on voolutihedus, seda rohkem kasutatakse aktiivmaterjale, mis vähendab toote maksumust. Projekteeritava mootori jaoks on valitud väärtus 5,00 A/mm². Arvutustulemuste kohaselt on juhi ristlõige 0,77 mm². Sellest lähtuvalt valime lisast 3 reaalseks juhtme ristlõikeks 0,79 mm². Valitud juhtme puhul on voolutihedus 4,90 A/mm². See voolutihedus tagab tootmiskulude ja mootori kasuteguri optimaalse suhte.

Tabel 1.7. Staatori mähise parameetrid.

Parameeter	Sümbol	Väärtus
Staatori hammaste jaotus, mm	t_1	7,69
Staatori hammaste arv	Z_1	24
Staatori nimivool, A	$I_{n.s}$	3,85
Staatori faasimähise keerdude arv,	W_1	96
Voolukate lõplik väärtus, A/cm	A'	120
Magnetvoog, mWb.	ϕ_{μ}	2,00
Induktsiooniväärtus õhuvahes, T	B_{δ}'	0,60
Staatori juhi ristlõige, mm ²	$q_{ef.s}$	0,79
Isolatsioonita juhi läbimõõt, mm	$d_{j.1}$	1,00
Voolutihedus staatori mähistes, A/mm ²	J_1'	4,90

1.5.2 Staatori hammaste parameetrite määramine

Väikese võimsusega mootori puhul kasutatakse trapetsikujulisi staatori uuret. See tagab kogu kõrguse ulatuses sama laiuse hamba. Sellise uurdekuju eelis on suurim pindala, kuid sellise uurde valmistamise tehnoloogia on kõige keerulisem. Uurde põhjas on magnetakistus väiksem, mis võimaldab vähendada magnetvälja tugevust hammastes.



Joonis 1.4. Staatori trapetsikujulise uurde kuju ja mõõdud.

Nüüd tuleb arvutada lubatud induksioon staatori ikkes ja B_A staatori hammastes B_{z1} , samuti määrata hamba laius ja staatori ikke kõrgus. Induktsiooni väärtused ikkes ja staatori hammastes on teada käsiraamatust ning neljapooluselise staatori puhul valitakse väärtused $B_A = 1,3$ T ja $B_{z1} = 1,5$ T. Samuti mõjutab neid parameetreid täituvustegur. See sõltub asünkroonmasina võlli kõrgusest ning staatori ja rootori juhtide isolatsiooni tüübist. Arvestades lehtmetsalli isolatsiooni valitakse teguri väärtuseks $K_{c,s} = K_{c,r} = 0,97$. Hamba laius on [2]:

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta'} \cdot t_1}{B_{z1} \cdot K_{c,s}} \quad (1.30)$$

$$h_a = \frac{\phi_{\mu}}{2 \cdot B_A \cdot l_{\delta'} \cdot K_{c,s}} \quad (1.31)$$

kus

- b_{z1} – staatori hamba laius, m,
- h_a – staatori ikke kõrgus, m,
- $K_{c,s}$ – staatori täituvustegur,
- B_A – lubatud induksioon staatori ikkes, T,
- B_{z1} – lubatud induksioon staatori hammastes, T.

Staatori hamba laius on 3,16 mm ja staatori ikke kõrgus 6,96 mm.

Uurde pilu laius $b_{3,s}$ sõltub isoleeritud mähisjuhi läbimõõdust ja määratakse valemiga [2]:

$$b_{3,s} = d_{j,2} + 0,0015 \quad (1.32)$$

kus $b_{3,s}$ – staatori uurde pilu laius, m,
 $d_{j,2}$ – staatori mähise isoleeritud juhi läbimõõt, m.

Pilu kõrgus $h_{2,s}$ peab olema minimaalne, seetõttu on selleks valitud 0,50 mm. Staatori uurde kõrgus on määratud staatori välis- ja siseläbimõõduga, samuti staatori ikkega:

$$h_{1,s} = \frac{D_{s,2} - D_{s,1} - 2 \cdot h_a}{2} \quad (1.33)$$

kus $h_{1,s}$ – staatori uurde kõrgus, m.

Trapetsikujulise uurde mõõdud $b_{2,s}$ ja $b_{3,s}$ arvutatakse valemitega [2]:

$$b_{1,s} = \frac{\pi \cdot (D_{s,2} - 2 \cdot h_a)}{Z_1} - b_{Z1} \quad (1.34)$$

$$b_{2,s} = \frac{\pi \cdot (D_{s,1} + 2 \cdot h_{4,s} + h_{2,s}) - b_{Z1} \cdot Z_1}{Z_1} \quad (1.35)$$

kus $b_{1,s}$ – trapetsi ülemise osa laius, m,
 $b_{2,s}$ – trapetsi alumise osa laius, m,
 $h_{2,s}$ – pilu kõrgus, m,
 $h_{4,s}$ – laienemise kõrgus kuni trapetsi alumise osani, m.

Pilu kõrgus $h_{4,s}$ on valitud meelevaldselt nii, et oleks tagatud suurim kasulik pindala, ja selle väärtus on 2,00 mm. Uurde põhiosa kõrgus $h_{3,s}$ on määratud valemiga [2]:

$$h_{3,s} = h_{1,s} - h_{2,s} - h_{4,s} \quad (1.36)$$

kus $h_{3,s}$ – trapetsi kõrgus, m.

Uurde kogupindala arvutatakse valemiga:

$$S_{z,s} = 0,5 \cdot (h_{3,s} \cdot (b_{1,s} + b_{2,s}) + h_{4,s} \cdot (b_{2,s} + b_{3,s})) \quad (1.37)$$

kus $S_{z,s}$ – staatori uurde pindala, m².

Mootori koostamise ja mähiste kerimise käigus jääb osa kasulikust pindalast kasutamata. Arvestades isolatsiooni ja mähkimise ebatäpsusi, kasutatakse ära keskmiselt 85% kasulikust pindalast:

$$S_{z,s,ef} = 0,85 \cdot S_{z,s} \quad (1.38)$$

kus $S_{z,s,ef}$ – efektiivne uurde pindala, m².

Viimane etapp on uurde täituvusteguri määramine. See on vajalik mõõtude ja juhi õige valiku hindamiseks [2]:

$$K_{s.ef} = \frac{d_{j,z}^2 \cdot U_n}{S_{s.ef}} \quad (1.39)$$

kus $K_{s.ef}$ – uure täituvustegur.

Täituvustegur on 0,80, mis jääb normi piiridesse. Enne tegeliku prototüübi valmistamist tuleb määrata keerdude arv igas uurdes ja uurde kasuliku pindala täituvusprotsent:

$$W_{q,1} = \frac{W_1}{q_1 \cdot m_1} \quad (1.40)$$

$$q_1 = \frac{Z_1}{m_1 \cdot p_1 \cdot 2} \quad (1.41)$$

$$S_{z.s.\%} = \frac{S_{z.s.ef}}{W_{q,1} \cdot \left(\frac{d_{j,z}}{2}\right)^2 \cdot \pi} \quad (1.42)$$

kus q_1 – staatori hammaste arv ühe uurde kohta,

$W_{q,1}$ – keerdude arv staatori ühes uurdes,

$S_{z.s.\%}$ – uurde kasuliku pindala juhiga täituvuse protsent, %.

Staatori uurde massi arvutamiseks on vaja arvutada nende keskmine laius valemitega [3]:

$$b_s' = \pi \cdot \frac{D_{s,1} + 2 \cdot h_{1,s}}{Z_1} - b_{1,s} \quad (1.43)$$

$$b_s'' = \pi \cdot \frac{D_{s,1} + 2 \cdot (h_{1,s} - h_{3,s})}{Z_1} - b_{2,s} \quad (1.44)$$

$$b_{s.avg} = \frac{b_s' + b_s''}{2} \quad (1.45)$$

kus b_s' – staatori uurde suurem laius, m,

b_s'' – staatori uurde väiksem laius, m,

$b_{s.avg}$ – staatori uurde keskmine laius, m.

Tabel 1.8. Staatori hammaste parameetrid ja mõõdud.

Parameeter	Sümbol	Väärtus
Trapetsi ülemise osa laius, mm	$b_{1,s}$	6,67
Trapetsi alumise osa laius, mm	$b_{2,s}$	5,12
Staatori uurde pilu laius, mm	$b_{3,s}$	2,52
Staatori hamba laius, mm	b_{z1}	2,58
Staatori uurde kõrgus, mm	$h_{1,s}$	8,17
Pilu kõrgus, mm	$h_{2,s}$	0,50
Trapetsi kõrgus, mm	$h_{3,s}$	5,67
Laienemise kõrgus kuni trapetsi alumise osani, mm	$h_{4,s}$	2,00
Staatori ikke kõrgus, mm	h_a	6,96
Uurde efektiivne pindala, m ²	$S_{z,s,ef}$	34,93
Keerdude arv staatori ühes uurdes	$W_{q,1}$	24
Uurde kasuliku pindala juhiga täituvuse protsent, %	$S_{z,s,\%}$	62,94

1.5.3 Rootori mähiste ja hammaste parameetrite määramine

Rootori tarind ja uurete arv Z_2 sõltub asünkroonmootori staatori uurete arvust Z_1 . Staatori ja rootori faaside arv ning pooluste arv peavad mootori normaalseks tööks olema samad, seega $m_1 = m_2$ ja $p_1 = p_2$. Teiselt poolt peab staatori ja rootori uurete arv olema erinev, seega $Z_1 \neq Z_2$. Uurete arvude suhe määratakse järgmistest kaalutlustest lähtudes [2]:

- kõrgemate harmoonikute mõju vähendamine pöördemomendi kõverale,
- mootori töö vibratsiooni ja müra vähendamine,
- lisakadude vähendamine rootori hammaste terases.

Samuti on hammaste arv konstruktsiooniliselt piiratud rootori välisdiameetriga. Liiga suure hammaste arvu korral väheneb rootori jäikus, mis võib põhjustada purunemise. Staatori 24 uurdega korral on kõige sobivam 18 uurdega rootor.

Uurete arv pooluse kohta määratakse valemiga [2]:

$$q_2 = \frac{Z_2}{2 \cdot p_2 \cdot m_2} \quad (1.46)$$

kus Z_2 – rootori hammaste optimaalne arv,
 q_2 – hammaste arv rootori pooluse kohta,
 p_2 – rootori pooluspaaride arv.

Nüüd on vaja määrata rootori mähiste voolutugevused. Staatori ja rootori mähiste keerdude arvu suhe mõjutab voolutugevuse väärtust staatoris ja rootoris. Rootori

voolutugevuse määramiseks on vaja arvutada voolutugevuste taandustegur valemiga [4]:

$$Y_i = \frac{m_1 \cdot W_1 \cdot K_{m1}}{m_2 \cdot W_2 \cdot K_{m2}} = \frac{2 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{m1}}{Z_2} \quad (1.47)$$

kus Y_i – voolutugevuste ülekandesuhe,
 m_2 – rootori faaside arv,
 K_{m2} – rootori mähisetegur.

Voolutugevuste ülekandesuhe on 30,72. Rootori mähiste voolutugevus sõltub voolutugevuste taandustegurist, staatori voolust ja magneetumisvoolust. See mootor on prototüüp, seetõttu on valitud keskmine väärtus $\cos \varphi = 0,60$. Siis on rootori vool määratav valemiga [2]:

$$I_{n.r} = Y_i \cdot I_{n.s} \cdot \cos \varphi \quad (1.48)$$

kus $I_{n.r}$ – rootori nimivool, A.

Nüüd tuleb valida sobiv juht rootori mähistele. Juhtidena kasutatakse vaskvardaid. Lühisrootori moodustamiseks ühendatakse need rootori otstes rõngastega. Voolutihedus rootori mähistes valitakse 4,00 A/mm² on väiksem kui staatoris. Juhiristlõike määratakse valemiga [2]:

$$q_{ef.r} = \frac{I_{n.r}}{J_2} \quad (1.49)$$

$$d_{t.1} = \sqrt{\frac{q_{ef.r}}{\pi}} \cdot 2 \quad (1.50)$$

kus $q_{ef.r}$ – rootori varda ristlõikepindala, mm²,
 J_2 – voolutihedus rootori mähistes, A/mm².
 $d_{t.1}$ – rootori isolatsioonita varda läbimõõt, m.

Voolutiheduse 4,00 A/mm² korral on vaja kasutada vardaid läbimõõduga 4,75 mm, arvestamata isolatsiooni. Lühisrõngaste vool sõltub rootori nimivoolust ja määratakse valemiga [2]:

$$I_{r.r} = \frac{I_{n.r}}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi p_2}{Z_2}\right)} \quad (1.51)$$

kus $I_{r.r}$ – rootori lühisrõngaste vool, A.

Ristkülikukujuliste lühisrõngaste mõõdud sõltuvad rõnga etteantud ristlõikest ja selle kõrgusest, mis valitakse 20% võrra suuremana rootori uurde kõrgusest. Voolutihedus lühisrõngastes on paremate jahutustingimuste tõttu ja soojuse eemaldamiseks rootori

varrastest umbes 20% väiksem kui varrestes. Lühisrõngaste mõõdud määratakse voolust lähtudes valemitega [2]:

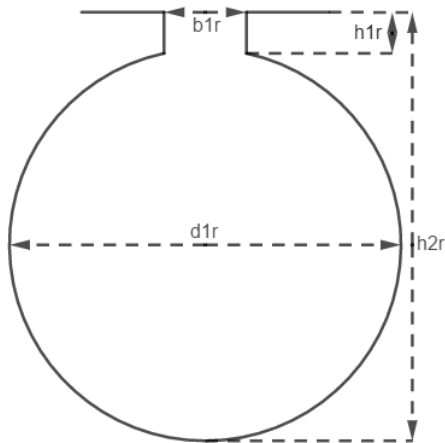
$$q_{ef.r.r} = \frac{I_{r.r}}{Z_2 \cdot 0,8} \quad (1.52)$$

$$a_{r.r} = \frac{q_{ef.r.r}}{h_{h.r}} \quad (1.53)$$

$$h_{r.r} = 1,2 \cdot h_{2,r} \quad (1.54)$$

kus $I_{r.r}$ – rootori lühisrõngaste vool, A,
 $q_{ef.r.r}$ – lühisrõnga ristlõikepindala, mm²,
 $a_{r.r}$ – rõnga laius, mm,
 $h_{r.r}$ – rõnga kõrgus, mm,
 $h_{2,r}$ – rootori uurde kogu kõrgus, mm.

Lühisrõngaste mõõtude arvutamiseks on vaja arvutada rootori uurde kogukõrgus. Samuti peab uurde läbimõõt olema suurem kui rootori varaste läbimõõt, võttes arvesse isolatsioonivaru. Parim lahendus on kasutada ümarakujulist piluga rootoriuuret. Uurde mõõdud on esitatud joonisel 1.4.



Joonis 1.5. Rotoori ümara uurde kuju ja mõõdud.

Rootori uurde pilu pikkuseks on valitud $b_{1,r} = 1$ mm ja pilu kõrguseks $h_{1,r} = 1,00$ mm. Rotoori uurete pilu ei kasutata mähiste paigutamiseks. See on vajalik, et takistada magnetvoo sulgumist rootori varaste kohal.

Rootori uurde läbimõõt sõltub rootori hammaste lubatud induktsioonist. Induktsiooni väärtused ikkes ja staatori hammastes on esitatud käsiraamatus ning neljapooluselise staatori puhul valitakse väärtused $B_j = 1,30$ T ja $B_{Z2} = 1,50$ T. Kõigepealt tuleb leida rootori hammasjaotus valemiga:

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_{r,2}}{Z_2} \quad (1.55)$$

kus t_2 – rootori optimaalne hammasjaotus, m.

Staator ja rootor valmistatakse samast materjalist, seega on südamikute täitumistegur nende jaoks sama ja on määratud valemiga [2]:

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta'} \cdot t_2}{B_{z2} \cdot K_{c,r}} \quad (1.56)$$

kus b_{z2} – rootori hamba laius, m,
 $K_{c,r}$ – rootori täitumistegur,
 B_{z2} – lubatud induksioon staatori hammastes, T.

Nüüd saab määrata rootori uurde läbimõõdu valemiga [2]:

$$d_{1,r} = \frac{(D_{r,2} - h_{1,r} \cdot 2) \pi - b_{z2} \cdot Z_2}{Z_2 + \pi} \quad (1.57)$$

$$h_{2,r} = h_{1,r} + d_{1,r} \quad (1.58)$$

kus $d_{1,r}$ – rootori uurde läbimõõt, m,
 $h_{1,r}$ – pilu kõrgus, m.

Rootori siseläbimõõt sõltub asünkroonmasina võlli läbimõõdust. Tavaliselt moodustab võlli läbimõõt 15-20% rootori välisläbimõõdust, seega on rootori siseläbimõõt [3]:

$$D_{r,1} = D_{r,2} \cdot 0,18 \quad (1.59)$$

kus $D_{r,1}$ – rootori siseläbimõõt, m.

Rootori uurded on valmistatud ilma kaldeta. Rootori uurete vinlisse ajamine võimaldab vähendada kõrgemate harmoonikute mõju ning parendada mootorite vibratsiooni ja akustilisi omadusi. Selle puudus on rootori mähiste EMJ-i vähenemine. Väikese võimsusega mootorites on uurde kalde mõju minimaalne, kuid see raskendab oluliselt koosteprotsessi, seetõttu valmistatakse uurded ilma kaldeta.

Rootori uurete ja rootori varraste läbimõõdud ning ristlõikepindalad tuleb valida nii, et rootori vardad mahuksid ilma lõtkuta rootori uuretesse, võttes arvesse varraste isolatsiooni. Rootori varda isolatsioon suurendab selle läbimõõtu umbes 0,20 mm võrra. Arvutuslik läbimõõt rootori vardal on 4,75 mm, seetõttu valitakse uurde läbimõõduks on 4,80 mm. Rootori kogupindala arvutatakse valemiga:

$$S_{z,r} = \frac{d_{1,r}^2 \cdot \pi}{4} \quad (1.60)$$

kus $S_{z,r}$ – rootori uurde ristlõikepindala, m².
 $d_{1,r}'$ – rootori uurde läbimõõt koos isolatsiooniga, m.

Tabel 1.9. Rootori hammaste parameetrid ja mõõdud.

Parameeter	Sümbol	Väärtus
Rootori nimivool, A	$I_{n,r}$	70,86
Rootori lühisrõngaste vool, A	$I_{r,r}$	103,59
Rõnga laius, mm	$a_{r,r}$	4,69
Rõnga kõrgus, mm	$h_{r,r}$	6,90
Lühisrõnga ristlõikepindala, mm ²	$q_{ef,r,r}$	32,37
Rootori varda ristlõige, mm ²	$q_{ef,r}$	17,72
Rootori uurde pilu pikkus, mm	$b_{1,r}$	1,00
Rootori hamba laius, mm	b_{z2}	4,18
Pilu kõrgus, mm	$h_{1,r}$	1,00
Rootori uurde kogu kõrgus, mm	$h_{2,r}$	6,25
Rootori isolatsioonita varda läbimõõt, mm	$d_{t,1}$	4,80
Rootori uurde läbimõõt koos isolatsiooniga, mm	$d_{1,r}'$	5,00
Rootori uurde ristlõikepindala, mm ²	$S_{z,r}$	21,65
Rootori siseläbimõõt, mm	$D_{r,1}$	10,00

1.6 Magnetahela arvutamine

Magnetahela arvutamise peamine eesmärk on määrata staatori mähise magneetimisvool I_{μ} , mis tekitab pöörleva magnetvoo ϕ_{μ} , mis omakorda indutseerib staatori mähises EMJ-i E_s . Magnetahela arvutamine toimub tühikäigurežiimil. Esiteks määratakse staatori ja rootori hammaste induktsioon. Staatori ja rootori projekteerimisel valiti hambad nii, et hammaste induktsioon oleks $B_{z1} = B_{z2} = 1,5$ T. Staatori ikke induktsioon $B_A = 1,30$ T on samuti teada. Rootori ikke induktsioon määratakse valemitega [4]:

$$B_j = \frac{\phi_{\mu}}{2 \cdot h_j \cdot l_{\delta} \cdot K_{c,s1}} \quad (1.61)$$

$$h_j = \frac{2+p}{3,2 \cdot p} \cdot \left(\frac{D_{r,2}}{2} - h_{2,r} \right) \quad (1.62)$$

kus h_j – rootori ikke kõrgus, m,
 B_j – rootori ikke induktsioon, T,
 $K_{c,s1}$ – staatori ikke täituvustegur.

Magnetvälja pinge asünkroonmootori õhuvahes arvutatakse valemitega [4]:

$$F_{\delta} = 1,6 \cdot B_{\delta}' \cdot \delta \cdot K_{\delta,s} \cdot 10^6 \quad (1.63)$$

$$K_{\delta,s} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma_s \cdot \delta} \quad (1.64)$$

$$K_{\delta,r} = \frac{t_2}{t_2 - \gamma_r \cdot \delta} \quad (1.65)$$

$$\gamma_s = \frac{\left(\frac{b_{3,s}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{3,s}}{\delta}} \quad (1.66)$$

$$\gamma_r = \frac{\left(\frac{b_{1,r}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{1,r}}{\delta}} \quad (1.67)$$

kus F_{δ} – magnetvälja pinge õhuvahes, A,
 $K_{\delta,s}$ – staatori õhuvahetegur,
 $K_{\delta,r}$ – rootori õhuvahetegur,
 γ_s – staatori uurde õhuvahetegur ja pilu suhe,
 γ_r – rootori uurde õhuvahetegur ja pilu suhe.

Asünkroonmootori staatori ja rootori hammaste magnetvälja tugevuse määramiseks kasutatakse käsiraamatu tabelit. See võimaldab määrata magneetumise ligikaudse väärtuse magnetinduktsiooni erinevate väärtuste korral. Staatori ja rootori magneetumise. Mootoris kasutatakse ühesuguseid hambaid, seega arvutatakse magnetvälja pinge valemitega [4]:

$$F_{Z1} = H_{proto,s} \cdot h_{1,s} \cdot 2 \quad (1.68)$$

$$F_{Z2} = H_{proto,s} \cdot h_{2,r} \cdot 2 \quad (1.69)$$

kus F_{Z1} – staatori hammaste magnetvälja pinge, A,
 F_{Z2} – rootori hammaste magnetvälja pinge, A.

Parameetrite valiku kontrollimiseks arvutatakse hammastsooni küllastustegur valemiga [4]:

$$K_Z = 1 + \frac{F_{Z1} + F_{Z2}}{F_{\delta}} \quad (1.70)$$

kus K_Z – hammastsooni küllastustegur.

Kui K_Z on väiksem kui 1,10, on hammastsoon alakasutatud või õhuvahetegur on valitud liiga suur, aga kui suurem kui 1,60, toimub hammastsooni üleküllastumine. Valitud parameetrite puhul on 1,17, mis on vastuvõetav.

Staatori ikke magnetvälja tugevus on [4]:

$$F_A = H_{proto.j} \cdot \frac{\pi \cdot (D_{s.1} - h_a)}{2 \cdot p} \quad (1.71)$$

$$F_j = H_{proto.j} \cdot \frac{\pi \cdot (D_{r.1} + h_j)}{2 \cdot p} \quad (1.72)$$

kus F_A – staatori ikke magnetvälja pinge, A,
 H_A – staatori ikke magneetumine, A/m,
 F_j – rootori ikke magnetvälja pinge, A,
 H_j – rootori ikke magneetumine, A/m.

Asünkroonmootori magnetvälja kogupinge on:

$$F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2} + F_A + F_j \quad (1.73)$$

kus F_{Σ} – magnetvälja kogupinge, A.

Kogutugevusest saab määrata magneetimisvoolu [4]:

$$I_{\mu} = \frac{F_{\Sigma} \cdot p_1}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{m1}} \quad (1.74)$$

$$I_{\mu}' = \frac{I_{\mu}}{I_{n.s}} \quad (1.75)$$

kus I_{μ} – magneetimisvool, A,
 I_{μ}' – magneetimisvoolu ja staatori nimivoolu suhe.

Projekteeritava mootori puhul oli magneetimisvool 2,94 A ning magneetimisvoolu ja staatori voolu suhe 0,76. Väikese võimsusega mootorite korral on see väärtus tavaliselt vahemikus 0,50 kuni 0,90. Arvutatud parameetrid on vajalikud mähiste takistuste arvutamiseks.

Tabel 1.10. Asünkroonmootori magnetahela parameetrid.

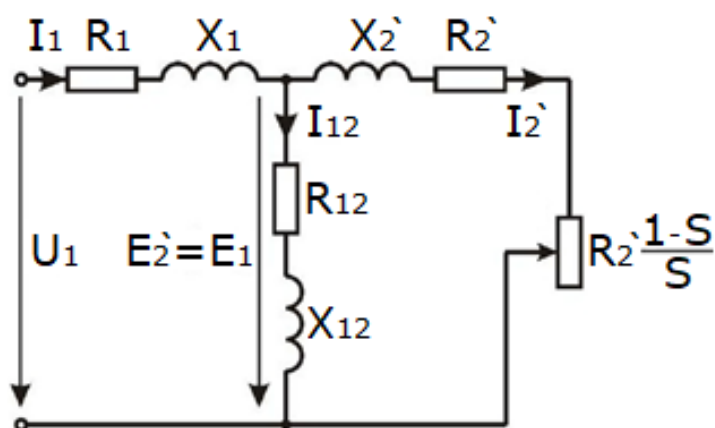
Parameeter	Sümbol	Väärtus
Magnetvälja pinge õhuvahes, A	F_{δ}	308,30
Staatori hammaste magnetvälja pinge, A	F_{Z1}	29,78
Rootori hammaste magnetvälja pinge, A	F_{Z2}	22,79
Staatori ikke magnetvälja pinge, A	F_A	3,33
Rootori ikke magnetvälja pinge, A	F_j	0,22
Magnetvälja kogupinge, A	F_{Σ}	365,58
Magneetimisvool, A	I_{μ}	2,94
Staatori ikke induktsioon, T	B_A	1,30
Rootori ikke induktsioon, T	B_j	0,63
Induktsioon staatori hammastes, T	B_{Z1}	1,50
Induktsioon rootori hammastes, T	B_{Z2}	1,50

1.7 Aseskeemi parameetrite määramine

Asünkroonmootori parameetrite määramine on vajalik mootori töö arvutamiseks, teoreetilise kasuteguri määramiseks ja simulatsioonide läbiviimiseks. Kokku on selles osas määratud 6 parameetrit:

- staatori mähiste aktiiv- ja reaktiivtakistused R_1, X_1 ,
- rootori mähiste aktiiv- ja reaktiivtakistused R_2', X_2' ,
- vastastikuse induktiivsuse takistus X_{12} ,
- arvutuslik takistus R_{12}' , mis võtab arvesse kaod terases.

Mootori parameetrid sõltuvad töörežiimist. Koormuse suurenemisel suureneb lekkevoog ja magnetjuhi ahela osade küllastumise tõttu vähenevad mähiste X_1 ja X_2' reaktiivtakistused. Samuti väheneb magnetahela küllastusaste piki põhivoorada ja suureneb X_{12} . Libistus mõjutab samuti parameetreid ja põhjustab muutusi rootori mähiste R_2' ja X_2' takistustes.



Joonis 1.6. Asünkroonmootori aseskeem. [1]

1.7.1 Staatori mähise takistuste arvutamine

Esmalt käsitletakse staatori mähise takistusi. See koosneb aktiivsest komponendist R_1 ja reaktiivsest komponendist X_1 . Staatori mähise aktiivtakistus sõltub juhi pikkusest ja läbimõõdust, aga ka voolu juhtiva osa temperatuurist. Mida kõrgem on temperatuur, seda suurem on takistus.

Staatori mähise takistus temperatuuril 20 °C arvutakse valemiga:

$$R_1 = \rho_{V.CU} \cdot \frac{L_1}{q_{ef.s}} \quad (1.76)$$

kus R_1 – staatori mähise aktiivtakistus, Ω ,
 L_1 – staatori mähise juhi pikkus, m,
 $\rho_{V.CU}$ – vase eritakistus, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

Staatori mähistes kasutatakse vaskjuhte, seega on mähise eritakistus 0,018 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ teada käsiraamatust. Juhtide pikkus määratakse valemitega [2]:

$$L_1 = W_1 \cdot 2 \cdot (l_\delta + l_{w.s} + l_{out.s}) \quad (1.77)$$

$$L_{w.s} = K_{w.s} \cdot b_{m.s} + 2 \cdot B_s \quad (1.78)$$

$$l_{out.s} = K_{out.s} \cdot b_{m.s} + B_s \quad (1.79)$$

$$b_{m.s} = \frac{\pi \cdot (D_{s.1} + h_{1.s}) \cdot \beta_{1.s}}{2 \cdot p} \quad (1.80)$$

kus $l_{w.s}$ – staatori esiosa pikkus, m,
 $K_{w.s}$ – staatori esiosa pikkuse tegur,
 $l_{out.s}$ – staatori mähise esiosade ulatus, m,
 $K_{out.s}$ – staatori mähise esiosade ulatustegur,
 $b_{m.s}$ – staatori mähise keskmine laius, m,
 B_s – lisapikkus vastavalt staatori mähise paigaldusviisile, m,
 $\beta_{1.s}$ – staatori mähise sammu suhteline lühenemine,
 K_w – staatori ja rootori esiosa ning ulatuse suhte tegur.

Staatori aktiivtakistuste arvutamise tegurid on valitud käsiraamatust. Nende väärtused projekteeritava masina jaoks võivad veidi erineda ja neid kontrollitakse staatori mähise paigaldamise ajal mootori koostamisel.

Tabel 1.11. Mähiste aktiivtakistuste tegurid. [2]

Parameeter	Sümbol	Väärtus
Staatori esiosa pikkuse tegur	$K_{w.s}$	1,30
Staatori mähise esiosade ulatustegur	$K_{out.s}$	0,40
Lisapikkus vastavalt staatori mähise paigaldusviisile, m	B_s	0,01
Staatori mähise sammu suhteline lühenemine	$\beta_{1.s}$	1,00

Staatori mähise reaktiivtakistus on induktiivne ja sõltub sagedusest ning mähise keerdude arvust. Lisaks kasutatakse mähiste keeruka kuju tõttu mootorites magnetjuhtivuse eritegureid.

Staatori mähise reaktiivtakistus saab arvutada valemiga [2]:

$$X_1 = 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{W_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_\delta}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{1.s} + \lambda_{2.s} + \lambda_{3.s}) \quad (1.81)$$

kus X_1 – staatori mähise reaktiivtakistus, Ω ,
 $\lambda_{1.s}$ – staatori uurdehajumise magnetjuhtivuse tegur,
 $\lambda_{2.s}$ – staatori esihajumise magnetjuhtivuse tegur,
 $\lambda_{3.s}$ – staatori mähiste diferentsiaalhajumise magnetjuhtivuse tegur.

Uurdehajumise magnetjuhtivuse tegur sõltub uurde kujust. Staatori uurdes on ühekihiline mähis ja uure on trapetsikujuline. Staatori uurdehajumise magnetjuhtivuse tegur arvutatakse valemiga [2]:

$$\lambda_{1.s} = 0,4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{h_{3.s}}{b_{2.s} \cdot 3} \cdot K_{\beta.s} + \left(\frac{h_{4.s}}{b_{2.s}} + \frac{3 \cdot h_{4.s}}{b_{2.s} + b_{3.s}} + \frac{h_{2.s}}{b_{3.s}} \right) \cdot K_{\beta.s}' \right) \quad (1.82)$$

$$K_{\beta.s} = K_{\beta.s}' = 1 \quad (1.83)$$

kus $K_{\beta.s}$ – mähise sammust sõltuvuse tegur,
 $K_{\beta.s}'$ – mähise sammust sõltuvuse suhteline tegur.

Projekteeritava mootori jaoks valiti ühekihiline mähkimisviis, seetõttu $K_{\beta.s} = K_{\beta.s}' = 1$. Staatori mähiste esihajumise magnetjuhtivuse tegur arvutatakse valemiga [2]:

$$\lambda_{2.s} = 0,42 \cdot \frac{q_1}{l_\delta} \cdot \left(l_{w.s} - 0,64 \cdot \tau_1 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{q_1 + 1}{q_1} \right) \right) \quad (1.84)$$

Diferentsiaalhajumise magnetjuhtivuse tegur määratakse valemitega [2]:

$$\lambda_{3.s} = \frac{t_2}{12 \cdot \delta \cdot K_{\delta.s}} \cdot \xi_s \quad (1.85)$$

$$\xi_s = 2 \cdot \left(2 \cdot \frac{t_2}{t_1} - \frac{t_1}{t_2} \cdot \Delta_{z.s} \right) \cdot K_{\beta.s} - K_{m1}^2 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \quad (1.86)$$

kus ξ_s – staatori mähiste diferentsiaalhajumise juhtivuse tegur,
 K_{θ}' – diferentsiaalhajumise nurga tegur,
 $\Delta_{z.s}$ – staatori diferentsiaalhajumise tegur.

Staatori puhul sõltub diferentsiaalhajumise sammu tegur staatori uurde pilu pikkuse ja õhuvahe ning staatori hammasjaotuse suhtest. Lisas 4 on esitatud staatori ja rootori diferentsiaalhajumise sammu tegurid. Leitud takistused kehtivad ainult asünkroonmootori ühele faasile. Kõik mootori faasid on sümmeetrilised, seetõttu on nende parameetrid normaaltingimustes samad.

Kasutades arvutatud takistusi, saab leida nende suhtelised väärtused valemitega:

$$R_1' = R_1 \cdot \frac{I_{n.s}}{U_n} \quad (1.87)$$

$$X_1' = X_1 \cdot \frac{I_{n.s}}{U_n} \quad (1.88)$$

kus R_1' – staatori mähise suhteline aktiivtakistus.

X_1' – staatori mähise suhteline reaktiivtakistus.

Tabel 1.12. Staatori mähiste parameetrid.

Parameeter	Sümbol	Väärtus
Staatori mähise juhi pikkus, m	L_1	33,81
Staatori mähise aktiivtakistus, Ω	R_1	0,75
Staatori mähise suhteline aktiivtakistus	R_1'	0,12
Staatori uurdehajumise magnetjuhtivuse tegur	$\lambda_{1.s}$	4,14
Staatori esihajumise magnetjuhtivuse tegur	$\lambda_{2.s}$	0,87
Staatori mähiste diferentsiaalhajumise magnetjuhtivuse tegur	$\lambda_{3.s}$	6,86
Staatori mähise reaktiivtakistus, Ω	X_1	1,23
Staatori mähise suhteline reaktiivtakistus	X_1'	0,20

1.7.2 Rootori mähise takistuste arvutamine

Asünkroonmasina rootor koosneb varrastest ja lühisrõngastest. Rootori aktiivtakistus koosneb varda ja kahe naabervarda vahelise lühisrõnga osa takistusest. Rootori voolu juhtiva osa materjal on alumiinium, mille eritakistus on $0,026 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. Rootori ahela takistuse saab määrata valemitega [2]:

$$r_2 = r_{r.1} + \frac{2 \cdot r_{r.2}}{\Delta^2} \quad (1.89)$$

$$r_{r.1} = \rho_{V.AL} \cdot \frac{l_\delta}{q_{ef.r}} \quad (1.90)$$

$$r_{r.2} = \rho_{V.AL} \cdot \frac{\pi \cdot (D_{r.2} - h_{r.r})}{Z_2 \cdot q_{ef.r.r}} \quad (1.91)$$

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2} \quad (1.92)$$

kus r_2 – rootori sektsiooni aktiivtakistus, Ω ,

$r_{r.1}$ – rootori varda takistus, Ω ,

$r_{r.2}$ – lühisrõnga lõigu takistus, Ω ,

$\rho_{V.AL}$ – alumiiniumi eritakistus, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$,

Δ – lühisrõnga lõigu samm tegur.

Staatoris ja rootoris on faasi keerdude arv erinev, seetõttu on vaja rootori mähise takistus taandada staatori mähisele valemiga [2]:

$$R_2 = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (W_1 \cdot K_{m1})^2}{Z_2} \quad (1.93)$$

kus R_2 – rootori sektsiooni taandatud aktiivtakistus, Ω .

Rootori reaktiivtakistus arvutatakse magnetjuhtivuse teguri kaudu valemiga [2]:

$$x_2 = 7,9 \cdot f \cdot l_\delta \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda_{1,r} + \lambda_{2,r} + \lambda_{3,r}) \quad (1.94)$$

kus x_2 – rootori sektsiooni reaktiivtakistus, Ω ,
 $\lambda_{1,r}$ – rootori uurdehajumise magnetjuhtivuse tegur,
 $\lambda_{2,r}$ – rootori esihajumise magnetjuhtivuse tegur,
 $\lambda_{3,r}$ – rootori sektsiooni diferentsiaalhajumise magnetjuhtivuse tegur.

Rootori uurdes on ühekihiline mähis ja see on ümara kujuga. Uurdehajumise tegur arvutamiseks kasutatakse valemit [2]:

$$\lambda_{1,r} = 0,785 - \frac{b_{1,r}}{2 \cdot d_{1,r}} + \frac{h_{1,r}}{b_{1,r}} \quad (1.95)$$

Diferentsiaalhajumise magnetjuhtivuse tegur määratakse valemitega [2]:

$$\lambda_{3,r} = \frac{t_2}{12 \cdot \delta \cdot K_{\delta,r}} \cdot \xi_r \quad (1.96)$$

$$K_{\delta,r} = \frac{t_2}{t_2 - \gamma_r \cdot \delta} \quad (1.97)$$

$$\gamma_r = \frac{\left(\frac{b_{1,r}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{1,r}}{\delta}} \quad (1.98)$$

$$\xi_r = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2}\right)^2 - \frac{\Delta_{Z,r}}{1 - \left(\frac{p}{Z_2}\right)^2} \quad (1.99)$$

kus ξ_r – rootori diferentsiaalhajumise juhtivuse tegur,
 $\Delta_{Z,r}$ – rootori diferentsiaalhajumise sammude tegur,
 $K_{\delta,r}$ – rootori õhuvähe tegur,
 γ_r – õhuvähe ja rootori uurde pilu suhe.

Rootori puhul sõltub diferentsiaalhajumise sammude tegur rootori soone pilu pikkuse ja õhuvähe ning rootori hammasjaotuse suhtest.

Sektsiooni esihajumise magnetjuhtivuse tegur sõltub lühisrõngaste mõõtudest ja arvutamiseks kasutatakse valemit [2]:

$$\lambda_{2,r} = \frac{2,3 \cdot (D_{r,2} - h_{r,r})}{Z_2 \cdot l_\delta \cdot \Delta^2} \cdot \ln \frac{4,7 \cdot (D_{r,2} - h_{r,r})}{2 \cdot q_{ef,r,r}} \quad (1.100)$$

Nagu ka aktiivtakistuse puhul, tuleb rootori sektsiooni reaktiivtakistus taandada staatori mähisele valemiga [2]:

$$X_2 = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (W_1 \cdot K_{m1})^2}{Z_2} \quad (1.101)$$

kus X_2 – rootori sektsiooni taandatud reaktiivtakistus, Ω .

Mähiste takistuste suhtelised väärtused määratakse sarnaselt staatori mähistega valemitega:

$$R_2' = R_2 \cdot \frac{I_{n,s}}{U_n} \quad (1.102)$$

$$X_2' = X_2 \cdot \frac{I_{n,s}}{U_n} \quad (1.103)$$

kus R_2' – rootori sektsiooni suhteline aktiivtakistus,
 X_2' – rootori sektsiooni suhteline reaktiivtakistus.

Tabel 1.13. Rootori mähiste parameetrid.

Parameeter	Sümbol	Väärtus
Rootori sektsiooni aktiivtakistus, m Ω	r_2	0,12
Rootori sektsiooni taandatud aktiivtakistus, Ω	R_2	0,65
Rootori sektsiooni suhteline aktiivtakistus	R_2'	0,10
Rootori uurdehajumise magnetjuhtivuse tegur	$\lambda_{1,r}$	1,67
Rootori esihajumise magnetjuhtivuse tegur	$\lambda_{2,r}$	2,01
Rootori sektsiooni diferentsiaalhajumise magnetjuhtivuse tegur	$\lambda_{3,r}$	3,23
Rootori sektsiooni reaktiivtakistus, m Ω	x_2	0,16
Rootori sektsiooni taandatud reaktiivtakistus, Ω	X_2	0,88
Rootori sektsiooni suhteline reaktiivtakistus	X_2'	0,14

1.7.3 Magneetimisahela arvutamine

Asünkroonmasina magneetimisahelal on oma eraldi takistus ja see arvutatakse eraldi. Põhikaod terases võetakse arvesse ainult staatori südamikule puhul, kuna nimitöörežiimis on rootori ümbermagneetimise sagedused liiga väikesed ja kaod rootori terases võib arvestamata jätta.

Põhikaod staatori terases arvutatakse valemitega [4]:

$$P_{\Delta,s} = K_{\Delta,teras} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta_{\Delta}} \cdot (k_{\partial a} \cdot B_A^2 \cdot m_a + k_{\partial z} \cdot \beta_{z1}^2 \cdot m_{z1}) \quad (1.104)$$

kus $P_{\Delta,s}$ – põhikaod staatori terases, W,
 $K_{\Delta,teras}$ – erikaod terases, W/kg,
 β_{Δ} – astmenäit olenevalt elektrotehnilise terase tüübist,
 $k_{\partial a}$ – tegur, mis võtavad arvesse mõju kadudele ikkes,
 $k_{\partial z}$ – tegur, mis võtavad arvesse mõju kadudele hammastes,
 m_a – staatori ikke mass, kg,
 m_{z1} – staatori hammaste mass, kg.

Väikese võimsusega masinate puhul valitakse tegurid, mis võtavad arvesse magnetjuhi lõikude vahelise voo ebaühtlase jaotumise mõju kadudele terases ja tehnoloogilised tegurid, järgmiselt: $k_{\partial a} = 1,60$ ja $k_{\partial z} = 1,80$.

Rootori ikke ja hammaste terase massi saab arvutada valemitega [4]:

$$m_a = \pi \cdot (D_{s,2} - h_a) \cdot h_a \cdot l_{\delta} \cdot k_c \cdot \gamma_{SI} \quad (1.105)$$

$$m_{z1} = h_{1,s} \cdot b_{s,avg} \cdot Z_1 \cdot l_{\delta} \cdot K_{c,s} \cdot \gamma_{SI} \quad (1.106)$$

kus γ_{SI} – elektrotehnilise terase tihedus, kg/m³.

Magneetimisahela takistused määratakse valemitega:

$$R_{12} = \frac{P_{\Delta,s}}{m_1 \cdot I_{\mu}^2} \quad (1.107)$$

$$X_{12} = \frac{U_n}{I_{\mu}} - X_1 \quad (1.108)$$

$$R_{12}' = R_{12} \cdot \frac{I_{n,s}}{U_n} \quad (1.109)$$

$$X_{12}' = X_{12} \cdot \frac{I_{n,s}}{U_n} \quad (1.110)$$

kus R_{12} – magneetumisahela aktiivtakistus, Ω ,
 X_{12} – magneetumisahela reaktiivtakistus, Ω ,
 R_{12}' – magneetumisahela suhteline aktiivtakistus, Ω ,
 X_{12}' – magneetumisahela suhteline reaktiivtakistus, Ω .

Tabel 1.14. Magneetimisahela ja uurde kaldenurga parameetrid.

Parameeter	Sümbol	Väärtus
Magneetimisahela reaktiivtakistus, Ω ,	X_{12}	6,94
Magneetimisahela suhteline reaktiivtakistus, Ω	X_{12}'	1,11
Magneetimisahela aktiivtakistus, Ω	R_{12}	0,15
Magneetimisahela suhteline aktiivtakistus, Ω	R_{12}'	0,024

1.8 Teoreetilise kasuteguri arvutamine

Enne asünkroonmootori kasuteguri arvutamist tuleb arvutusliku võimsuse valiku lähteparameetreid võrrelda arvutustest saadud väärtustega:

$$K_E' = \frac{X_{12}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{12})^2}} \quad (1.111)$$

$$\cos \varphi' = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + X_1^2}} \quad (1.112)$$

kus K_E' – staatori mähise EMJ-i ja nimipinge arvutuslik suhe,
 $\cos \varphi'$ – aktiiv- ja reaktiivvõimsuse arvutatud seos.

Asünkroonmootori kasuteguri määramiseks on vaja arvutada kõik töö ajal tekkivad kaod. Esmalt määratakse kaod staatori ja rootori mähistes. Need sõltuvad mähise takistusest ja mähise voolust. Rootori puhul kasutatakse staatori mähiste taandatud voolu ja takistuse väärtusi:

$$P_{\Delta.w1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_{n.s}^2 \quad (1.113)$$

$$P_{\Delta.w2} = m_2 \cdot R_2' \cdot (I_{n.s} \cdot \cos \varphi')^2 \quad (1.114)$$

kus $P_{\Delta.w1}$ – aktiivvõimsuse kaod staatori mähistes, W,
 $P_{\Delta.w2}$ – aktiivvõimsuse kaod rootori varrestes ja rõngastes, W.

Põhikaod staatori terases on määratud eelnevalt, lisaks tuleb leida lisa- ja mehaanilised kaod valemitega [2]:

$$P_{\Delta.mech} = K_{mech} \cdot \left(\frac{n_n}{1000}\right)^2 \cdot (10 \cdot D_{s.1})^3 \quad (1.115)$$

$$P_{\Delta.extra} = P_n \cdot 0,01 \quad (1.116)$$

kus K_{mech} – mehaaniliste kadude tegur,
 $P_{\Delta.mech}$ – mehaanilised kaod, W,
 $P_{\Delta.extra}$ – lisakaod, W.

Mootoritel, kus $p_1 = 2$ ja $D_{s.2} \leq 0,25$ m, on mehaaniliste kadude tegur $K_{mech} = 6$. Lisakadudesse kantakse 1% nimivõimsusest. Kui mootor töötab, tekivad pulseerimiskaod. Need jagunevad pinnakadudeks ning kadudeks staatori ja rootori hammastes.

Pinnakadude määramiseks tuleb leida pilu laiuse ja õhuvahe suhe [2]:

$$\beta_{0.s} = \frac{b_{1.r}}{\delta} \quad (1.117)$$

$$\beta_{0.r} = \frac{b_{3.s}}{\delta} \quad (1.118)$$

kus $\beta_{0.s}$ – rootori pilu laiuse ja õhuvahe suhe,
 $\beta_{0.r}$ – staatori pilu laiuse ja õhuvahe suhe.

Staatori korral $\beta_{0.s} \approx 4$ ja rootori korral $\beta_{0.s} \approx 10$. Staatori ja rootori hammaste krooni kohal asuva õhuvahe induktsiooni pulsatsiooni amplituudi sõltuvust pilu laiuse ja õhuvahe suhtest on kujutatud lisas 5. Esmalt leitakse staatori ja rootori hammaste krooni kohal asuva õhuvahe induktsiooni pulsatsiooni amplituud.

Pinnakaod leitakse valemitega [2]:

$$P_{\Delta.s} = 0,5 \cdot k_{\beta.1} \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n_n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (\beta_{\Delta.s} \cdot t_2 \cdot 1000)^2 \quad (1.119)$$

$$P_{\Delta.r} = 0,5 \cdot k_{\beta.2} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n_n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (\beta_{\Delta.r} \cdot t_1 \cdot 1000)^2 \quad (1.120)$$

$$P_{\Delta.s.\Sigma} = P_{\Delta.s} \cdot (t_1 - b_{3.s}) \cdot Z_1 \cdot l_\delta \quad (1.121)$$

$$P_{\Delta.r.\Sigma} = P_{\Delta.r} \cdot (t_2 - b_{1.r}) \cdot Z_2 \cdot l_\delta \quad (1.122)$$

kus $\beta_{\Delta.s}$ – staatori õhuvahe induktsiooni pulsatsioonide amplituud, T,
 $\beta_{\Delta.r}$ – rootori õhuvahe induktsiooni pulsatsioonide amplituud, T,
 $P_{\Delta.s}$ – pulsatsiooni pinnakaod staatoris, W,
 $P_{\Delta.r}$ – pulsatsiooni pinnakaod rootoris, W,
 $k_{\beta.1}$ – staatori pulsatsiooni pinnakadude tegur,
 $k_{\beta.2}$ – rootori pulsatsiooni pinnakadude tegur,
 $P_{\Delta.s.\Sigma}$ – pulsatsiooni kogupinnakaod staatoris, W,
 $P_{\Delta.r.\Sigma}$ – pulsatsiooni kogupinnakaod rootoris, W.

Staatori ja rootori pulsatsioonipinnakadude tegurid on $k_{\beta,1} = 1,40$ ja $k_{\beta,2} = 1,70$. Staatori ja rootori hammaste kaod arvutatakse valemitega [2]:

$$\beta_{\Delta Z1} = \frac{\gamma_r \cdot \delta}{2 \cdot t_1} \cdot B_{Z1} \quad (1.123)$$

$$\beta_{\Delta Z2} = \frac{\gamma_s \cdot \delta}{2 \cdot t_2} \cdot B_{Z2} \quad (1.124)$$

$$P_{\Delta Z1, \Sigma} = 0,11 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n_n \cdot \beta_{\Delta Z1}}{1000} \right)^2 \cdot m_{Z1} \quad (1.125)$$

$$P_{\Delta Z2, \Sigma} = 0,11 \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n_n \cdot \beta_{\Delta Z2}}{1000} \right)^2 \cdot m_{Z2} \quad (1.126)$$

$$m_{Z2} = h_{1,r} \cdot \frac{b_{Z2} + d_{1,r'}}{2} \cdot Z_2 \cdot l_\delta \cdot K_{c,s} \cdot \gamma_{SI} \quad (1.127)$$

kus m_{Z2} – rootori hammaste mass, kg,
 $\beta_{\Delta Z1}$ – induktsiooni pulsatsioonide amplituud staatori hambas, T,
 $\beta_{\Delta Z2}$ – induktsiooni pulsatsioonide amplituud rootori hambas, T,
 $P_{\Delta Z1, \Sigma}$ – pulsatsiooni kogukaod staatori hammastes, W,
 $P_{\Delta Z2, \Sigma}$ – pulsatsiooni kogukaod rootori hammastes, W.

Asünkroonmootori pulsatsiooni kogukaod ja kasutegur määratakse valemitega:

$$P_{\Delta, pulse} = P_{\Delta Z1, \Sigma} + P_{\Delta Z2, \Sigma} + P_{\Delta, s, \Sigma} + P_{\Delta, r, \Sigma} \quad (1.128)$$

$$P_{\Delta, \Sigma} = P_{\Delta, pulse} + P_{\Delta, w1} + P_{\Delta, w2} + P_{\Delta, mech} + P_{\Delta, extra} \quad (1.129)$$

$$\eta' = 1 - \frac{P_{\Delta, \Sigma}}{I_n \cdot U_n \cdot m_1 \cdot \cos \varphi'} \quad (1.130)$$

kus $P_{\Delta, pulse}$ – pulsatsiooni üldkaod, W,
 $P_{\Delta, \Sigma}$ – üldkaod, W,
 η' – asünkroonmootori arvutuslik kasutegur, %.

Mootori nimikasutegur näitab, kui palju aktiivvõimsust muundatakse kasulikuks tööks. Mõõdetud andmetest saab nimipöördemomendi määrata järgmise valemiga:

$$M_n = \frac{P_n \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n_n} \quad (1.131)$$

kus M_n – nimipöördemoment (Nm).

Tabel 1.15. Asünkroonmootori kasuteguri ja pöördemomendi arvutamise tulemused.

Parameeter	Sümbol	Väärtus
Aktiivvõimsuse kaod staatori mähistes, W	$P_{\Delta.w1}$	33,40
Aktiivvõimsuse kaod rootori varrastes ja rõngastes, W	$P_{\Delta.w2}$	7,67
Mehaanilised kaod, W	$P_{\Delta.mech}$	2,57
Lisakaod, W	$P_{\Delta.extra}$	1,00
Pulsatsiooni üldkaod, W	$P_{\Delta.pulse}$	0,95
Üldkaod, W	$P_{\Delta.\Sigma}$	49,24
Asünkroonmootori arvutuslik kasutegur, %	η'	65,71
Nimipöördemoment, Nm	M_n	0,66
Staatori mähise EMJ-i ja nimipinge arvutuslik suhe	K_E'	0,85
Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse arvutatud seos	$\cos \varphi'$	0,52

Kokkuvõtteks võib öelda, et asünkroonmootori esialgsed ja arvutatud parameetrid osutusid üsna lähedasteks. See tähendab, et arvutused on õiged ja valitud mõõte võib kasutada simulatsioonideks ning mootori mudeli ja tegeliku prototüübi valmistamiseks. Reaktiivtakistus osutus üsna suureks, seetõttu erineb projekteerimise alguses valitud väärtus $\cos \varphi$ arvutatud väärtusest $\cos \varphi'$ 14,6% võrra. Arvutustulemuste kohaselt on mootori kasuteguri väärtus suurem kui oli valitud esialgses projekteerimisetapis. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse suhe osutus veidi väiksemaks kui algetapis. Need erinevused on lubatavad ja mootori saadud parameetrid vastavad selle mootori projekteerimisülesande püstitamisel ette nähtud parameetritele.

2. MUDELDAKINE JA PROTOTÜÜPIMINE

Selles osas käsitletakse asünkroonmootori ehitamist, lähtudes teoreetilistest arvutustest. Prototüübi parameetrid ja mõõdud erinevad teoreetilistest. See on tingitud sellest, et metalliga 3D-printimise tehnikat ei ole veel piisavalt uuritud. Printimismaterjal ja -meetod ei võimalda tagada sama täpsusastet, mis klassikaline tootmismeetod, seetõttu töödeldakse prinditud osasid täpsuse parandamiseks ja defektide kõrvaldamiseks. Mootori ehitamise protsessi võib jagada järgmisteks etappideks:

- mudeli ettevalmistamine ja optimeerimine,
- südameke laminatsiooni lisamine valminud mudelile,
- 3D-printeri parameetrite määramine ja mudeli printimine,
- osade noolutamine ja töötlemine pärast printimist,
- mootori teiste osade moodustamine,
- 3D-printeriga prinditud töödeldud osade lõõmutamine,
- töötava prototüübi koostamine.

Pärast koostamist katsetatakse mootorit võrdluseks teoreetiliste andmetega ja teiste sarnaste mudelite omadustega. Lisaks 3D-mudelile simuleeritakse magnetväljade jaotust staatori ja rootori südames. See on vajalik võrdlemiseks teoreetiliste ja tegelike induktioonväärtustega staatori ja rootori erinevates osades. Valmistamise käigus tehti palju ebaõnnestunud prototüübi printimise, muudatuste ja modifikatsioonide katseid. Printimisparameetrite optimaalne suhe määrati empiirilisel, mistõttu oli vaja teha mitmeid katseid parameetrite optimaalse suhte määramiseks.

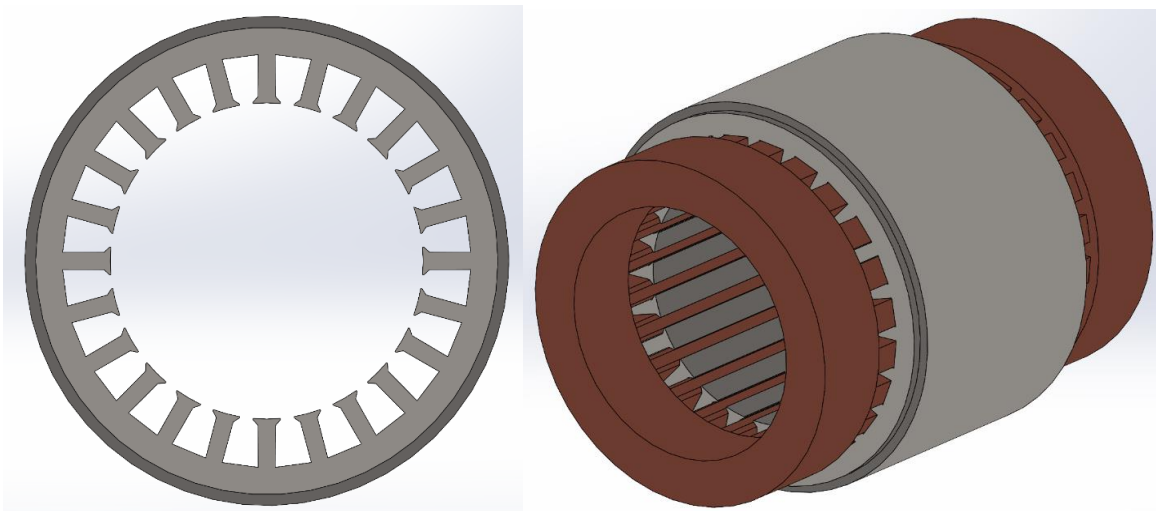
2.1 Mudeli ettevalmistamine

Mudel koostati teoreetiliselt arvutatud mõõtude järgi. Rootori ja staatori südameke mõõdud sobivad printimiseks, seega valmistatakse need tervikuna. Mootor koosneb järgmistest komponentidest:

- Staatori terviksüdamik.
- Rootori terviksüdamik.
- Rootori vardad. Teooria järgi on rootoris 18 varrast.
- Rootori lühisrõngad. Rootori südameke servades kasutatakse 2 rõngast.
- Laagrid. Need on vajalikud rootori ja rootori võlli sujuvaks pöörlemiseks. Mudelis on neid 2.

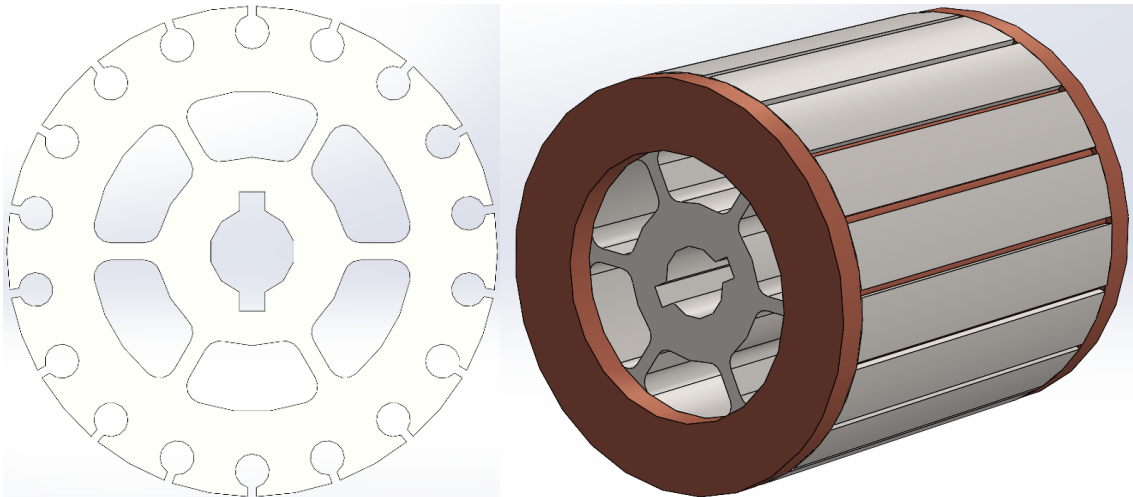
- Staatori mähised. Mudelis on mähiseid kujutatud lihtsustatult. Teoreetilised arvutused näitavad, et iga faasi kohta on juhti umbes 33 m.
- Võlli. Rotor on pressitud võllile, mis kannab rootori mehaanilise pöörlemise üle reduktorile või muule täiturile.
- Külgtued. Need on vajalikud staatori osade ühendamiseks ja mootori kinnitamiseks alusele. Mudelis on neid 2.
- Kiilud, poldid ja keermesvardad. Neid mehaanikatarvikuid kasutatakse komponentide omavaheliseks ühendamiseks.

Staatori südamik prinditakse ühes tükis. Staatori välisläbimõõt vastab teoreetilisele ja on 89 mm ning siseläbimõõt on 57,5 mm. Siseläbimõõtu vähendati, et tagada jätkutöötlemisega suurem täpsus. Staatori südamiku otstesse lisati külgtugede kinnitamiseks aste välisläbimõõduga 85 mm ja pikkusega 2 mm. Staatori südamiku moodud jahutusribisiga ülatab printeri töötsooni, mistõttu otsustati naid mitte lisada.



Joonis 2.1. Staatori südamiku eestvaade ilma mähisteta (vasakul). Staatori südamiku perspektiivvaade, kus mähiseid on kujutatud skemaatilisel (paremal).

Rootori südamik on 56,75 mm pikkune silinder. Algselt oli rootori välisläbimõõt 58,75 mm, kuid mudeli printimiseks ettevalmistamise käigus otsustati printimise ja töötlemise iseärasuste tõttu vähendada rootori välisläbimõõtu 57,50 mm-ni. Võlli ava läbimõõt on 10,00 mm. Võlli kinnitamiseks tehti 2 läbivat ristkülikukujulist väljalõiget mõõtudega 3,00 × 2,00 mm võlli ja rootori vahelistele kiiludele. Massi vähendamiseks ja jahutuse parandamiseks lisati 6 läbivat auku. Varraste paigaldamise sooned on täielikult kooskõlas teoreetiliste andmetega.



Joonis 2.2. Rootori südamiku eestvaade (vasakul). Rootori südamiku perspektiivvaade koos vardadega ja lühisrõngastega (paremal).

Külgtoed on samuti prinditud printeriga ja neid kasutatakse mootori kõigi osade mehaaniliseks ühendamiseks. Toed pingutatakse 4 keermesvarda ja 8 mutriga. Sel viisil fikseeritakse staatori südamik rootori suhtes. Teoreetilistes arvutustes käsitleti mootorit, mille kõik parameetrid vastavad täpselt arvutatud väärtustele. Tegelikul prototüübil on mõned erinevused, mis võivad mõjutada mootori tööomadusi.

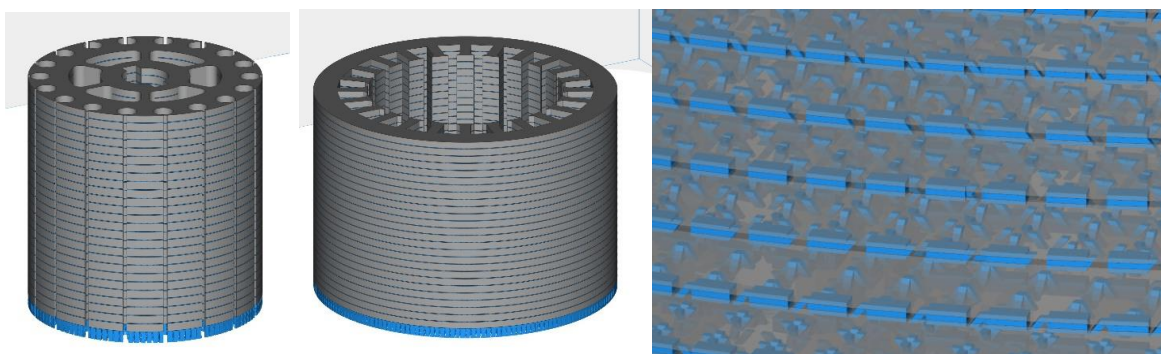
2.2 Laminatsiooni moodustamine

Enamiku mootorite staatori- ja rootorisüdamikud on moodustatud elektrotehnilise terase kihtide pakettidest. Pakett koosneb elektrotehnilise terase paksusega 0,2–0,5 mm. Teraslehtedest kihtidele kantakse tavaliselt kihtidevahelise elektritakistuse suurendamiseks, pöörivoolude vähendamiseks, korrosiooni- või roostekindluse suurendamiseks ning määrimiseks stantsimise ajal katteaine. Kasutatavad katteained on erinevad, orgaanilised ja anorgaanilised, ning olenevad teraslehe kasutusviisist. Valitud laminatsiooni tüüp sõltub teraslehe kuumtötlusviisist, sellest, kas valmistatud teraslehte kasutatakse õlikeskkonnas, ja käitatava seadme töötemperatuurist. Väga varases praktikas isoleeriti teraslehtedest kihte paberi või lakiga, kuid see vähendas virnastuskoefitsienti ja piiras maksimaalselt lubatud töötemperatuuri. [7]

Projekteerimise lihtsustamiseks laminatsioon üldmudelil ei arvestata. Mootori printimisel 3D-printeriga klassikaline laminatsioonimeetod ei sobi. Südamiku laminatsioon toimub kihtidega, mis ei ole terasega täielikult täidetud ja kuhu on jäetud kanalid. Nii jagatakse südamik terasest kihtideks, kuid need kihid ei ole üksteisest

isoleeritud, vaid on eraldustsoonides omavahel ühendatud väikeste kinnituspunktide ja tugede kaudu. Nendes eraldustsoonides on materjali ristlõikepindala väiksem ja seega takistus suurem.

See laminatsioonimeetod võimaldab vähendada Foucault' voolu (ehk pöörivoolud) nap ja parandada südameku jahutust. Teiselt poolt väheneb suure magnetjuhtivusega materjali osakaal, mis toob kaasa magnettakistuse suurenemise, mis omakorda mõjub halvasti mootori tööomadustele. Seega on vaja valida kihistamise ja magnetmaterjali optimaalne suhe.

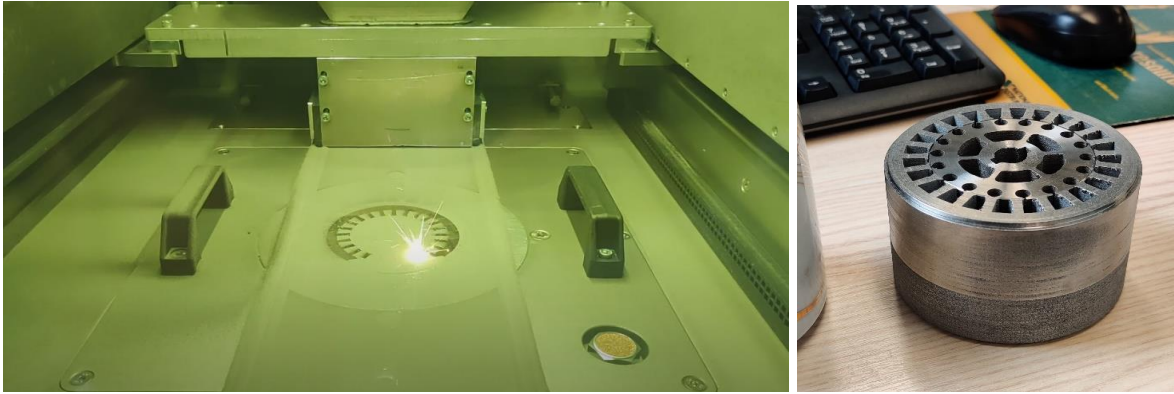


Joonis 2.3. Staatori ja rootori südameke laminatsiooni moodustamine.

2.3 3D-printeri parameetrid ja mudeli printimine

Mootori osade printimiseks kasutatakse ettevõtte SLM Solutions 3D-printerit, mudel SLM 280 2.0. Laseri võimsus on 700 W ja tööpiirkonna mõõdud on 280 mm × 280 mm × 365 mm. Printimiseks võib kasutada roostevaba terast, alumiiniumit, hõbedat, titaani ja ka raua, alumiiniumi, vase ja titaani sulameid. [8]

Printimine toimub mikrolasersulatustehnikaga. Väga õhuke metallitolmu kiht kantakse ühtlaselt tööpinnale, moodustades kihi. Seejärel hakkab laser materjali punktikaupa sulatama neis kohtades, kus see on antud kihi moodustamiseks vajalik. Kui kõik kihi tsoonid on laseriga töödeldud, kantakse peale järgmine tolmu kiht. Sel viisil moodustatakse õhukeste sulatatud metalli kihtide suurest hulgast valmistoode. See tehnika on üsna uus ega võimalda tagada printimise väga suurt täpsust, seetõttu on vaja toodet vajalike mõõtude tagamiseks hiljem töödelda.



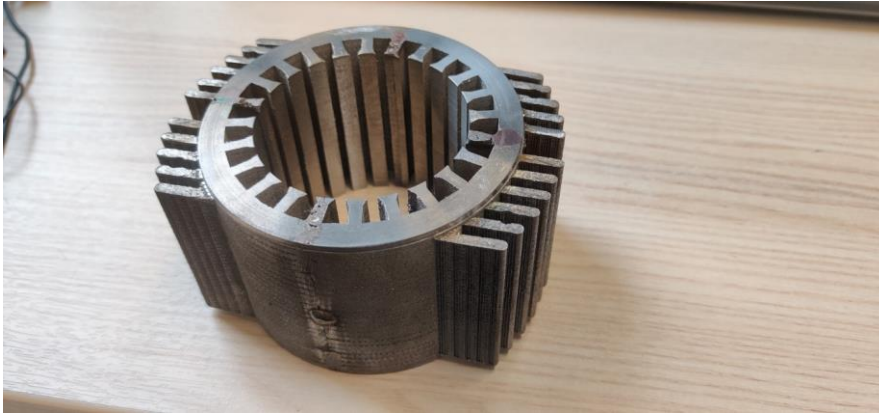
Joonis 2.4. Printimine (vasakul) ja prinditud osad (paremal).

Printimisel on vaja arvestada 3D-printeri seadistustega. Printimise kvaliteeti mõjutavad oluliselt sulatamise temperatuur ja aeg. Samuti võivad varieeruda materjalikihi paksus ja printimiskiirus. Kui terase kihilisus on liiga suur, väheneb toote jäikus, millega võivad kaasneda olulised defektid ja kasutuskõlbmatus. Staatori ja rootori südameke printimiseks määrati samad parameetrid.

Tabel 2.1. 3D-printeri printimisparameetrid. [5][8]

Parameeter	Väärtus
Laminatsiooni paksus, mm	0,20
Samm laminatsioonide vahel, mm	2
Laseri töövõimsus, W	250
Laseri liikumise kiirus, m/s	0,50
Kihi paksus, mm	0,050
Radade vahe, mm	0,12
Strateegia	malelaud
Atmosfäär	lämmastik
Eelkuumutus	ei

Alguses kavandati staator moodulitena koostamiseks jagada 4 identseks osaks. See oleks võimaldanud vähendada selle mõõte ja suurendada printimiskiirust. See lähenemisviis osutus ebatõhusaks. Pärast koostamist jäid staatori sektsioonide vahele märkimisväärsed õhuvahed. See suurendas oluliselt magnetakistust, mis mõjub halvasti mootori tööomadustele.



Joonis 2.5. Nelja sektsioonist koosnev mootori staator.

Probleeme esines ka suure pinnaga osade printimisel – isegi väikestele kehadele ideaalselt sobivate printeri sätete korral. Selle probleemi lahendamiseks muudeti keha orientatsiooni. Sel viisil vähendati kihtide pindala. Samuti muudeti printimisviisi. Tõhusamaks osutus printimine malelaua mustri järgi, jooni mööda printimisel oli kvaliteet kehvem. [5]



Joonis 2.6. Defektid printimisel.

2.4 Lõõmutamine ja töötlemine pärast printimist

Pärast printimist tuleb osad töödelda õigestesse mõõtudesse kohtades, mis võivad mõjutada mootori tööomadusi. Printimine hõlmab metallitolmu kuumtöötlust. Sellise detaili moodustamise viisiga kaasnevad selle sisepinged ja materjali heterogeensus, mis mõjuvad halvasti mootori tööomadustele. Kõigepealt on pärast printimist vaja detaili kõrgnoolutada. Kõrgnoolutamine hõlmab kuumutamist temperatuurini hõlmab kuumutamist temperatuurini 350–650 °C, hoidmist sellel temperatuuril ja jahutamist. See toiming kõrvaldab metalli sisepinged ja väldib deformatsiooni metalli töötlemise ajal. Noolutati temperatuuril 600 °C 1 tund. Jahutati vaakumis (0,10–0,20 mbar) ahjus 2 tundi. Jahutuskiirus oli 300 °C/h. [5]



Joonis 2.7. Ahi osade lõõmutamiseks ja noolutamiseks.

Staatori südamiku siseläbimõõt peab olema täpne, vastasel juhul jaotub magnetväli ebaühtlaselt. Samuti võib rootori südamik puutuda vastu staatori südamikku, tekitades mootorile tõsiseid kahjustusi. Siseläbimõõt oli valitud varuga, seetõttu lõigati täpsuse suurendamiseks staatori südamiku siseläbimõõt õigeks treipingis. Rootori südamikku tuleb samuti töödelda treipingis.

Südamiku välispinda on vaja töödelda, et tagada ühtlane magnetväli ning vähendada staatori ja rootori südamiku vahelise haakumise ohtu. Rootori südamiku välisläbimõõd treiti arvutatud väärtuseni. Mõlema südamiku otsi töödeldi nende paremaks ühendamiseks tugelega. Vibratsiooni vähendamiseks ja magnetväljade ühtlaseks jaotumiseks kontrolliti staatori ja rootori tsentreeritust. Pärast töötlemist oli staatori ja rootori vaheline õhuvahe 0,30–0,35 mm.



Joonis 2.8. Staatori südamiku soonte töötlus (vasakul) ja rootori töödeldud südamik (paremal).

Rootori võll ja südamiku siseläbimõõt tuleb valida nii, et võll istuks südamikku tihedalt. Selleks freesitakse ka võll ja istutusava sobivasse mõõtu. Samuti peavad võll ja külgoed olema laagrite tihedaks istutamiseks sobiva läbimõõduga. Oli valitud roostevaba kuullaagrid kummikatetega S6200-2RS. Laagri siseläbimõõt on 10,00 mm välisläbimõõt on 30,00 mm ja paksus on 9,00 mm. [9]

Rootori vardad on valmistatud vasest ja nende läbimõõt on 4,00 mm. Otsustati osta standardläbimõõduga valmisvardad. Varrastel pole isolatsiooni. Peamine põhjus, miks varraste ja lühisrõngaste printimisest otsustati loobuda, seisnes selles, et seda tüüpi printerid ei ole selleks päris sobivad. Puhtal vasel on laseri infrapunalainepikkusel väike neeldumine. Printimiseks sobib rohkem roheline laser või elektronkiiresulatus. [10]

Lühisrõngad on samuti valmistatud vasest. Nende valmistamiseks kasutati 4,00 mm paksust vasklehte. Lühisrõngaste teoreetiline paksus oli 4,70 mm. Selline lühisrõnga ristlõikepindala vähendamine ei ole kriitiline ja on prototüübi valmistamisel lubatav. Rõngad ja nende augud valmistati freesimisega.

Kasutades printimist ainult südameke valmistamiseks ja valmistades rootori- ja staatorimähised kaubanduslikust materjalist, on prinditud masinat kaubandusliku masinaga lihtsam võrrelda. Siis saab määrata, kuidas prinditud mootori üks või teine defekt selle töomadusi mõjutab. Kui kasutada alumiiniumit, on takistus suurem kui vase korral, seetõttu otsustati sellest ideest loobuda.



Joonis 2.9. Lühisrõngaste valmistamine (vasakul). Varraste ja lühisrõnga printimise katse (paremal).

2.5 Valminud osade lõõmutamine

Kasutatav teras peab olema suure magnetilise läbitavusega ja töötamisel vahelduvas magnetväljas peavad ümbermagneetumise kaod olema väikesed. Hüsteresist tingitud väikeseid kadusid iseloomustab kitsas, väikese pindalaga hüsteresisisilmus. Elektrotehniline teras sisaldab magnetiliselt anisotroopseid kristalle. See on erinevates kristallograafilistes suundades erinevalt magnetiseeritav, mis mõjutab oluliselt terase magnetomadusi. Elektrotehnilise terase mehaanilisel töötlemisel halvenevad selle elektromagnetilised omadused oluliselt ja suurenevad hüsteresist tingitud kaod. Elektrotehnilise terase magnetomaduste parandamiseks terast lõõmutatakse. Elektrotehnilise terase lõõmutamise rakendamise peamised eelised:

- sisepingete vähenemine,
- ümberkristallimine ja kristallimõõtude suurenemine,
- magnetilise läbitavuse suurenemine,
- koertsitiivjõu vähenemine.

Staatori ja rootori südamike töomaduste parandamiseks südamikke lõõmutati temperatuuril 1200 °C 1 tund. Jahutati vaakumis (0,10–0,20 mbar) ahjus 4 tundi. Jahutuskiirus oli 300 °C/h. Staatori ja rootori südamikke lõõmutati eraldi.



Joonis 2.10. Rootori südamiku lõõmutamise ettevalmistamine (vasakul), lõõmutusseade (paremal).

Printimiseks kasutati 3,7% ränisisaldusega elektrotehnilist terast mis on magnetiliselt pehme, seega sobib see hästi kasutamiseks elektrimasinates. Lõõmutamata materjali magnetiline läbitavus on oluliselt väiksem, mis mõjub halvasti masina töomadustele. Mõõdeti lõõmutamise mõju printimisel kasutatavale terasele. Lisast 6 on näha, et lõõmutamata materjalide hüstereesisilmus on palju suurem kui lõõmutamisel 800 °C juures ja hüstereesikaod on minimaalsed lõõmutamisel 1200 °C juures. [11]

2.6 Prototüübi koostamine

Pärast kõigi osade printimist ja töötlust toimub toote lõppkooste. Staatori mähiseid on mudelis kujutatud skemaatiliselt. Need mähitakse käsitsi ja nende üksikasjalik mudeldamine pole vajalik. Juhina kasutatakse isoleeritud vaskjuhi ristlõikepindalaga 1,00 mm². Mähiste mähkimine toimub teoreetilise osa skeemi järgi.

Laagrid pressitakse külgtugesse ning valitakse võlli ja külgtugede avade läbimõõdu alusel. Võlli läbimõõt on 10,00 mm ja külgtugede avade läbimõõt on 30,00 mm. Võll on valmistatud terasest freesimisega. Võll sobitatakse rootori südamiku mõõtudega ja ühendatakse sellega pressimise teel.

Vardad sisestatakse südamikku ja lühisrõngad pressitakse varrastele. Lühisrõngad on surutud vastu rootori südamikku. Seda tehakse varraste liikumise vältimiseks südamikus. Külgtued asetatakse staatori südamiku otstele ja tõmmatakse kokku keermesvarraste ja mutritega. Staatori mähiste otsad tuuakse toitega ühendamiseks välja. Mähiste otsad võib lülitada nii täht- kui ka kolmnurkühendusse.



Joonis 2.11. Rootori südamik koos lühisrõngaste, varraste, võlli, laagrite ja jahutuslabadega.

2.7 Südamike magnetvälja simulatsioon

2.7.1 Simulatsiooni parameetrid

Magnetvälja simulatsioon võimaldab analüüsida südamike eri tsoonide teoreetilisi arvutusi. Simulatsiooniks kasutatakse programmi FEMM 4.2. See võimaldab lihtsalt simuleerida magnetvälja jaotust, lähtudes juhtide voolust ja keskkonna materjalide parameetritest. Programm simuleerib magnetvälja igal konkreetsetel ajahetkel. Iga faasi magnetvälja arvestatakse eraldi. Iga faasi korral antakse ette vool, selle suund valitud ajahetkel ja keerdude arv igas soones. Kõigepealt on vaja arvutada staatori mähisvoolude hetkelised amplituudväärtused:

$$i_{L1.m} = \sqrt{2} \cdot I_{n.s} \cdot \sin(\varphi_t + 0) \quad (2.1)$$

$$i_{L2.m} = \sqrt{2} \cdot I_{n.s} \cdot \sin(\varphi_t + 120) \quad (2.2)$$

$$i_{L3.m} = \sqrt{2} \cdot I_{n.s} \cdot \sin(\varphi_t + 240) \quad (2.3)$$

$$t = \frac{60}{n_s} \cdot \frac{\varphi_{t.m}}{360} \quad (2.4)$$

$$\varphi_{t.m} = \frac{\varphi_t}{p} \quad (2.5)$$

kus $i_{L1.m}$ – 1 faasi mähisvoolu hetkeline amplituudväärtus, A,
 $i_{L2.m}$ – 2 faasi mähisvoolu hetkeline amplituudväärtus, A,
 $i_{L3.m}$ – 3 faasi mähisvoolu hetkeline amplituudväärtus, A,
 t – aeg, s,
 φ_t – nurk ajal t , °,
 $\varphi_{t.m}$ – staatori magnetvälja nurk ajal t , °.

Staatori magnetvälja 360° võrra pöörlemise aeg on 40 ms. Vaadeldakse ajahetki, mil staatori magnetvälja on pöördunud 0,00°, 7,50°, 15,00°, 22,50°, 30,00° 37,50°, 45,00°, 52,50°, 60,00°, 67,50°, 75,00°, 82,50° ja 90,00° võrra. Rootori varraste voolu arvesse ei võeta.

Tabel 2.2. Staatori faasivoolud erinevatel ajahetkedel.

Nurk, φ_{t_i} , °	Nurk, $\varphi_{t.m_i}$, °	Aeg, t , ms	Vool i_{L1} , A	Vool i_{L2} , A	Vool i_{L3} , A
0	0,00	0,00	0,00	4,71	-4,71
15	7,50	0,83	1,41	3,84	-5,25
30	15,00	1,67	2,72	2,72	-5,44
45	22,50	2,50	3,84	1,41	-5,25
60	30,00	3,33	4,71	0,00	-4,71
75	37,50	4,17	5,25	-1,41	-3,84
90	45,00	5,00	5,44	-2,72	-2,72
105	52,50	5,83	5,25	-3,84	-1,41
120	60,00	6,67	4,71	-4,71	0,00
135	67,50	7,50	3,84	-5,25	1,41
150	75,00	8,33	2,72	-5,44	2,72
165	82,50	9,17	1,41	-5,25	3,84
180	90,00	10,00	0,00	-4,71	4,71

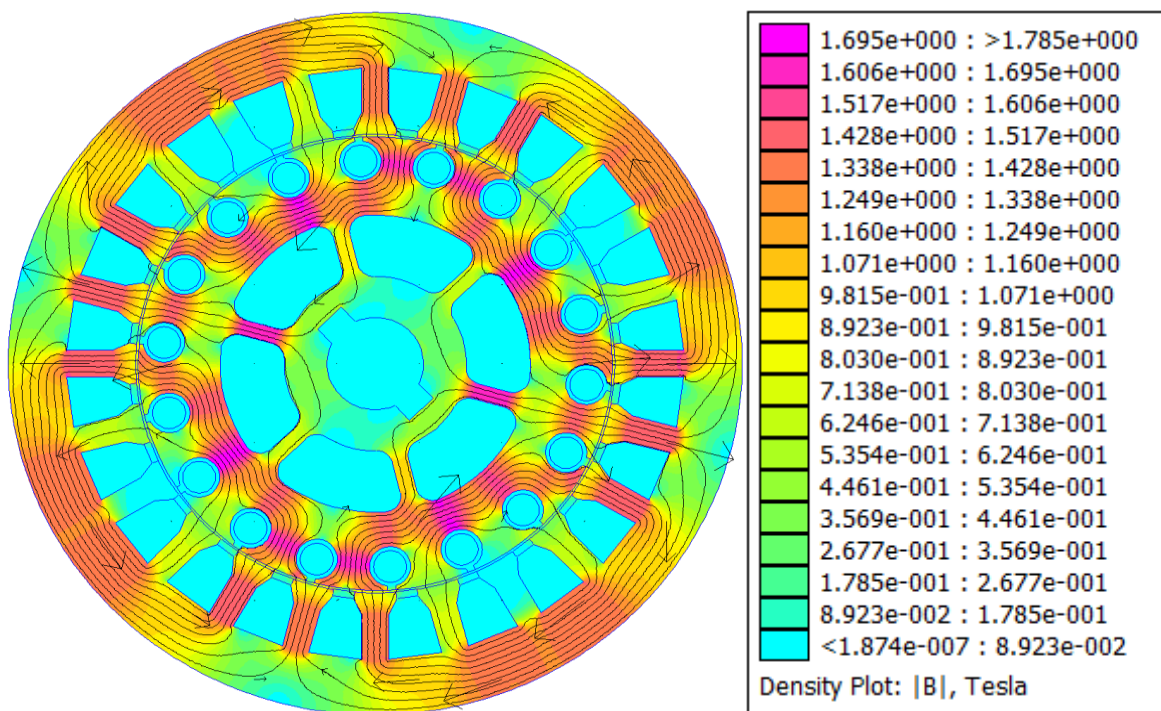
Voolu hetkeliste arvutatud väärtuste põhjal simuleeritakse staatori mähistega tekitatud magnetväli. Lühisrootori magnetvälja selles simulatsioonis arvesse ei võeta. Juhi materjalina kasutatakse vaske juhtivusega 58 MS/m. Võll on valmistatud roostevabast terasest. Kõik tühikud on täidetud õhuga.

Südamike materjaliks on valitud 3,7% ränisisaldusega elektrotehniline teras. Magnetvälja tugevuse induksioonist mittelineaarse sõltuvuse karakteristikud on ette antud käsitsi graafiku põhjal lisas 6. Sama faasi mähised on jadaühenduses ja rühmitatud hammaste kaupa, et säilitada pooluste asend.

2.7.2 Simulatsiooni tulemused

Joonistelt 2.12 on näha, et magnetvälja tugevus õhuvahes on vahemikus 0,6 kuni 0,9 T. See vahemik on suurem kui projekteerimise käigus valitud teoreetiline väärtus. Seda tulemust võib seostada asjaoluga, et simulatsioonis kasutati voolude amplituud väärtused. Samuti võis simulatsiooni tulemust mõjutada südamiku materjal ja väiksem magnetiline takistus. Magnetinduktsiooni vektorite suunad vastavad teoreetilistele suundadele ja muutuvad voolu liikumissuuna muutumisel.

Magnetvälja tugevus staatori hammastes on vahemikus 0,90 kuni 1,20 T ja rootori hammastes on vahemikus 1,00 kuni 1,30 T. Magnetvälja tugevus staatori ikkes on vahemikus 1,20 kuni 1,50 T ja rootori ikkes on vahemikus 1,30 kuni 1,60 T. Sellised väärtused on natuke vähem võrreldes teoreetiliste arvuga. Mootori mudelit on kujutatud skemaatiliselt. Simulatsioonis ei võeta arvesse voolu rootori varrastes. Seega on magnetväli staatori ja rootori ikkes ja hammastes on lähedal teoreetilisele. Teised simulatsiooni tulemused on lisas 8.



Joonis 2.12. Magnetväljade jaotus asendis 0° voolude amplituudväärtuste korral.

3. MOOTORI KATSETAMINE

Viimases osas prinditud mootori tööd katsetakse. Katseandmed on vajalikud prototüübi toimimise analüüsimiseks, tegelike parameetrite määramiseks ja võrdlemiseks teoreetiliste andmetega. Katsed viiakse läbi Tallinna Tehnikaülikooli laboris.

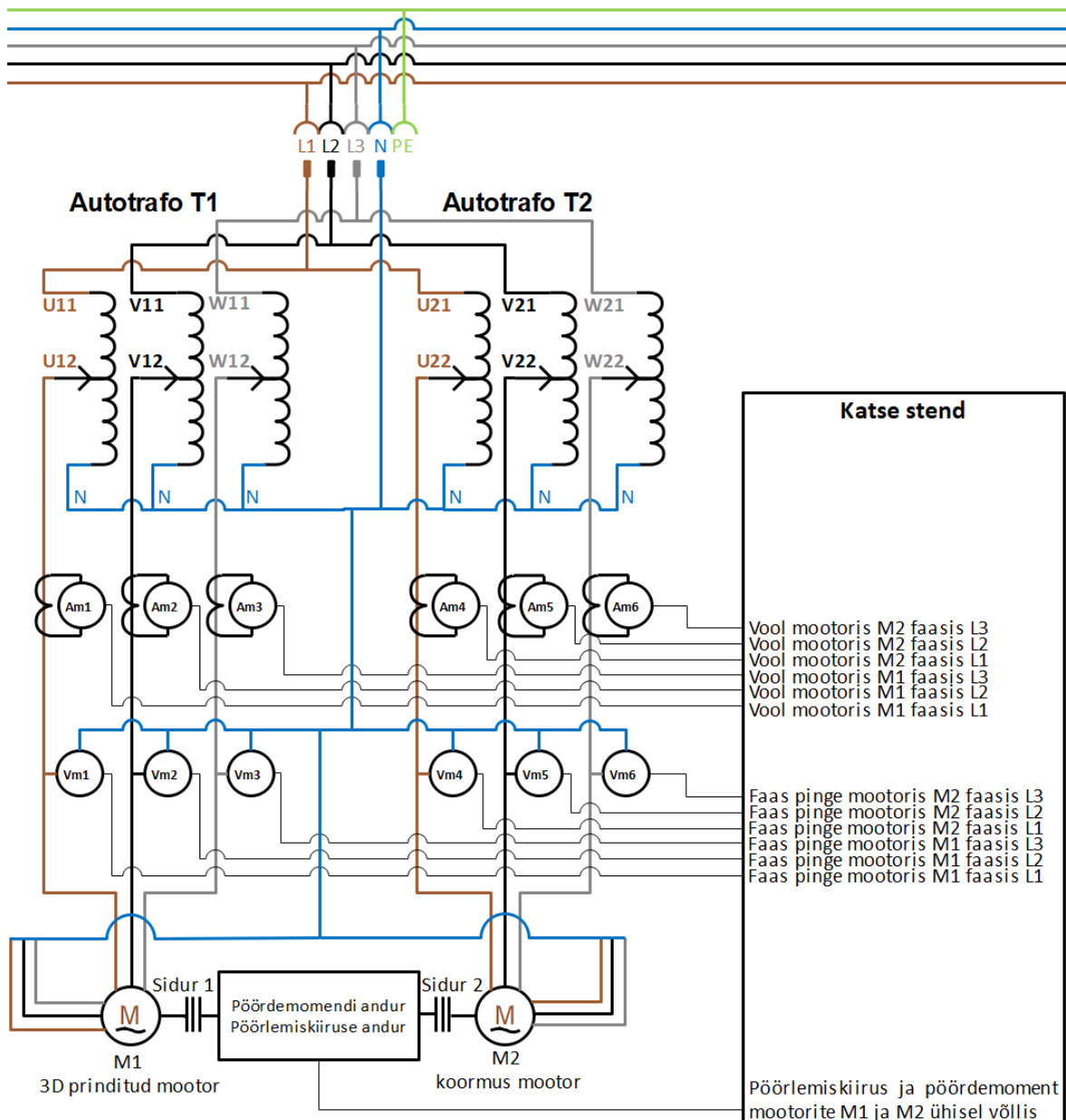
Katsete käigus määratakse mootori parameetrite väärtused töötamisel nii tühikäigul kui ka koormusega. Koormusena kasutatakse teist tehases valmistatud asünkroonmootorit. Mootor valitakse teoreetiliselt arvutatud nimipöördemomendi järgi.

3.1. Katsetingimused

Katsetamisel on vaja määrata prinditud mootori ja koormusmootori faaside volud, pinged ja nendevahelised nurgad. Lähtudes nendest väärtustest saab määrata aktiiv-, reaktiiv- ja koguvõimsuse, samuti võimsuskoefitsiendi.

Samuti tuleb mõõta pöörlemiskiirust ja pöördemomenti. Need mehaanilised parameetrid on mõlemal mootoril ühised, kuna nende võllid on ühendatud. Katsemiseks valmistati stand, mis koosneb järgmistest komponentidest:

- kaks autotrafot,
- kuus voolumõõtetangide paari,
- kuus kaablit mootorite faasipingete mõõtmiseks,
- kaks siduri,
- võlli pöörlemiskiiruse ja pöördemomendi mõõtmise andur,
- koormusmootor,
- prinditud mootor,
- andmete kogumise stand,
- juhtmed komponentide omavaheliseks ühendamiseks,
- alumiiniumprofiilid ja muud kinnituselemendid.



Joonis 3.1. Mootori katseskeem.

Autotrafod T1 ja T2 on ette nähtud mootorite faasipingete reguleerimiseks. Mõlemad autotrafod on identsed ja tagavad mootori faasipingete reguleerimisvõimaluse. Reguleerimisvahemik on toitevõrgu 230 V faasipinge korral 0–255 V. Mootorite pinget reguleeritakse eraldi.

Faaside voolutugevusi mõõdetakse voolumõõtetangidega. Nende tähised skeemil on Am1–6. Voolu mõõtmine voolumõõtetangidega toimub katsejaamas, kuhu on ühendatud kõik mõõteriistad. Faasipinget mõõdetakse autotrafo väljaviigu klemmi ja katsejaama vahel. Jaamas mõõdetakse faasi ja neutraali vahelist pinget, mille tähis skeemil on Vm1–6.

Prinditud mootori võlli ja mehaaniliste parameetrite mõõteanduri ühendamiseks kasutatakse siduri 1 ning koormusmootori ja mehaaniliste parameetrite mõõteanduri ühendamiseks siduri 2. Mõlemad sidurid on samuti prinditud 3D-printeriga. Sidurid on võllidega ühendatud pinguga ja ühenduskindluse suurendamiseks ning võlli läbilisemise vältimiseks kiiludega.

Võlli pöörlemiskiiruse ja pöördemomendi mõõtmiseks kasutatakse ettevõtte NCTE andurit S-4000-50-1. Maksimaalne pöörlemiskiirus on 10 000 p/min ja nimipöördemoment on 50 Nm. Mõõteviga on 0,1%. [12]

Andmete kogumise stend koondab kõigi andurite teabe ja võimaldab jälgida nende näitusid erinevates töörežiimides. Sellega on ühendatud võlli pöörlemiskiiruse ja pöördemomendi andur, samuti mootori faasivoolude ja -pingete mõõtmise kaablid. Koormusmootoriks on valitud ettevõtte Felandia mudel MS 561-4 B34. Mootori parameetrid on esitatud tabelis 3.1. [13]

Tabel 3.1. Koormusmootori parameetrid. [13]

Parameeter	Sümbol	Väärtus
Nimipinge, V	$U_{n.load}$	230/400
Nimipöörlemiskiirus, p/min	$n_{n.load}$	1400
Nimisagedus, Hz	$f_{n.load}$	50
Nimivõimsus, W	$P_{n.load}$	60
Nimipöördemoment, Nm	M_{load}	0,41
Võimsustegur	$\cos \varphi_{n.load}$	0,55
Kasutegur (koormus 50%), %	$\eta_{load.50\%}$	52,80
Kasutegur (koormus 75%), %	$\eta_{load.75\%}$	47,70
Kasutegur (koormus 100%), %	$\eta_{load.100\%}$	38,70

3.2 Katsetulemused

3.2.1 Töö tühijooksul

Töötamine tühijooksul tähendab, et asünkroonmootori rootor pöörleb tühijooksul staatorivälja sagedusega sünkroonselt samas suunas, nii et libistus on null. Reaalses masinas ei saa aga rootori tühijooksu pöörlemiskiirus kunagi staatorivälja pöörlemiskiirusega võrduda, kuna sel juhul magnetvälja lõikumine rootori mähise juhtidega lakkab ja neis ei indutseerita elektrivoolu. Asünkroonmootori töötamisel

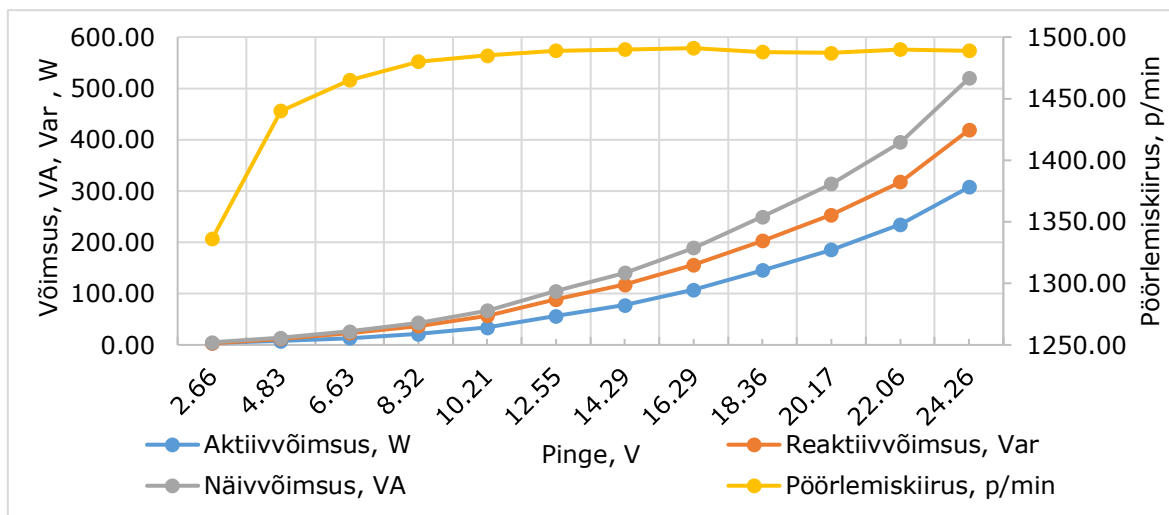
tühijooksul toimuvad samad elektromagnetilised protsessid, mis trafos. Staatori mähist läbib tühijooksuvool, kuid selle väärtus asünkroonmootoris on rootori ja staatori vahelise õhuvahe tõttu palju suurem kui trafos. Nagu ka trafo korral, on tühijooksuvoolul reaktiiv- ja aktiivkomponent. Tühijooksuvoolu reaktiivkomponent tagab mootoris vajaliku magnetvoo ja aktiivkomponent tagab energia ülekande vooluvõrgust staatori mähisele, mis on vajalik masina võimsuskadude kompenseerimiseks selles režiimis.

Teoreetilisest osast on teada, et prinditud mootori nimipinge on 24 V. Katsestend võimaldab pinget sujuvalt reguleerida, mis võimaldab hinnata tühijooksu parameetrite väärtusi pingevahemikus 0 kuni 24 V. Võrdluseks katsetakse ka koormusmootorit pingevahemikus 0 kuni 255 V. Prinditud mootoril mõõdetakse sammuga umbes 2 V ja koormusmootoril sammuga 20 V. Katsestendi tarkvara arvutab automaatselt kõigi faaside aktiiv-, reaktiiv- ja koguvõimsused ning võimsuskoefitsiendi. Kõik katsed viidi läbi prinditud mootori mähise temperatuurivahemikus 45 °C kuni 70 °C.

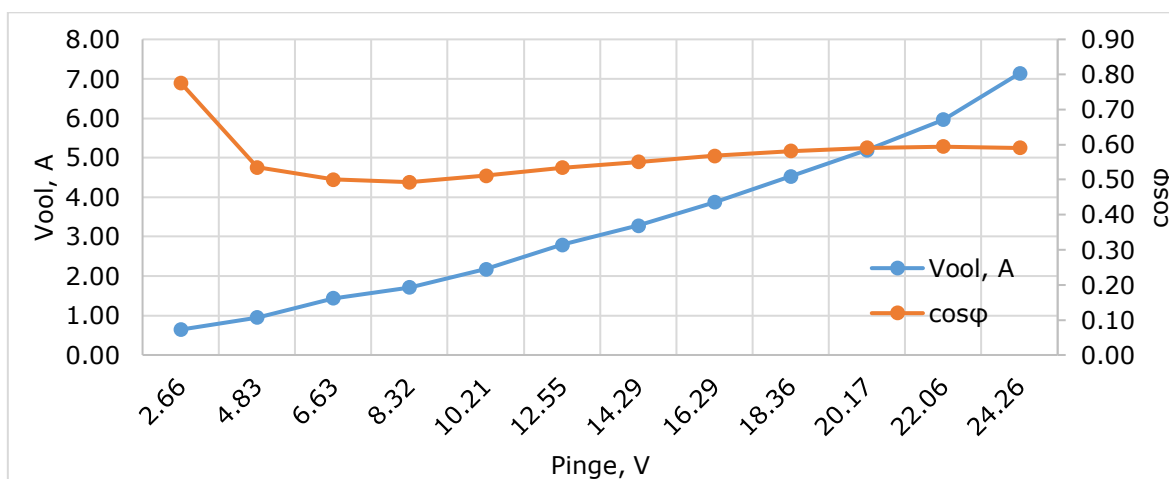
Prinditud mootori rootori nimipöörlemiskiirus saavutatakse pingel 6,60 V ja võimsuskoefitsient on 0,50. Pinge edasisel suurendamisel suureneb võimsuskoefitsient järk-järgult väärtuseni 0,60. Kui võrrelda võimsuskoefitsiendi seda näitu koormusmootoriga, siis seal on aktiivvõimsustarve palju väiksem. Selle põhjus on asjaolu, et prinditud mootoris on mähisvoolude väärtused palju suuremad, mis tähendab, et ka soojuskadod on palju suuremad. See suurendab võimsuskoefitsiendi väärtust ja aktiivvõimsuse tarbimist ning vähendab kasutegurist. Samuti on prinditud mootoris pöörivoolud palju suuremad kui koormusmootoris.

Pingel 16 V olid parameetrite väärtused teoreetilistele kõige lähemal. Tühijooksukatse võimaldab määrata magneetimisvoolu väärtuse. Antud pinge korral on magneetimisvool ligikaudu 3,10 A ja selle teoreetiline väärtus on 2,94 A. Prinditud mootori tarbitav aktiivvõimsus on ligikaudu 100 W, mis vastab teoreetilisele nimivõimsusele. Voolutarve on 3,85 A, mis langeb samuti kokku teoreetilise nimiväärtusega.

Pingel 24 V on mootori parameetrid nimiväärtustest oluliselt suuremad. Selle pinge korral on magneetimisvool ligikaudu 5,75 A, mis on teoreetilisest väärtusest peaaegu 2 korda suurem. Aktiivvõimsus on ligikaudu 300 W ja voolutarve 7,15 A. Teooriast on teada, et optimaalne voolutihedus staatori mähistes ei tohi olla suurem kui 5,00 A/mm². Pikaajaline töö voolutugevusega 7,15 A on seetõttu ebasoovitav ja võib mähiseid kahjustada. Selles režiimis on lubatud ainult lühiajaline töö.



Joonis 3.2. Prinditud mootori tühijooksukatse tulemused.



Joonis 3.3. Prinditud mootori tühijooksukatse tulemused.

3.2.2 Käivitusmomendi määramine

Käivitusmoment on pöördemoment mootori võllil hetkel, kui libistus on 1 ja rootori pöörlemiskiirus on 0 p/min. Käivitusmomendi määramiseks on vaja kinnitada mootori võll ja anda staatori mähistele nimipinget. Antud katsed võimaldavad määrata mitte ainult käivitusmomenti, vaid ka rootori takistust. Sellises töörežiimis on käivitusvool staatori mähistes mitu korda suurem kui nimivool. Staatori magnetvälja ja rootori mähiste ristumissagedus on võrdne staatori magnetvälja pöörlemissagedusega, mis samuti indutseerib rootori mähistes olulisi voolusid. Nendel põhjustel tuleks katse kestus minimeerida (mitte rohkem kui 3 sekundit). Katsed viidi läbi pingetel 16 V ja 24 V. Rotori võll oli kinnitatud 2 siduri kinnituspunkti. See oli vajalik käivitusmomendi määramiseks anduri abil. Mõlema pinget puhul viidi läbi 3 katset ja keskmised väärtused on toodud tabelis 3.2.

Tabel 3.2. Katsetulemused käivitusmomendi määramiseks.

$U_{k.exp}, V$	$I_{k.exp}, A$	$Q_{k.exp}, Var$	$P_{k.exp}, W$	$M_{k.exp}, Nm$	λ_k
16,02	11,57	242,07	499,80	0,92	1,40
24,04	17,28	515,93	1132,38	2,55	3,89

Teoreetilise nimipöördemomendi ja käivitusmomendi suhe 16 V pingel korral on 1,40 ja 24 V pingel korral ligikaudu 3,89. Nende andmete põhjal võib järeldada, et 24 V pingel on mootori normaalseks tööks liiga kõrge. Tavaliselt on käivitusmomendi ja nimipöördemomendi suhe vahemikus 1,2 kuni 2,5.

3.2.3 Takistuste määramine tühijooksu andmete järgi

Teoreetilises osas arvutati välja staatori ja lühisrootori mähiste aktiiv- ja reaktiivtakistuste väärtused. Need väärtused saadi ideaalsete tingimuste korral – parameetrite tegelikud väärtused võivad teoreetilistest oluliselt erineda. Eksperimentaalsete andmete põhjal on võimalik määrata mootori faasi aktiiv- ja reaktiivtakistus järgmiste valemitega:

$$R_{1.exp} + R_{12.exp}' = \cos \varphi_{exp} \cdot \frac{U_{exp}}{I_{exp}} \quad (3.1)$$

$$X_{eq.tühi} = \sin \varphi_{exp} \cdot \frac{U_{exp}}{I_{exp}} \quad (3.2)$$

- kus
- $R_{1.exp}$ – staatori mähise mõõdetud aktiivtakistus, Ω ,
 - $X_{1.exp}$ – staatori mähise mõõdetud reaktiivtakistus, Ω ,
 - $R_{12.exp}'$ – teraseskaoda mõõdetud suhteline aktiivtakistus, Ω ,
 - $X_{eq.tühi}$ – ekvivalentne reaktiivtakistus tühijooksukatse järgi, Ω ,
 - U_{exp} – mõõdetud faasipinge, V,
 - I_{exp} – mõõdetud faasivool, A,
 - φ_{exp} – mõõdetud võimsuskoeffitsient.

Faasi aktiivtakistus on staatori mähiste takistustest. Need takistused jäävad konstantseks olenemata koormusest ja sagedusest. Takistuse muutumise võib põhjustada temperatuurimuutus. Faasitakistuste mõõtmiseks kasutati ettevõtte Keithley multimeetrit 2100 6 1/2-Digit Resolution Digital Multimeter. Selle mõõtmistäpsus on $\pm 0,015 \Omega$. [14]

Mähisjuhi takistus ja läbimõõt on teada ning pikkuse saab arvutada järgmise valemiga:

$$L_{exp} = \frac{R_{1.exp} q_{ef.s}}{\rho_{V.CU}} \quad (3.3)$$

kus L_{exp} – staatori faasimähise juhi tegelik pikkus, m,

$R_{1.exp}$ – staatori mähise aktiivtakistus, Ω .

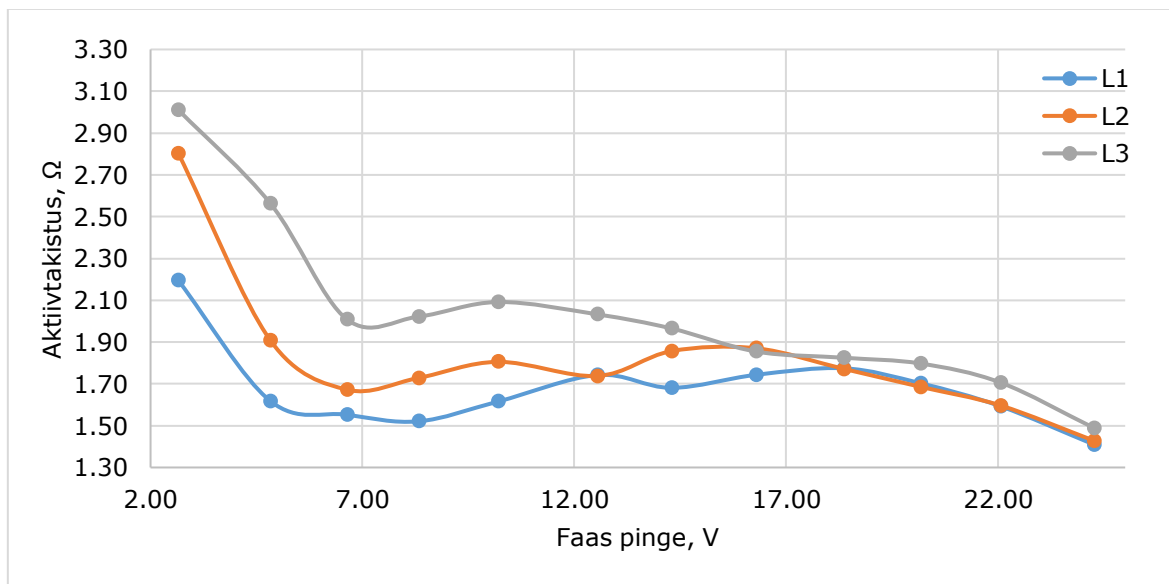
Tabel 3.3. Prinditud mootori faasimähiste aktiivtakistused.

Faas	$R_{1.exp}, \Omega$	$q_{ef.s}, \text{mm}^2$	$\rho_{V.CU}, \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	L_{exp}, m
L1	0,56	0,79	0,018	25,12
L2	0,55			24,85
L3	0,59			26,24

Staatori mähise juhi teoreetiline pikkus oli ligikaudu 33 m, tegelik väärtus on aga 25% võrra väiksem. Juhi lühema pikkuse korral vähenevad kaod staatori rõngastes, mis mõjub positiivselt mootori kasutegurile.

Tühijooksul on libisemine ligikaudu võrdne 0-ga, seega võib rootori aktiiv- ja reaktiivtakistusi ignoreerida. Rootori südamikute terases kadude takistuse saab leida järgmise valemiga:

$$R_{12.exp}' = \cos \varphi_{exp} \cdot \frac{U_{exp}}{I_{exp}} - R_{1.exp} \quad (3.4)$$



Joonis 3.4. Mootori faasimähiste aktiivtakistused.

Tabel 3.4. Prinditud mootori magnetumisahela mõõdetud suhtelised aktiivtakistused.

U_{exp}, V	$R_{12.exp.L1'}, \Omega$	$R_{12.exp.L2'}, \Omega$	$R_{12.exp.L3'}, \Omega$	$R_{12.exp.kesk'}, \Omega$
2,66	2,19	2,80	3,01	2,67
4,83	1,62	1,91	2,56	2,03
6,63	1,55	1,67	2,01	1,74
8,32	1,52	1,73	2,02	1,76
10,21	1,62	1,81	2,09	1,83
12,55	1,74	1,74	2,03	1,84
14,29	1,68	1,86	1,97	1,83
16,29	1,74	1,87	1,85	1,82
18,36	1,77	1,77	1,83	1,79
20,17	1,70	1,69	1,80	1,73
22,06	1,59	1,60	1,71	1,63
24,26	1,41	1,43	1,49	1,44

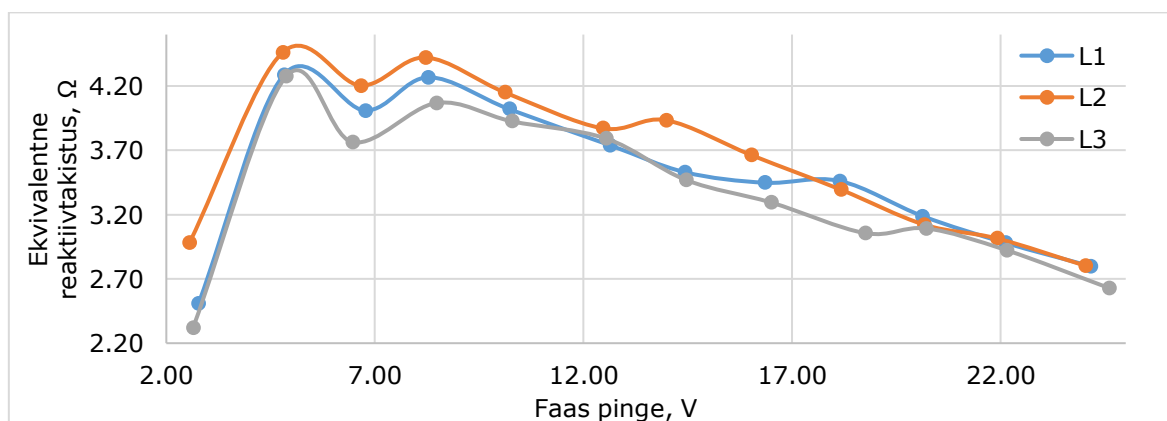
Töötamisel madalpingel on rootori pöörlemiskiirus nimikiirusest väiksem. Libistus on palju suurem kui selle nimiväärtus, mis mõjutab oluliselt rootori aktiivtakistust. Libistuse vähenemisel väheneb aktiivtakistus oluliselt. Tühijooksul koosneb reaktiivtakistus mähise takistusest ja magnetvoo takistusest. Nende väärtuste täpne määramine on võimatu. Teoriast on teada mähiste ja magnetvoo takistuse ligikaudne suhe:

$$X_{1.exp} = X_{eq.tühi} \cdot \frac{X_1'}{X_{12}'} \quad (3.5)$$

$$X_{12.exp}' = X_{eq.tühi}' \cdot \left(1 - \frac{X_1'}{X_{12}'}\right) \quad (3.6)$$

kus $X_{1.exp}$ – staatori mähise mõõdetud reaktiivtakistus, Ω ,
 $X_{12.exp}'$ – magnetumisahela mõõdetud suhteline reaktiivtakistus, Ω .

Teoriast on teada, et koormuse suurenemisel mähised küllastuvad ja mähiste reaktiivtakistus väheneb. Samuti vähendab libistuse vähenemine staatori ja pöörleva rootori südramiku magnetväljade lõikumissagedust, mis vähendab magnetilist takistust.



Joonis 3.5. Mootori faasimähiste reaktiivtakistused.

Tabel 3.5. Prinditud mootori ekvivalentseid reaktiivtakistused tühijooksukatse jargi.

U_{exp}, V	$X_{1.expL1}, \Omega$	$X_{1.expL2}, \Omega$	$X_{1.expL3}, \Omega$	$X_{12.expL1}, \Omega$	$X_{12.expL2}, \Omega$	$X_{12.expL3}, \Omega$
2,66	0,44	0,53	0,41	2,07	2,46	1,91
4,83	0,76	0,79	0,75	3,53	3,67	3,52
6,63	0,71	0,74	0,66	3,30	3,46	3,10
8,32	0,75	0,78	0,72	3,52	3,64	3,35
10,21	0,71	0,73	0,69	3,31	3,42	3,23
12,55	0,66	0,68	0,67	3,08	3,19	3,12
14,29	0,62	0,69	0,61	2,91	3,24	2,86
16,29	0,61	0,65	0,58	2,84	3,02	2,71
18,36	0,61	0,60	0,54	2,85	2,79	2,52
20,17	0,56	0,55	0,55	2,63	2,57	2,55
22,06	0,53	0,53	0,52	2,46	2,48	2,41
24,26	0,49	0,49	0,46	2,31	2,31	2,17

Kolmanda faasi reaktiivtakistus on väiksem kui esimesel ja teisel ning aktiivtakistus on suurem. Faasimähiste takistuste erinevus põhjustab mootori tasakaalustamata tööd. Faasidevahelised erinevused on lubatud piirides ja selliste erinevuste korral töötab mootor vastuvõetaval tasemel.

Mootori käivitamise hetkel on reaktiivtakistused väga erinevad. See on tingitud südameke heterogeensusest, mis on tingitud 3D-printimise eripäradest. Pinge kasvades küllastus suureneb ja libistus väheneb, mis toob kaasa erinevate faaside reaktiivtakistuste vaheliste erinevuste vähenemise.

3.2.4 Takistuste määramine käivitusmomenti andmete jargi

Rootori aktiiv- ja reaktiivtakistuse määramiseks on vaja kasutada maksimaalse- ja käivitusmomentide väärtusi. Käivitusmoment määrati katseliselt pingetele 16 V ja 24 V. Arvutatud käivitusmomenti väärtust võib saada valemiga [1]:

$$M_{exp.k} = \frac{m_1 \cdot p_1 \cdot R_{2.exp} \cdot U_{exp}^2}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot [(R_{1.exp} + R_{2.exp})^2 + (X_{1.exp} + X_{2.exp})^2]} \quad (3.7)$$

kus $M_{exp.k}$ – käivitusmoment, Nm.

Maksimaalse pöördemomendi korral töötab mootor kriitilises libisemispunktis. Katsete käigus ei saadud 24 V pinge korral maksimaalse pöördemomendi ja kriitilise libisemise täpset väärtust. Parameetreid ei saanud määrata trükitud mootori ja koormusmootori ebapiisava koormusvõimsuse ning ülekuumenemise tõttu.

Maksimaalse pöördemomendi arvatud väärtuse saab järgmise valemi abil [1]:

$$M_{exp.max} = \frac{m_1 \cdot p_1 \cdot U_{exp}^2}{4 \cdot \pi \cdot f_n \cdot \left[R_{1.exp} + \sqrt{R_{1.exp}^2 + (X_{1.exp} + X_{2.exp})^2} \right]} \quad (3.8)$$

kus $M_{exp.k}$ – maksimaalne pöördemoment, Nm.

Pinge 16 V korral oli maksimaalse pöörde- ja käivitusmomendi suhe ligikaudu 1,1. Andmete puudumise tõttu takistuste määramiseks arvutatakse maksimaalne pöördemoment kui [3]:

$$M_{exp.max} \approx 1,1 \cdot M_{exp.k} \quad (3.9)$$

Valemist 3.8 rootori sektsiooni suhtelise reaktiivtakistuse saab järgmise valemiga:

$$X_{2.exp}' = \sqrt{\left(\frac{m_1 \cdot p_1 \cdot U_{exp}^2}{4 \cdot \pi \cdot f_n \cdot M_{exp.max}} - R_{1.exp} \right)^2 - R_{1.exp}^2} - X_{1.exp} \quad (3.10)$$

kus $X_{2.exp}'$ – rootori sektsiooni suhteline reaktiivtakistus, Ω .

Saadud takistuste põhjal saab kriitilise libistusepunkti määrata järgmise valemiga [1]:

$$S_v = \frac{R_{2.exp}'}{\sqrt{R_{1.exp}^2 + (X_{1.exp} + X_{2.exp}')^2}} \quad (3.11)$$

kus S_v – kriitiline libistus.

Arvutustest on näha, et kriitiline libistus on ligikaudu 0,40. Libistuse järgneval suurenemisel hakkab pöördemoment vähenema, mis põhjustab mootori ümbermineku.

Tabel 3.6. Mootori parameetrite arvutuste tulemused.

Parameeter	Sümbol	Väärtus, 16 V	Väärtus, 24V
Kriitiline libistus	S_v	0,40	0,60
Maksimaalne pöördemoment, Nm	$M_{exp.max}$	1,00	2,77
Käivitusmoment, Nm	$M_{exp.k}$	0,92	2,55
Staatori mähise aktiivtakistus, Ω	$R_{1.exp}$	0,57	
Teraseskaoa suhteline aktiivtakistus, Ω	$R_{12.exp}'$	1,82	1,44
Rootori sektsiooni suhteline aktiivtakistus, Ω	$R_{2.exp}'$	0,75	0,85
Staatori mähise reaktiivtakistus, Ω	$X_{1.exp}$	0,61	0,48
Magneetumisahela suhteline reaktiivtakistus, Ω	$X_{12.exp}'$	2,86	2,26
Rootori sektsiooni suhteline reaktiivtakistus, Ω	$X_{2.exp}'$	1,18	0,82

3.2.5 Töötamine konstantse koormusega

Järgmise katserühmaga on võimalik määrata prinditud mootori parameetrite muutumine olenevalt konstantsest koormusest. Katsed rühmitati 6 katserühma. Peamine erinevus katserühmade vahel seisneb koormusmootori pinge erinevuses. Pinged olid katsete igas rühmas samad ja on esitatud tabelis 3.5.

Katse alguses käivitati koormusmootor. Seejärel käivitati prinditud mootor. Prinditud mootori mähiste algpinge kõigis katserühmades oli vähemalt 10 V. Algpinge valiti nii, et ühisevõlli pöörles prinditud mootori staatori magnetväljaga samas suunas. Pinget suurendati sammuga umbes 2 V kuni pingeni 24 V.

Tabel 3.7. Koormusmootori parameetrid erinevate koormustasemetel korral.

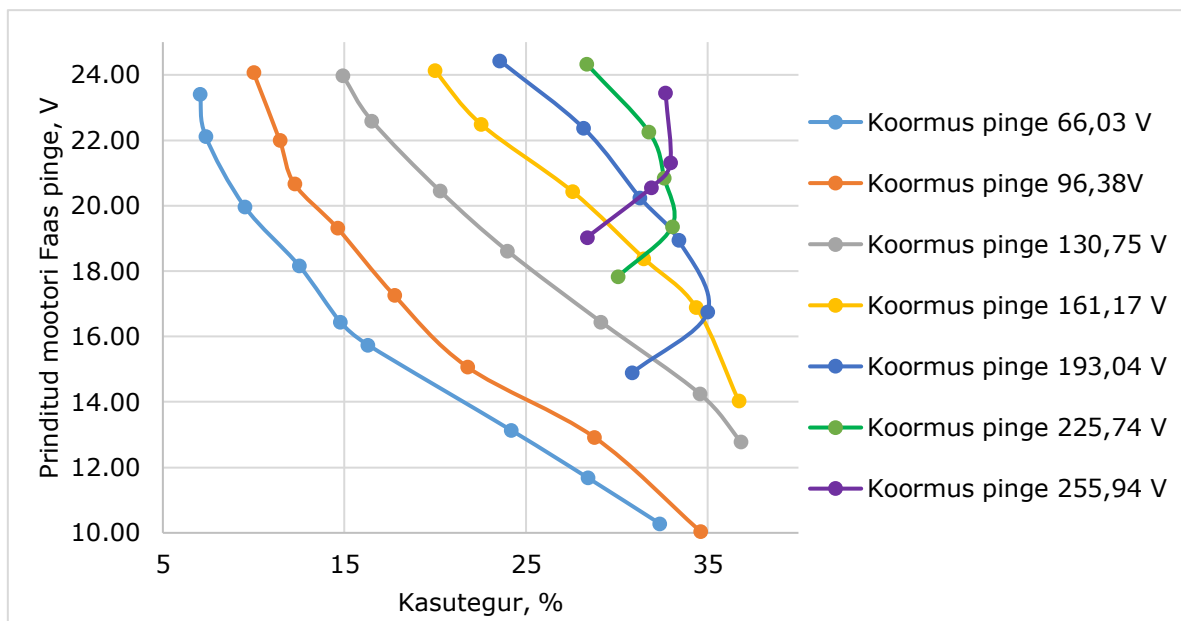
$P_{load.exp}$, W	$Q_{load.exp}$, Var	$S_{load.exp}$, VA	$I_{load.exp}$, A	$U_{load.exp}$, V	$\cos \varphi_{load.exp}$
33,96	31,19	46,16	0,23	66,03	0,73
79,20	65,95	103,18	0,36	96,38	0,77
142,21	103,65	176,27	0,45	130,75	0,81
242,70	169,12	296,03	0,61	161,17	0,82
309,08	187,96	362,30	0,63	193,04	0,85
496,15	301,69	581,01	0,85	225,74	0,85

Saadud andmete analüüsimiseks on vaja määrata mootori kasutegur. Antud juhul on kasutegur mootori võlli sooritatud kasuliku töö ja tarbitud aktiivvõimsuse suhe. Katseandmetest saab määrata prinditud mootori kasuteguri järgmiste valemitega:

$$\eta_{print.exp} = \frac{M_{exp} \cdot n_{exp} \cdot \pi \cdot 2}{60 \cdot P_{print.exp}} \cdot 100 \quad (3.5)$$

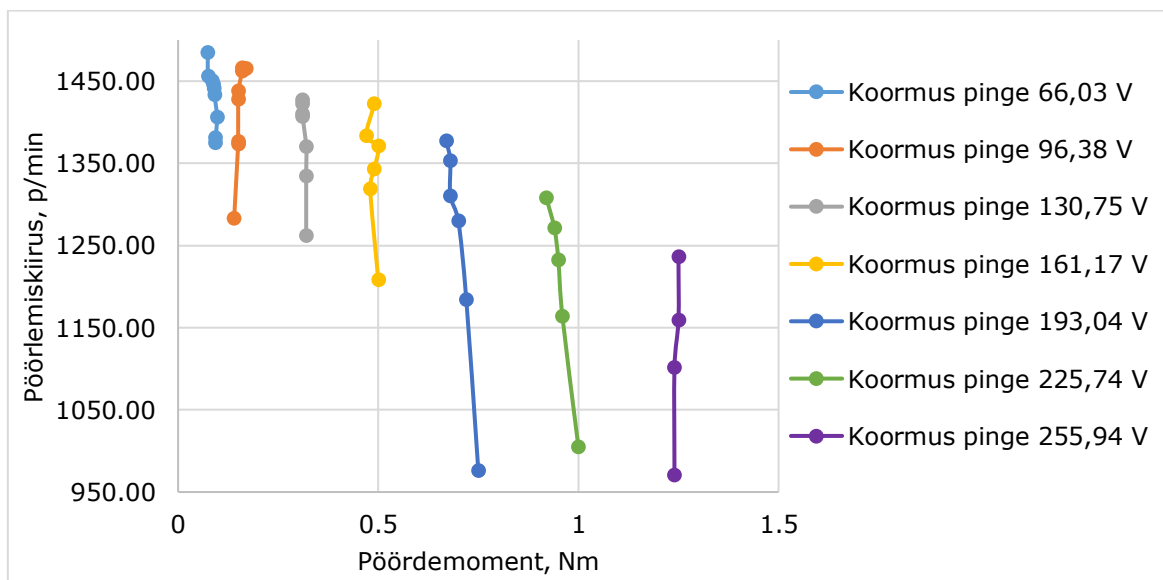
- kus
- M_{exp} – mootorite ühisevõlli pöördemoment, Nm,
 - n_{exp} – mootorite ühisevõlli pöörlemiskiirus, p/min,
 - $\eta_{print.exp}$ – prinditud mootori kasutegur, %,
 - $P_{print.exp}$ – prinditud mootori aktiivvõimsus, W.

Katse andmetest on näha, et suurim kasutegur 16 V pingel all töötamisel saavutatakse 161,17 V koormuspingel ja 24 V töötamisel koormuspingel 255,94 V. Koormuspingel vahemikus 161,17 V kuni 66,03 V on prinditud mootor alakoormatud, seega on efektiivsusnäitajad üsna madalad. Sellised madalad kasutegurid on seotud staatori ja rootori südamikas aktiivvõimsuse märkimisväärse kadumisega. Prinditud mootori optimaalseks tööpingeks on 16 V. Töötades 24 V juures on mootor alakoormatud, samuti tekib ülekuumenemine, mis ei võimalda sellises režiimis pikemat aega töötada.



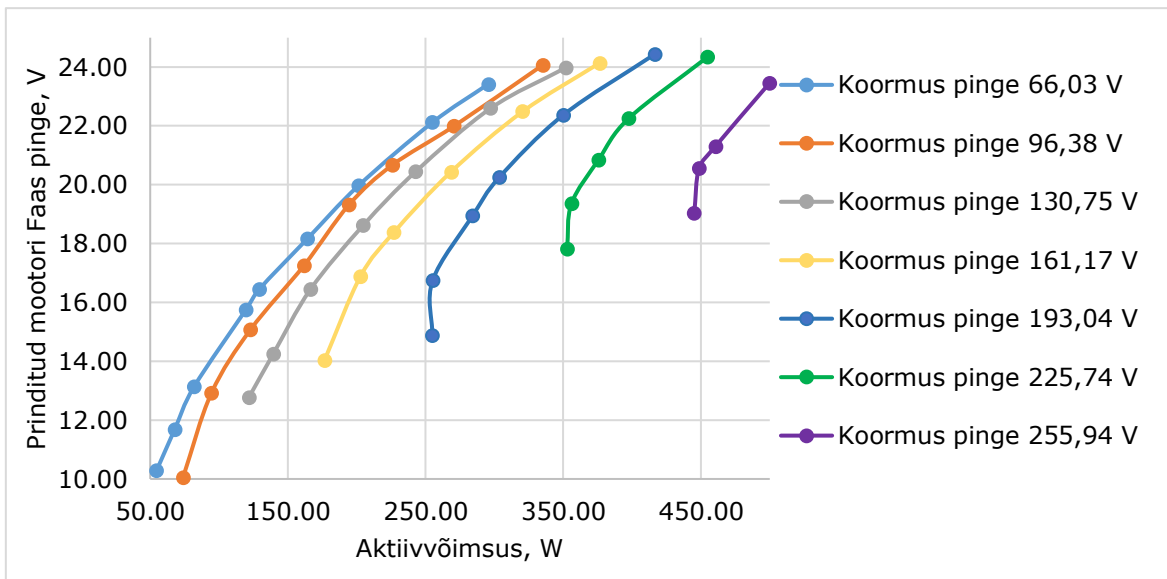
Joonis 3.6. Prinditud mootori kasutegur olenevalt prinditud mootori pingest.

Jooniselt 3.7 on näha, et mida kõrgem on koormusmootori pinge, seda väiksem on pöörlemiskiirus ja suurem pöördemoment. Optimaalne koormuspinge on 161,17 V. Sellel pingel töötab prinditud mootor kiirusvahemikus 1200 kuni 1420 p/min ja pöördemomendiga 0,5 Nm. Suurim pöördemoment 1,25 Nm saavutati koormusmootori 255,94 V pingega. Antud pöördemomendi pöörlemisagedus oli 1235–970 p/min.



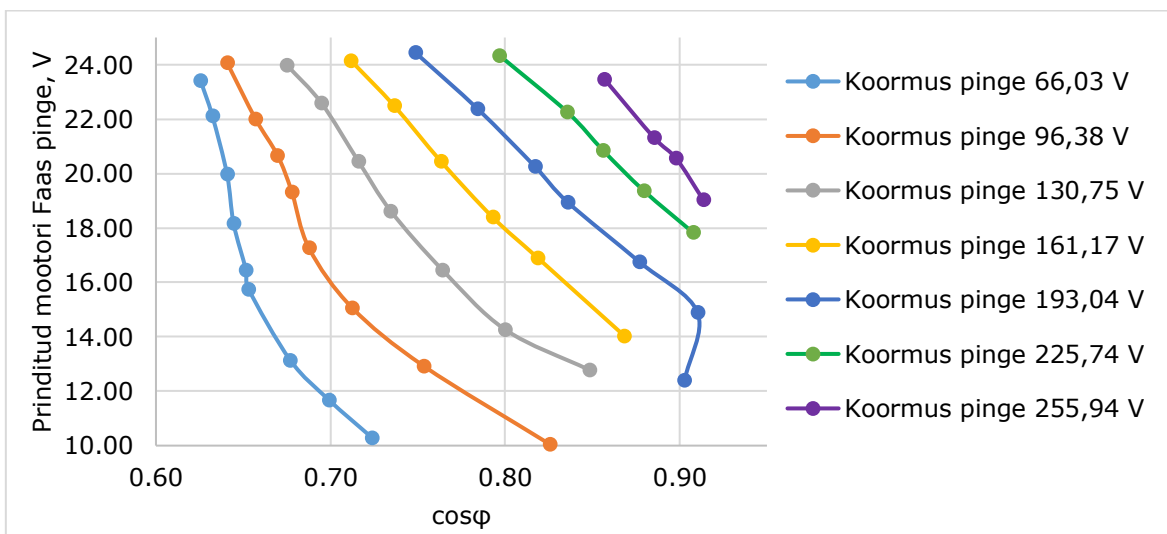
Joonis 3.7. Mootori ühisevõlli pöörlemiskiirus ja pöördemoment.

Aktiivvõimsustarve suureneb koormuspinge kasvades. Suur aktiivse võimsuse tarbimine suurendab voolu väärtust, mis põhjustab mootori ülekuumenemist. Aktiivse võimsusega 200 W ja pingega 16 V on vool 5A, mis on selle mootori jaoks optimaalne väärtus. Aktiivse võimsuse tarbimisel 300 W ja rohkem kuumeneb mootor üle, mistõttu see töörežiim ei sobi pikaajaliseks tööks.



Joonis 3.8. Prinditud mootori aktiivvõimsuse tarbimine.

Jooniselt on näha, et koormuspinge suurenemisega suureneb ka võimsustegur. See on tingitud asjaolust, et kui magnetahel on küllastunud, siis reaktiivvõimsuse tarbimine ei suurene. Seega põhjustab koormuse suurenemine võimsusteguri suurenemist. Samuti on võimsusteguri kõrged väärtused seotud aktiivse võimsuse oluliste kadudega staatori ja rootori südamikus.



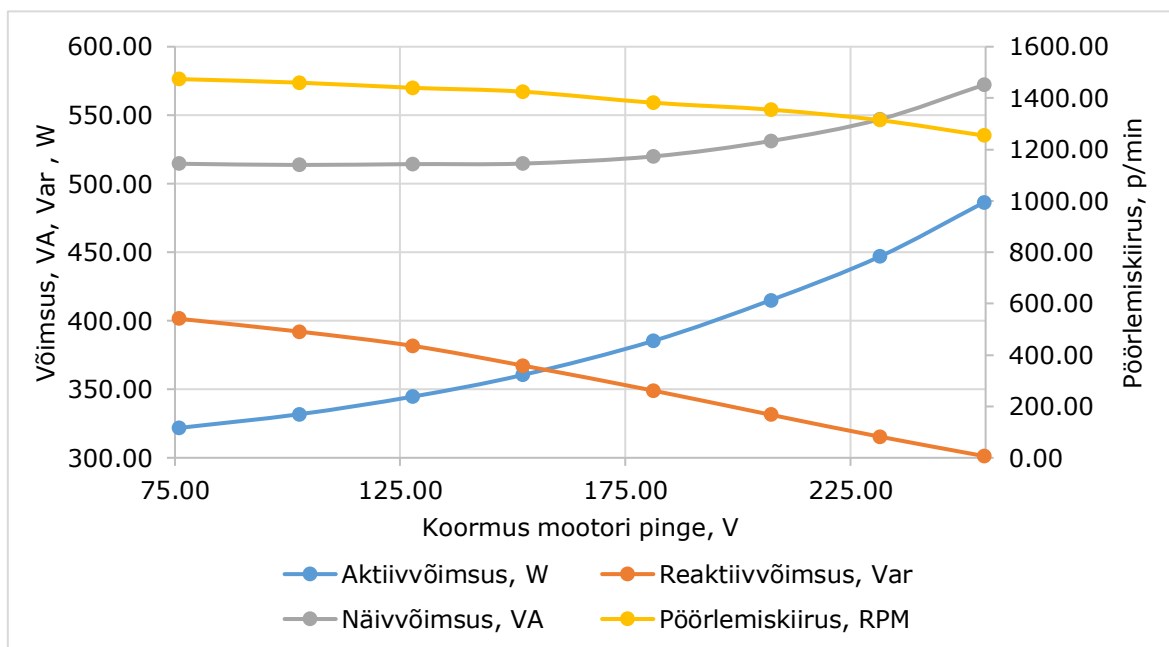
Joonis 3.9. Prinditud mootori võimsustegur.

3.2.6 Töötamine suureneva koormusega

Eelmises osas käsitleti katsete rühma, kus koormus jäi konstantseks ja katsetatava mootori pinge järk-järgult suurenes. Selles osas käsitletakse tööd prinditud mootori konstantse pinge ja koormusmootori suureneva pinge ja võimsuse korral. Teooriast on

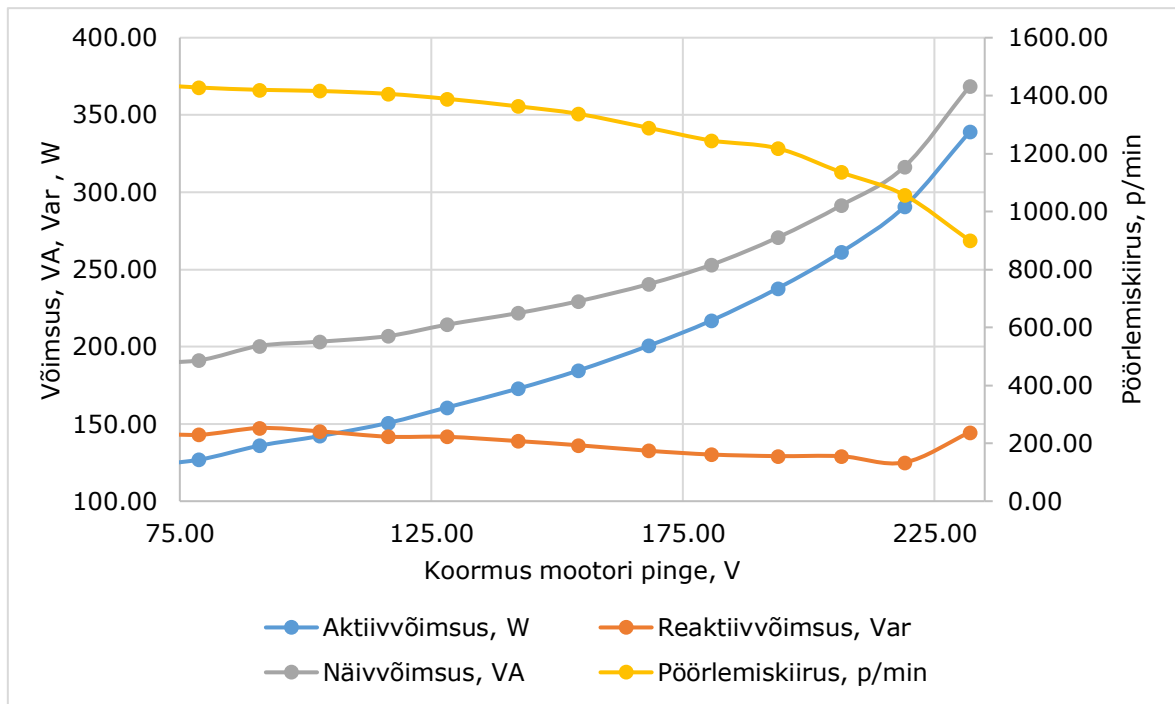
teada, et projekteerimisel valitud nimipinge on 24 V. Katsed tühijooksul ja konstantse koormusega näitasid, et see pinge on liiga suur ja prinditud mootor töötab ülekoormusrežiimis. Katsetamisel käsitletakse ka pinget 16 V. See pinge on mootori normaalseks tööks optimaalne. Katse alguses rakendatakse prinditud mootorile pinge. Seejärel lülitatakse sisse koormusmootor algpingega 75 V. Iga järgmine mõõtmine tehakse pärast pinge suurendamist 25 V võrra.

Prinditud mootori pingel 24 V on näha, et prinditud mootori aktiivvõimsustarve suureneb koormusmootori pinge tõustes poolteist korda – väärtuselt 320 W väärtusele 480 W. Koormuse kasvades magnetahel küllastub ja reaktiivvõimsuse tarbimine väheneb 25% võrra väärtuselt 400 W väärtusele 300 W. Võlli pöörlemiskiirus väheneb väärtuselt 1475 p/min väärtusele 1254 p/min. Maksimaalse koormuse korral on prinditud mootori pöörlemiskiirus 1254 p/min (libistus 0,16).



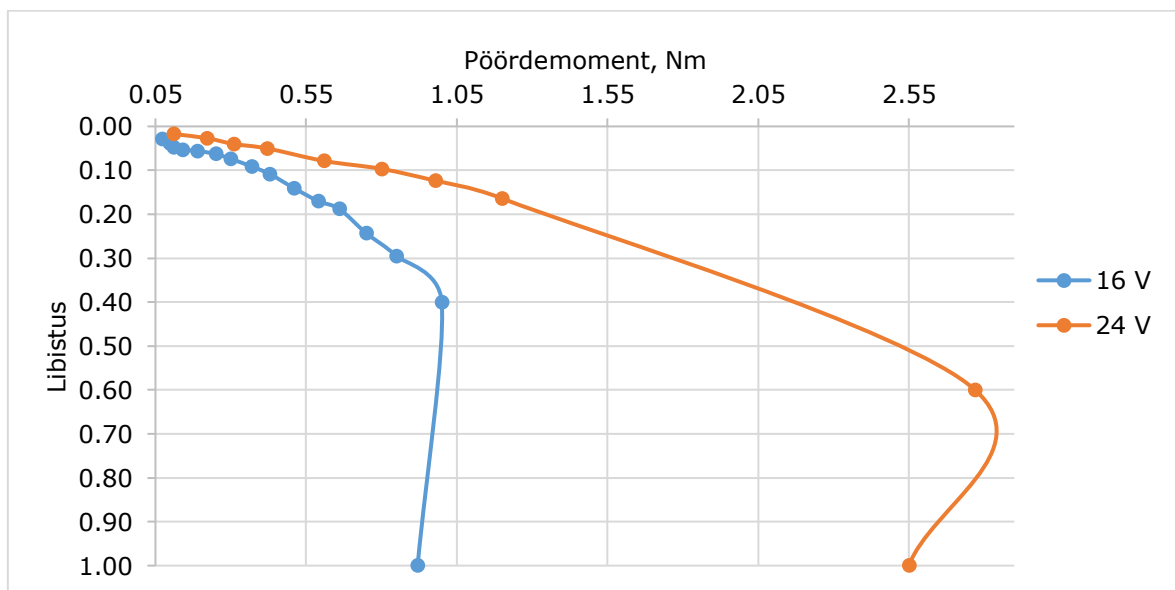
Joonis 3.10. Prinditud mootori aktiiv-, reaktiiv- ja koguvõimsuse tarbimine. Prinditud mootori pinge on 24 V.

Prinditud mootori pingel 16 V on aktiivenergia tarbimine palju väiksem ja jääb vahemikku 120 W kuni 345 W, voolutugevus on vahemikus 3,93 A kuni 7,27 A. Koormuse suurenemisel reaktiivenergia tarbimine väheneb veidi väärtuselt 146,06 Var väärtusele 117,70 Var. Maksimaalse koormuse korral ja pingel 16 V on prinditud mootori pöörlemiskiirus 975 p/min (libistus 0,35).



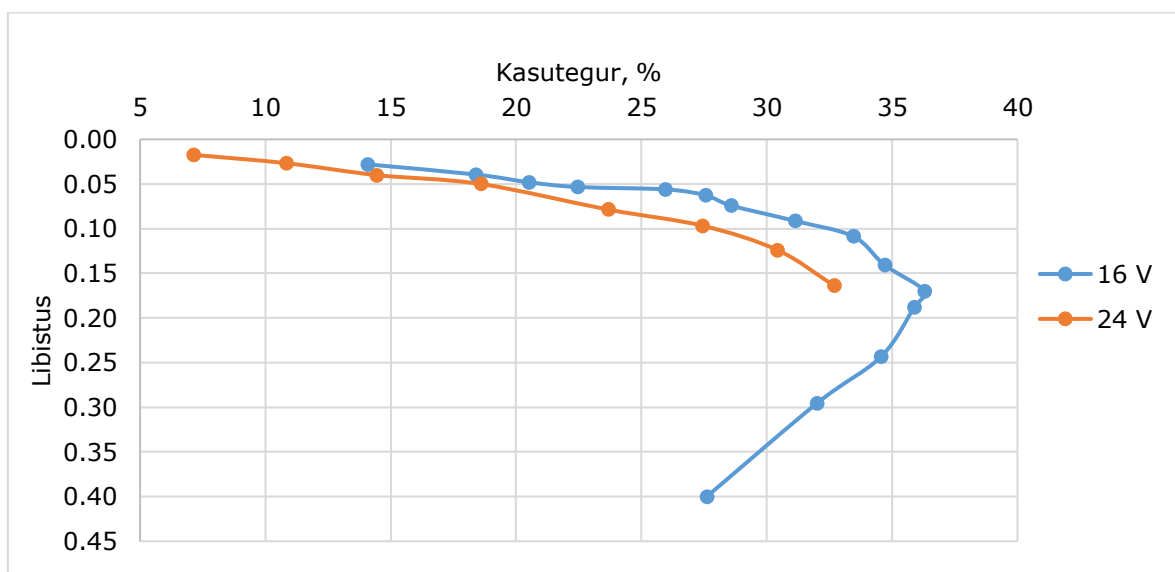
Joonis 3.11. Prinditud mootori aktiiv-, reaktiiv- ja koguvõimsuse tarbimine. Prinditud mootori pinge on 16 V.

Pöördemomendi ja libistuse diagrammid näitavad, et 16 V juures töötades saavutati maksimaalne pöördemoment 1 Nm libisemisega 0,40. Pöördemomendi edasise suurenemisega võlli pöörlemine peatus ja algas vastupidises suunas. 24 V juures töötamisel ei olnud võimalik saavutada kriitilist libisemist ja määrata maksimaalset pöördemomenti. See on seotud mootorite ülekuumenemisega ja koormusmootori ebapiisava pöördemomendiga. Arvutatud maksimaalne pöördemoment on ligikaudu 2,77 Nm ja libistus ligikaudu 0,60.



Joonis 3.12. Prinditud mootori pöördemomendi sõltuvus libistusest.

Prinditud mootori pingel 16 V on suurim kasutegur 36,3% saavutati pöördemomendil 0,60 Nm, mis on nimiväärtusest poolteist korda suurem. Selles režiimis on voolutugevus suurem kui 5,30 A, võimsus on 220 W ja libistus on suurem kui 0,17. See töörežiim on kõige tõhusam, kuid võimatu ülekuumenemise, liiga suure libistuse ja suure voolutiheduse tõttu staatori mähiste juhtides. Prinditud mootori pingel 24 V töö korral ei saavutatud maksimaalset efektiivsust ebapiisava koormuse tõttu. Suurim efektiivsus saavutatakse töötades 80-90% juures nimikoormusest. Koormusmootoril puudub piisav pöördemoment sellise koormuse tagamiseks. Samuti on mootori ülekuumenemise tõttu võimatu saavutada maksimaalset pöördemomenti ja efektiivsust. Mootori jahutusomaduste parandamisel saab katseid teha suurema koormusega.



Joonis 3.13. Prinditud mootori kasuteguri sõltuvus libistusest.

3.3 Võrdlus teoreetiliste näitajatega

Katsetulemuste põhjal võib järeldada, et mootori parameetrite tegelikud väärtused erinevad oluliselt teoreetilistest väärtustest. Mootor projekteeriti väikese võimsusega asünkroonmootorite projekteerimise standardviisil. Prototüübi printimise ja koostamise käigus tehti palju oletusi ja muudatusi, mis mõjusid parameetrite tegelikele väärtustele halvasti.

Suurimat mõju avaldasid staatori ja rootori südamikud. Printimisel 3D-printeriga valmistatakse südamikud ühes tükis. See suurendab oluliselt südamike terases indutseeritud pöörivooludest tingitud soojuskadu. Nende voolude vähendamiseks

moodustati lamineerimiskihid. Need võimaldasid vähendada pöörivoolusid, kuid tekitasid südamikes tühikud. Õhu magnetakistus on palju suurem kui terasel, seetõttu suurenes magnetjuhi takistus, millega kaasnes reaktiivkadude suurenemine. Rootori vardad on paigaldatud rootori südamiku soontesse piludega 0,40 mm, mis samuti suurendab magnetilisi kadusid ja vähendab voolu lühisrootoris.

Tühijooksukatsed näitasid, et töötamisel pingel 24 V on voolutugevus 7,15 A. Selline väärtus on lubatust suurem ja sellisel pingel on mootori pikaajaline töö võimatu. Töötamisel pingel 16 V on tühijooksu voolutugevus 3,85 A, mis on selle mootori puhul normaalne. Nende andmete põhjal otsustati nimipinget muuta väärtuselt 24 V väärtusele 16 V. Katsed töötamisel konstantse koormusega näitasid, et töötamisel pingel 24 V konstantse koormusega on võlli pöörlemiskiirus veidi suurem kui pingel 16 V, kuid aktiivvõimsuse ja voolu tarbimine on palju suurem. Aktiivvõimsuse tarbimise suurendamine 1,50–2,00 korda pöörlemiskiiruse suurendamiseks väärtuse 50–100 p/min võrra ei ole mõistlik, seetõttu on otstarbekas mootori käitamine väiksemal pingel. Samuti on mootori kasutegur pingel 16 V sama koormuse korral palju suurem.

Koormuse järkjärgulisel suurendamisel ja prinditud mootori töö pingel 16 V määrati maksimaalne kasutegur, mille väärtus on 36,3%. Kõiki puudusi arvesse võttes on see prototüübi jaoks küllalt hea tulemus. Nimivõimsus, -vool ja -pöördemoment valiti, lähtudes lubatud voolutihedusest staatori mähisjuhtides.

Algselt arvutati mähised voolutihedusele A/mm², kuid nimivoolul 5 A on voolutihedus mähistes 6,35 A/mm². Väikese võimsusega mootori puhul on lubatud ületamine 25%. Voolutugevus 5 A vastab võimsusele 70 W ja pöördemomendile 0,51 Nm. Pöördemoment on nimiväärtusest veidi suurem, aga võimsus on nimiväärtusest 2 korda suurem. See võimsuse suurenemine on tingitud sellest, et mootori nimikasutegur on tegelikust peaaegu 2 korda suurem. Kui võrrelda koormusmootorit ja prinditud mootorit, siis koormusmootori pingel 130 V on nende aktiivvõimsustarve sama, aga pinge edasisel suurendamisel hakkab koormusmootor tarbima rohkem aktiivvõimsust.

Võimsuskoefitsient osutus teoreetilisest palju suuremaks. Suurem osa kadudest on tingitud pöörivooludest staatori ja rootori südamikus. Need suurendavad aktiivkomponenti ja see suurendab võimsuskoefitsienti. Koormusmasina südamikud on valmistatud klassikalisel viisil, seetõttu on aktiivvõimsuse kaod südamikes minimaalsed ja mootori võimsuskoefitsient on palju väiksem.

Tabel 3.8. Prinditud mootori teoreetiliste ja eksperimentaalsete parameetrite võrdlus.

Parameeter	Sümbol	Tegelik väärtus	Teoreetiline väärtus
Nimipinge, V	U_n	16	24
Nimivõimsus, W	P_n	70	100
Nimivool, A	$I_{n.s}$	5,00	3,85
Tühijooksuvool, A	$I_{0.s}$	3,85	–
Nimipöördemoment, Nm	M_n	0,51	0,66
Võimsustegur (koormus 50%)	$\cos \varphi_{50\%}$	0,73	0,52
Võimsustegur (koormus 75%)	$\cos \varphi_{75\%}$	0,78	
Võimsustegur (koormus 100%)	$\cos \varphi_{100\%}$	0,83	
Pöörlemiskiirus (koormus 50%), p/min	$n_{50\%}$	1405	1455
Pöörlemiskiirus (koormus 75%), p/min	$n_{75\%}$	1365	
Pöörlemiskiirus (koormus 100%), p/min	$n_{100\%}$	1390	
Kasutegur (koormus 50%), %	$\eta_{50\%}$	27,60	65,70
Kasutegur (koormus 75%), %	$\eta_{75\%}$	31,10	
Kasutegur (koormus 100%), %	$\eta_{100\%}$	34,70	

KOKKUVÕTE

Kokkuvõtteks võib öelda, et tööle püstitatud põhiülesanded said edukalt täidetud. Projekteeriti lühisrootoriga asünkroonmootor. Pärast projekteerimist valmistati südamikud 3D-printimise teel. Mootori mähised ja muud osad valmistati klassikalisel viisil. Tegelike omaduste määramiseks valminud prototüüpi katseti. Lõpus tehtud tööd analüüsiti.

Mootor projekteeriti arvestamata sellega, et südamikud valmistatakse 3D-printimisega. Üks eesmärk oli võrrelda, kui suur on erinevus standardisel viisil projekteeritud asünkroonmootori tegelikest parameetritest. Projekteerimise alguses otsustati kasutada kolmefaasilist nimipinget 24 V ja võimsust 100 W. Mootor otsustati projekteerida 2 paari poolustega ja pöörlemiskiirusega 1455 p/min. Südamike materjal oli elektrotehniline legeritud teras ränisisaldusega 3,7 %. Induktsiooni projekteeritav väärtus hammastes oli 1,50 T, südamikes 1,30 T ja õhuvahes 0,60 T. Staatori südamikus otsustati kasutada 24 hammast ja rootori südamikus 18 auku. Staatori ühe faasi pooluspaari kohta oli 96 keerdu vaskjuhti läbimõõduga ilma isolatsioonita 1,00 mm² ja rootor valmistati alumiiniumist nn oravapuuri kujulisena varraste läbimõõduga 4,80 mm. Teoreetiliste arvutuste kohaselt oli mootori pöördemoment 0,66 Nm ja kasutegur 65,70 %.

Kasutades teoreetilises osas arvatud parameetrite väärtusi, koostati mootori mudel. Alguses pidi staatori südamik 3D-printeri piiratud tööulatuse tõttu koosnema 4 eraldi osast. Printimisel selgus, et südamiku jaotamine osadeks on pärast osade ühendamist jäävate õhuvahede tõttu kehv lahendus. Otsustati loobuda staatori südamiku jahutusribidest ja printida see ühes tükis. Pärast printimist südamikke lõõmutati. See võimaldas kõrvaldada metalli sisepinged ja vältida deformatsioone metalli töötlemisel. Pärast lõõmutamist staatori ja rootori südamikke paagutati tööomaduste parandamiseks. Alguses pidid vardad ja lühisrõngad olema prinditud alumiiniumist, kuid nii valmistatud osade kvaliteet osutus liiga madalaks. Vardad otsustati valmistada 4 mm läbimõõduga vasktoorikust ja vasklühisrõngad freesimisega vaskplaadist.

Katsed näitasid, et alguses valitud nimipinge 24 V ei sobi mootori normaalseks tööks, seetõttu otsustati valida nimipingeks 16 V. Töötamisel pingel 24 V oli tühijooksu voolutugevus 7,00 A, mis on peaaegu 2 korda nimiväärtusest suurem. Samuti valiti nimipöördemomendiks 0,51 Nm ja nimiaktiivvõimsuseks 70 W. Mootori kasuteguri määramiseks kasutati koormuskatseid. Täis koormuse juures õnnestus saavutada kasuteguri väärtus 34,70 %. Asünkroonmootorite puhul peetakse seda kasutegurit väikeseks, kuid arvestades, et tegu on prototüübiga, mootorit loetakse väikese

võimsusega mootoriks ja südamikud on valmistatud 3D-printimisega, on see kasuteguri väärtus vastuvõetav. Staatilise käivitusmomendi katsed on näidanud, et 24 V pingel on käivitusmoment 2,55 Nm ja 16 V juures 0,92 Nm. Maksimaalne pöördemoment 16 V pingel on 1,00 Nm kriitilise libistusega 0,40. Pinge 24 V puhul ei olnud võimalik katseliselt määrata kriitilist libisemist ja pöördemomenti. See on seotud mootori ülekuumenemisega ja koormusmootori ebapiisava pöördemomendiga. Alguses otsustati projekteerida väikese võimsusega mootor. Seetõttu valiti tööpinge 24 V. Pärast katsete läbiviimist selgus, et optimaalne pinge oleks 230 V. Mootori ehitus võimaldab sellist pinget kasutada. Samuti osutus kasulikuks kasutada staatorimähiste suurema ristlõikepindalaga juhte. See võimaldaks kasutada suuremaid voolutugevusi, vähendada mähiste takistust ja parandada mootori soojusomadusi.

Üks peamisi kasutegurist mõjutavaid tegureid olid südamikud. 3D-printimise tehnoloogiat pole veel piisavalt uuritud ja see ei võimalda saavutada samu tulemusi kui klassikalise teostuse korral. Ühelt poolt, elektrotehnilise terase ühest tükist valmistatud südamiku kasutamisel magnetahela takistus minimeeritakse, mis mõjub mootori tööle positiivselt. Sellise teostuse korral tekivad aga südamikus indutseeritud pöörivoolude tõttu tohutud soojuskaod. Klassikalise teostuse puhul koosneb südamik õhukestest elektrotehnilise terase kihtidest, mille vahel on isolatsioonikihid. See võimaldab oluliselt vähendada pöörivoolude osatähtsust. Printimisel moodustati pöörivoolude vähendamiseks vahekihid. Südamik moodustus samuti ühest tükist, kuid jagunes kihtideks, mida eraldasid üksteisest suure tühikuisaldusega vahekihid. Nendes vahekihtides oli juhi ristlõikepindala palju väiksem, mis tähendab, et takistus oli suurem, mis teoreetiliselt peaks vähendama pöörivoolude mõju. Teiselt poolt tekivad vahekihtide moodustamisel südamikesse tühikud. Nendes vahekihtides on magnetjuhtivus palju väiksem, mis suurendab ümbermagneetumise kadusid, vähendab magnetilist induktiooni ja mõjub negatiivselt mootori tööomadustele.

Kokkuvõtteks võib öelda, et asünkroonmootorite tootmine 3D-printimisega on üsna paljulubav arengusuund. Tehnoloogia on uus ega võimalda veel saavutada samu tulemusi nagu klassikalise valmistusmeetodiga toodetud mootoritel. Isegi kõiki puudujääke arvesse võttes õnnestus luua töötav prototüüp, mis suudab konkureerida kommertsmootoriga. Kasuteguri suurendamiseks on vaja leida vahekihtide parameetrite optimaalne suhe või leida mõni muu viis pöörivoolude vähendamiseks, seejuures vähendamata magnetjuhtivust. Metalliga 3D-printimise peamised puudused on väike täpsus, pingete tekkimine metallis printimise kõrgete temperatuuride tõttu ning printimise kestus. Peamine eelis on võimalus printida erinevate metallidega praktiliselt mistahes kujuga osi.

SUMMARY

In conclusion, it could be said that the main tasks of were successfully completed. An asynchronous squirrel cage motor was designed. The stator and rotor cores were fabricated by 3D printing. Engine windings and other parts were made in the classic way. The completed prototype was tested to determine the actual properties.

The engine was designed without taking into account the fact that the cores are made by 3D printing. One of the goals was to compare the difference between the actual parameters of the motor and theoretical for classic motor production. At the beginning of the design, it was decided to use a three-phase 24 V voltage. The theoretical power of the motor was 100 W. It was decided to design the motor with 2 pairs of poles and nominal rotation speed of 1455 rpm. The core material was electrical steel with a 3,7% of silicon. The design value of the induction was 1,50 T for the teeth, 1,30 T for the cores and 0,60 T for the air gap. It was decided to use 24 teeth in the stator core and 18 holes in the rotor core. There were 96 turns of copper conductor with a diameter of 1,00 mm² without insulation per phase pole pair and the rotor was made of 18 aluminum roods with a rod diameter of 4,80 mm. According to theoretical calculations, the motor torque was 0,66 Nm and the efficiency was 65,70 %.

Using the values of the parameters calculated in the theoretical part, the motor model was constructed. Initially, the stator core had to consist of 4 separate parts due to the limited range of the 3D printer. The printing showed that the division of the core into parts is a poor solution due to the air gaps remaining after the parts are joined. It was decided to abandon the cooling fins of the stator core and print it in one piece. After printing, the cores were annealed. This was done to eliminate internal stresses in the metal and to avoid deformations during metal processing. After annealing, the stator and rotor cores were sintered to improve performance. At first, the rods and short rings had to be printed in aluminum, but the quality of the parts made in this was too low. It was decided to make the rods from 4 mm diameter copper shaft and the copper short rings by milling copper plate.

The tests showed that the initially selected nominal voltage of 24 V was not suitable for normal operation of the motor, so it was decided to choose a nominal voltage of 16 V. When operating at 24 V, the no-load current was 7,00 A, which is almost twice the nominal value. The rated torque was also chosen to be 0,51 Nm and the rated active power to be 70 W. Load tests were used to determine the motor efficiency. At full load, an efficiency value of 34.70% was achieved. For asynchronous motors, this efficiency is

considerably low, but for a low power motor prototype with the cores made by 3D printing, this efficiency value is acceptable. Static starting torque tests have shown that the starting torque is 2,55 Nm at 24 V and 0,92 Nm at 16 V. The maximum torque at 16 V is 1,00 Nm with a critical slip of 0,40. Due to overheating of the motor and insufficient torque of the load motor, it was not possible to experimentally determine the critical slip and torque at 24 V. Initially, it was decided to design a low-power engine. Therefore, an operating voltage of 24 V was chosen. After the tests, it was found that the optimal voltage would be 230 V. The design of the motor allows such a voltage to be used. In case of conductors with a larger cross-sectional area of the stator windings the motor performance could be improved. This would allow higher currents to be used, reduce winding resistance and improve the thermal performance of the motor.

3D printing technology has not yet been sufficiently researched and does not provide the same results as the classic implementation. On the one hand, the use of a core made of one piece of electrical steel minimizes the resistance of the magnetic circuit, which has a positive effect on the operation of the motor. From the other hand, huge heat losses are generated due to the eddy currents induced in the core. Normally the core consists of thin layers of electrical steel with insulating layers between them. This makes it possible to significantly reduce eddy currents. During printing, lamination layers were formed to reduce eddy currents. In these lamination layers, the cross-sectional area of the conductor was much smaller, which means that the resistance was higher, which should theoretically reduce the effect of eddy currents. On the other hand, voids are formed in the cores when the lamination layers are formed. In these zones, the magnetic conductivity is much lower, which increases the reactive power losses, reduces the magnetic induction and has a negative effect on the motor performance.

In conclusion, the production of asynchronous motors with 3D printing is a rather promising development. The technology is new and does not provide the same results as engines produced by the classical manufacturing method. Even taking into account all disadvantages of this production method, it was possible to create a working prototype that could compete with a commercial engine. In order to increase the efficiency, it is necessary to find the optimal ratio of the parameters of the lamination layers or to find another way to reduce the eddy currents without reducing the magnetic conductivity. The main disadvantages of 3D metal printing are low accuracy, high stress due to high metal printing temperatures, and printing time. The main advantage is the ability to print parts of any shape with different metals.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] K. Janson, A. Kallaste, "Elektrimasinate alused", TTÜ kirjastus, 2017.
- [2] А.В. Беспалов, "Проектирование асинхронного двигателя общего назначения с короткозамкнутым ротором", Издательство Нижневартковского государственного гуманитарного университета, 2012.
- [3] И.П. Копылов, "Проектирование электрических машин", Издательство Юрайт, 2011.
- [4] В.Н. Дмитриев, "Проектирование и исследование асинхронных двигателей малой мощности", Ульяновск, 2006.
- [5] Andmed on saadud eksperdilt, doktorandilt Hans Tiismuselt.
- [6] П.С. Сергеев, Н.В. Виноградов, Ф.А. Горяинов, "Проектирование электрических машин", Москва, Издательство Энергия, 1970.
- [7] J. Petro, "Advanced Materials for Motor Laminations: Past, Present and Future", 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://metglas.com/wp-content/uploads/2016/12/Advanced-Materials-for-Motor-Laminations.pdf>. [Kasutatud 15.11.2021]
- [8] SLM Solutions Group AG, andmeleht, "SLM 280 2.0 Technical Specifications", 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/machines/slm-280/>. [Kasutatud 01.12.2021]
- [9] Memi varustaja OÜ, laagrite kataloog, "Roostevaba kuullaager kummikatetega S6200-2RS", 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.memi.ee/product/roostevaba-kuullaager-kummikatetega-s6200-2rs/>. [Kasutatud 01.12.2021]
- [10] C. Silbernagel, I. Ashcroft, P. Dickens, M. Galea, "Electrical resistivity of additively manufactured AlSi10Mg for use in electric motors", 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214860418300769>. [Kasutatud 15.11.2021]
- [11] H. Tiismus, A. Kallaste, A. Belahcen, A. Rassolkin, T. Vaimann, P. S. Ghahfarokhi, "Additive Manufacturing and Performance of E-Type Transformer Core", 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/11/3278/htm>. [Kasutatud 15.11.2021]

- [12] NCTE AG, andmeleht, " Instruction manual and data sheet Torque Sensor Series 4000", 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://ncte.com/wp-content/uploads/2021/05/Instruction_manual_data_sheet_series4000_EN_V20_02.pdf [Kasutatud 01.12.2021]
- [13] Felandia OÜ, mootorite kataloog, " Elektrimootor 0,06kW/1500 p/min MS 561-4 B34; IE1; IP55; 230/400V", 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.felandia.eu/media/veelandia/product/eu.erply.com/1052-ms-561-4-0-06_tehnilised_andmed_v1.pdf](https://www.felandia.eu/media/veelandia/product/eu.erply.com/1052-ms-561-4-0-06-tehnilised_andmed_v1.pdf). [Kasutatud 01.12.2021]
- [14] Tektronix Inc, andmeleht, " 6½-Digit USB Digital Multimeter", 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://download.tek.com/datasheet/2100.pdf>. [Kasutatud 01.12.2021]
- [15] ERR, intervjuu, "Eestis 3D-prinditud elektrimasinad otsivad teed lennundusse ja kosmosesse", 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://novaator.err.ee/1608384512/eestis-3d-prinditud-elektrimasinad-otsivad-teed-lennundusse-ja-kosmosesse>. [Kasutatud 01.12.2021]

LISAD

Lisa 1 Terasemarkide 2013 ja 2312 magneetumusomadused [3]

Induktsioon , T	magneetumine margi 2013 korral, A/m			magneetumine margi 2312 korral, A/m		
	Ikke	Hamb	Üldine	Ikke	Hamb	Üldine
	$H_{2013.s}$	$H_{2013.j}$	$H_{2013.ref}$	$H_{2312.s}$	$H_{2312.j}$	$H_{2312.ref}$
0,50	64	154	63	100	159	76
0,55	71	171	66	115	182	80
0,60	80	188	70	131	204	86
0,65	89	205	73	143	230	90
0,70	100	223	78	160	257	96
0,75	111	240	83	177	278	116
0,80	124	258	88	194	292	140
0,85	138	267	94	226	316	165
0,90	152	285	99	231	342	190
0,95	168	304	105	257	376	222
1,00	185	324	110	274	403	240
1,05	203	346	117	302	455	265
1,10	221	370	125	332	488	300
1,15	241	396	133	374	520	346
1,20	262	424	141	410	593	400
1,25	289	445	169	458	667	470
1,30	320	486	200	509	724	550
1,35	357	533	245	577	818	750
1,40	400	586	300	656	897	1000
1,45	450	646	450	788	990	1250
1,50	520	709	620	905	1120	1600

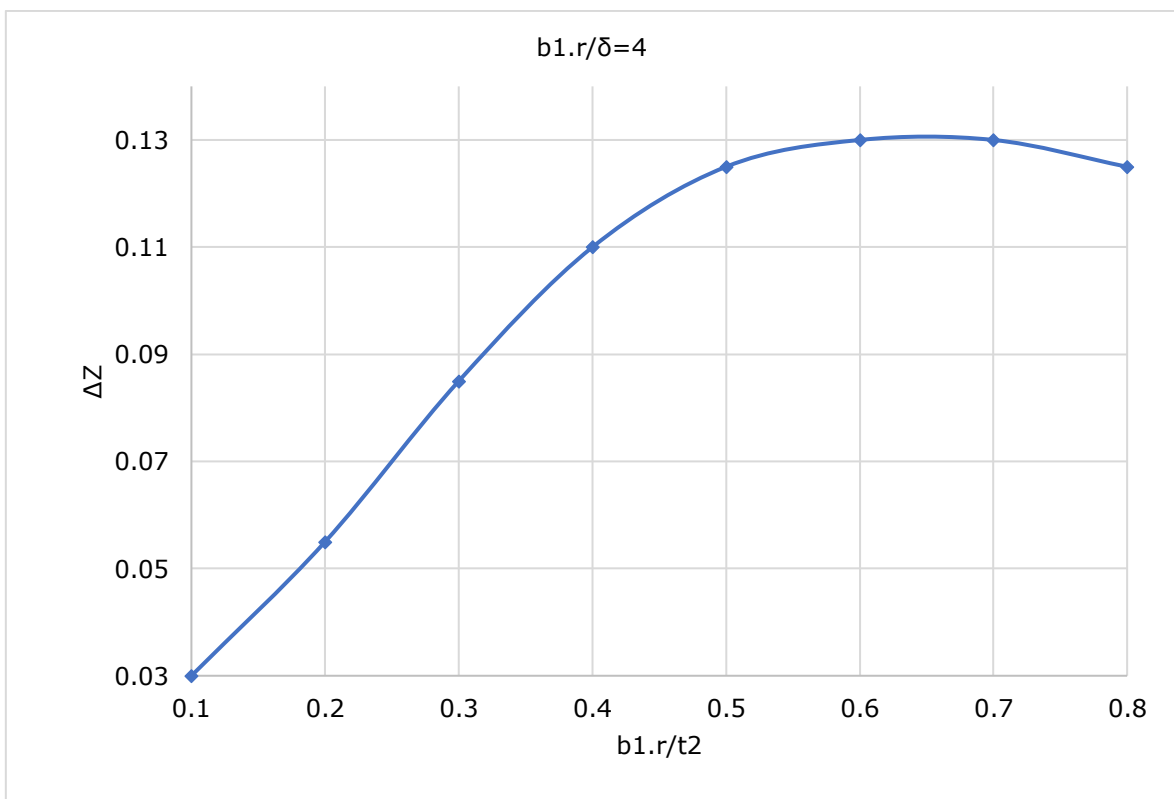
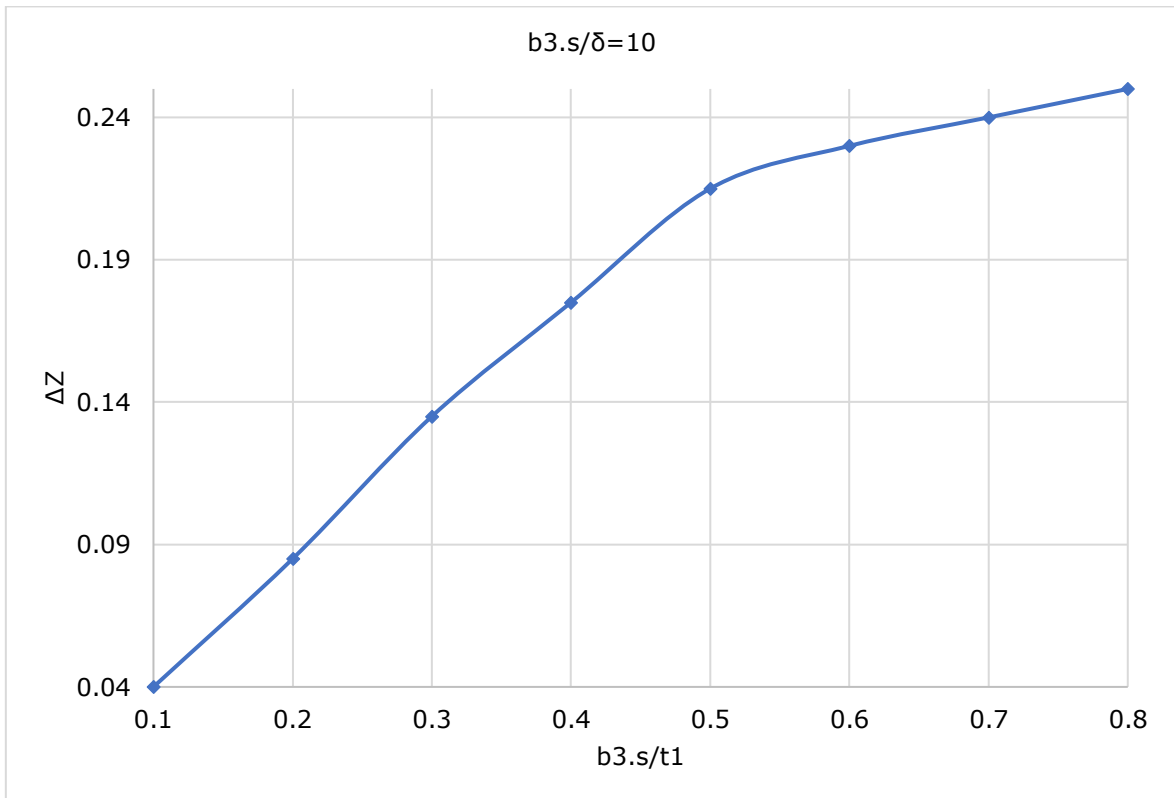
Lisa 2 Printimisterase magneetumusomadused

Induktsioon, T	Printimisterase nimimagneetumus, A/m		
	Ikke	Hamb	Üldine
	$H_{proto.s}$	$H_{proto.j}$	$H_{proto.ref}$
0,50	12	5	10
0,55	14	6	11
0,60	16	6	12
0,65	16	6	12
0,70	18	7	12
0,75	20	8	14
0,80	22	9	16
0,85	24	10	17
0,90	27	12	20
0,95	29	14	22
1,00	31	14	23
1,05	34	16	25
1,10	37	18	27
1,15	40	20	30
1,20	46	23	35
1,25	62	34	50
1,30	96	56	82
1,35	181	125	180
1,40	395	321	449
1,45	826	809	1068
1,50	1583	1823	2343

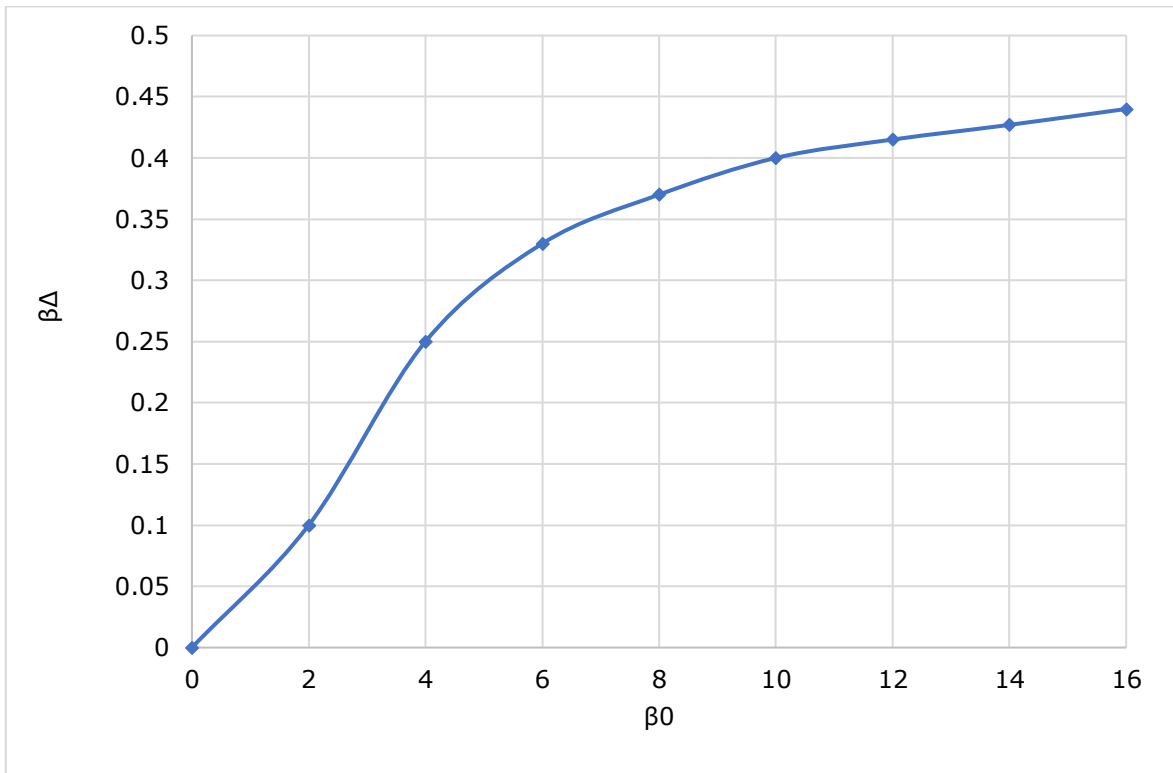
Lisa 3 Juhi parameetrid erinevate läbimõõtude korral [2]

Isolatsioonita juhi nimiläbimõõt, $d_{j,1}$, mm	Isoleeritud juhi keskmise väärtus, $d_{j,2}$, mm	Isolatsioonita juhi ristlõikepindala, $q_{ef,sl}$ mm ²
0,20	0,23	0,031
0,22	0,29	0,039
0,28	0,32	0,062
0,32	0,35	0,078
0,36	0,39	0,099
0,38	0,42	0,11
0,40	0,44	0,13
0,43	0,47	0,14
0,45	0,49	0,16
0,50	0,55	0,20
0,56	0,62	0,25
0,60	0,67	0,28
0,63	0,69	0,31
0,71	0,77	0,40
0,75	0,82	0,44
0,80	0,87	0,50
0,85	0,92	0,57
0,90	0,97	0,64
0,95	1,015	0,71
1,00	1,080	0,79
1,06	1,14	0,88
1,12	1,20	0,99
1,18	1,26	1,094

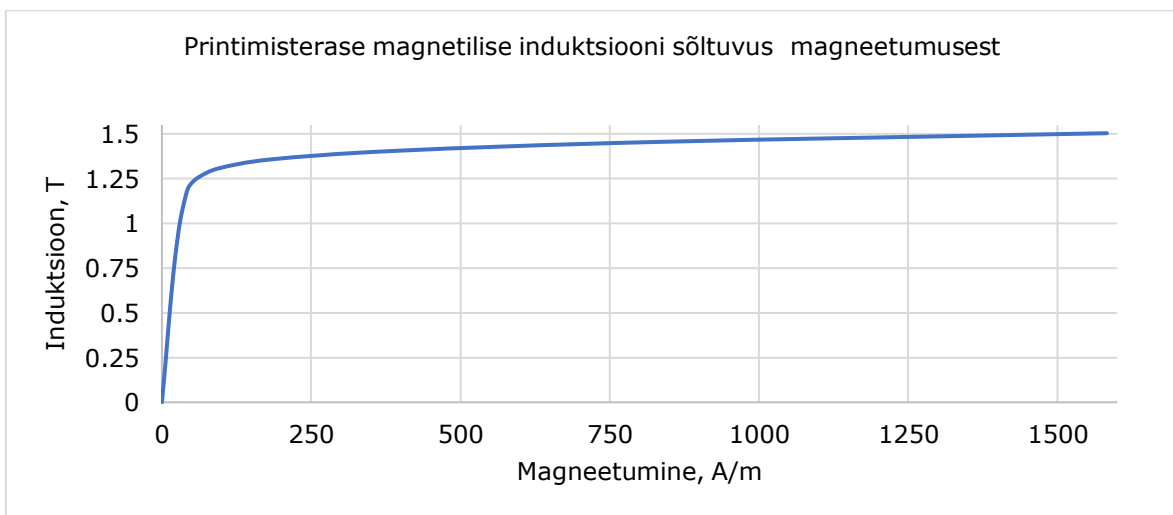
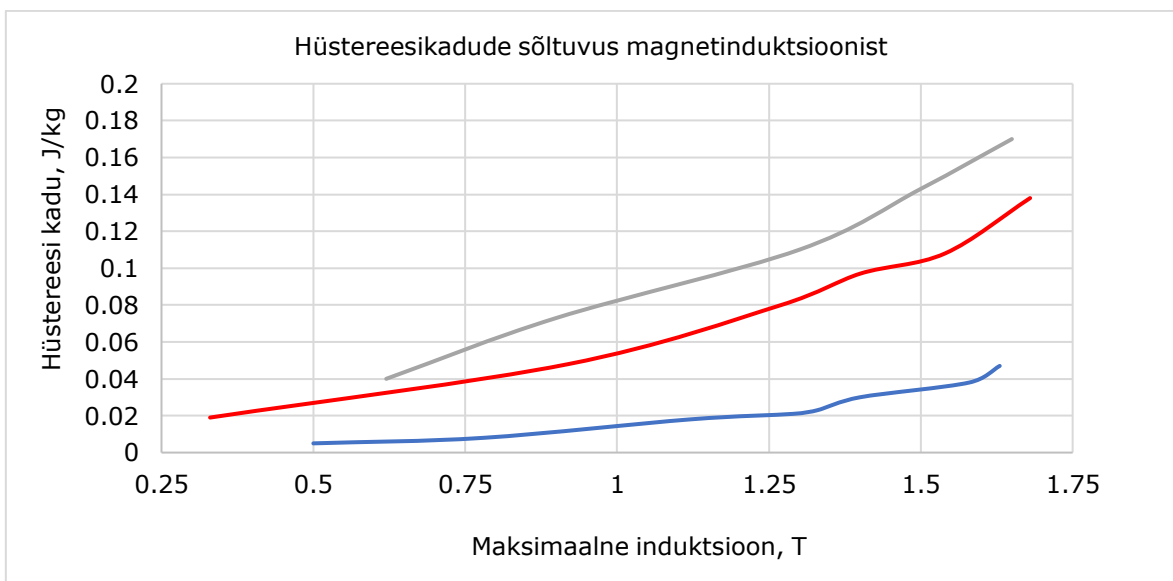
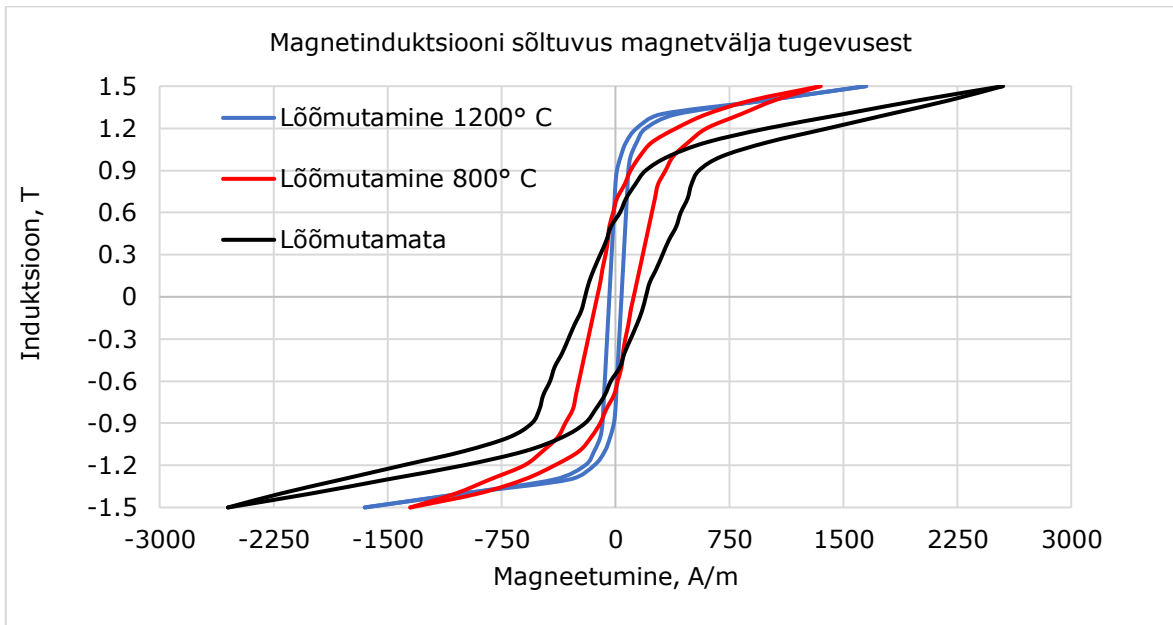
Lisa 4 staatori ja rootori diferentsiaalhajumise sammu tegurid [2]



Lisa 5 Pilu laiuse ja õhuvähe sõltuvus [2]



Lisa 6 Printimisterase omadused [11]

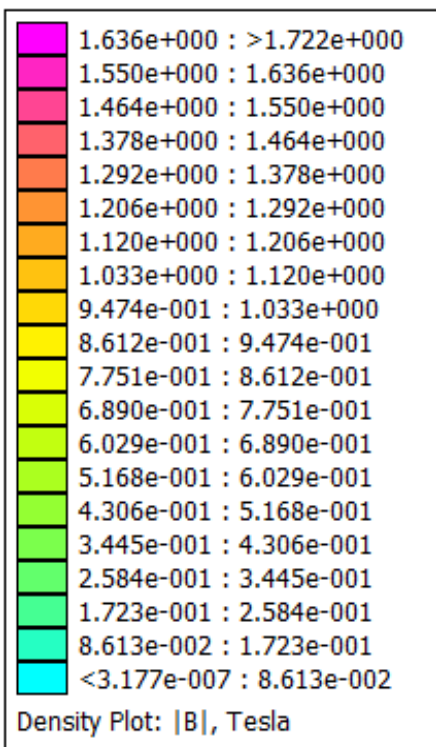
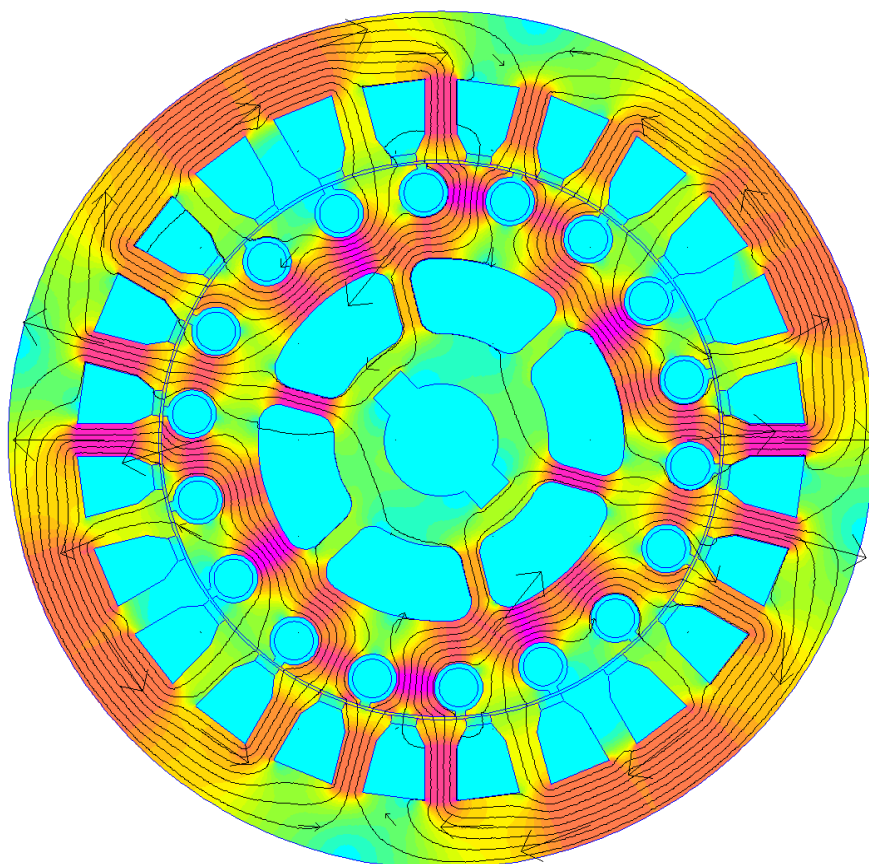


Lisa 7 Valmis 3D prinditud lühisrootoriga asünkroonmootor [15]

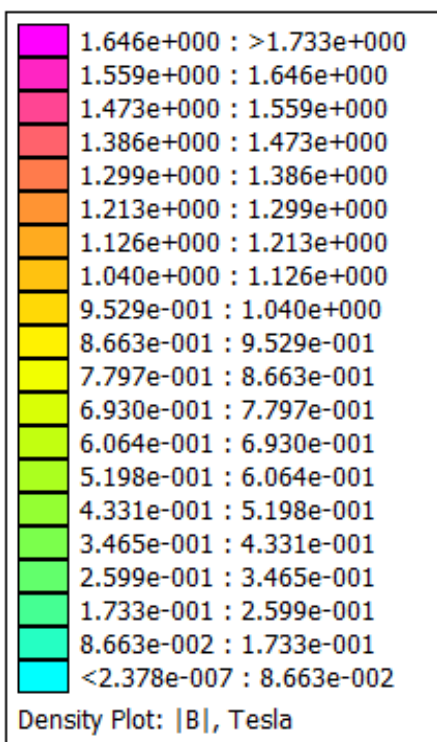
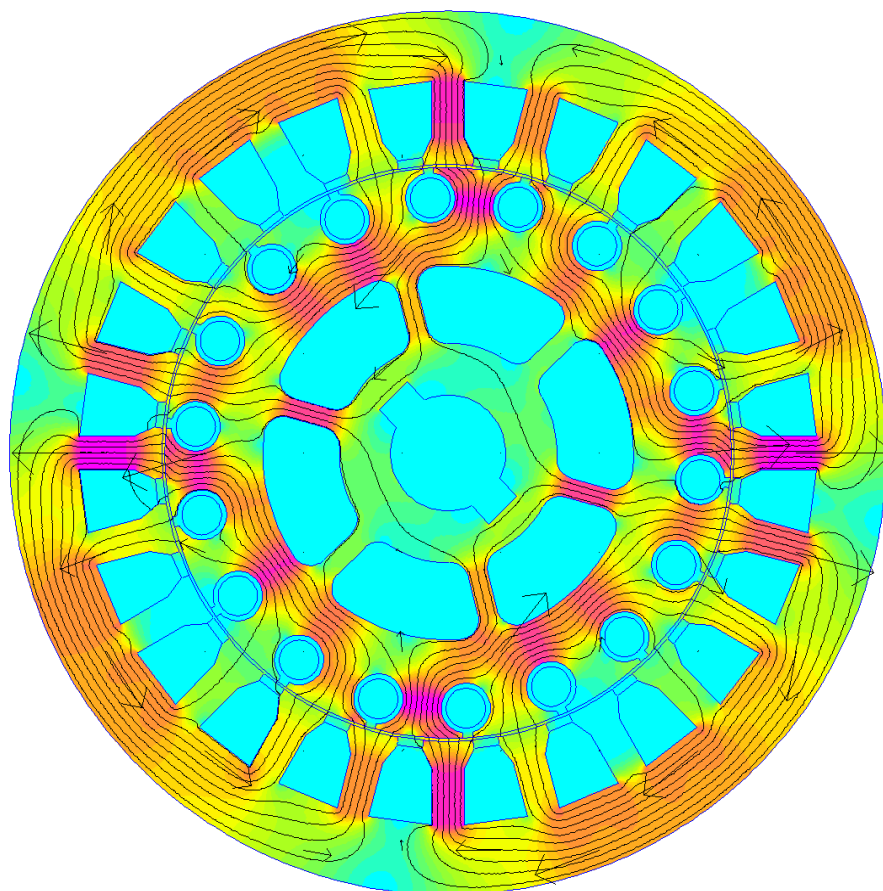


Lisa 8 Magnetväljade jaotus asendise 7,5° ja 90° vahel sammuga 7,5°

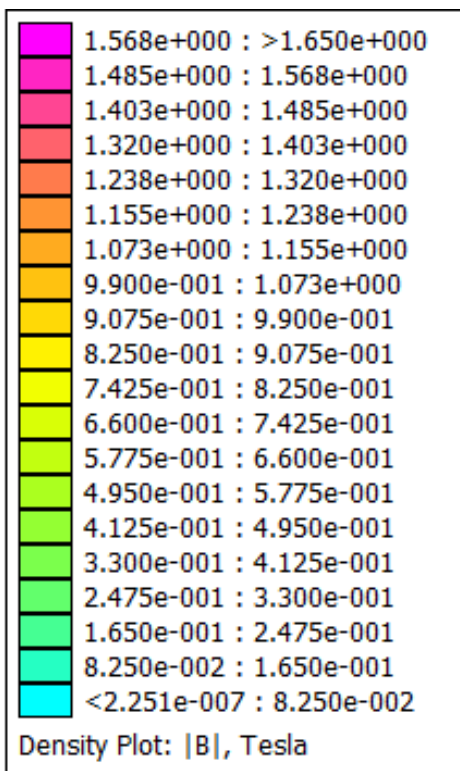
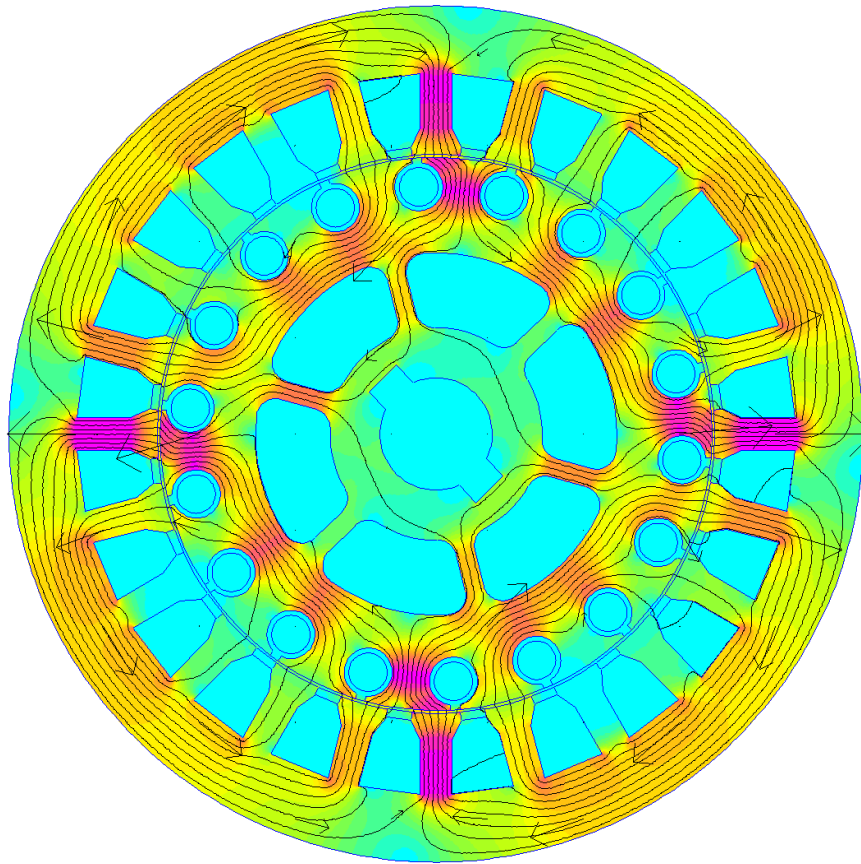
Lisa L8.1 Magnetväljade jaotus asendis 7,5°



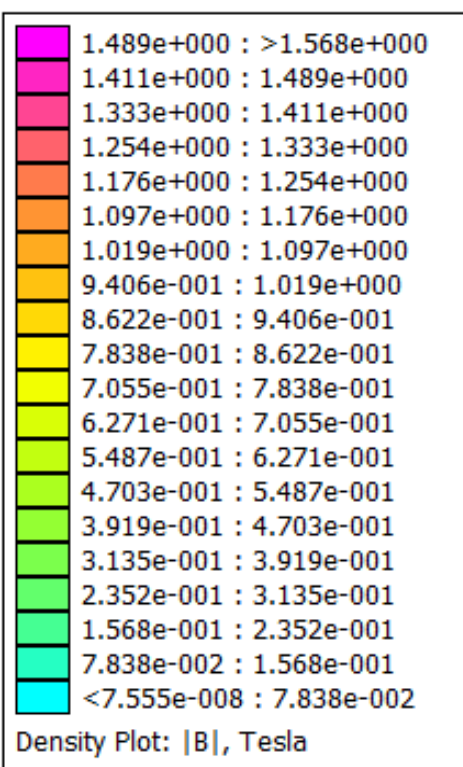
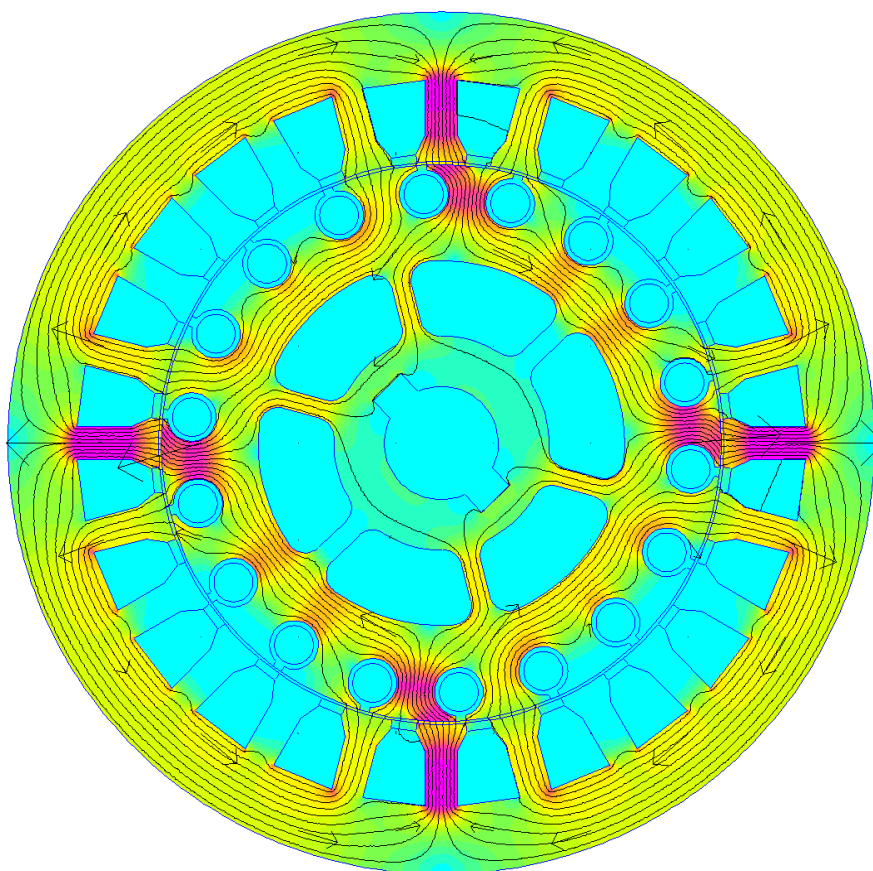
Lisa L8.2 Magnetväljade jaotus asendis 15°



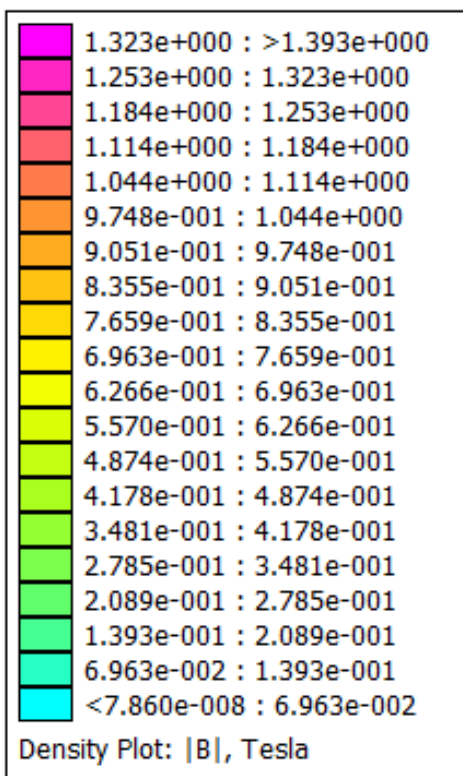
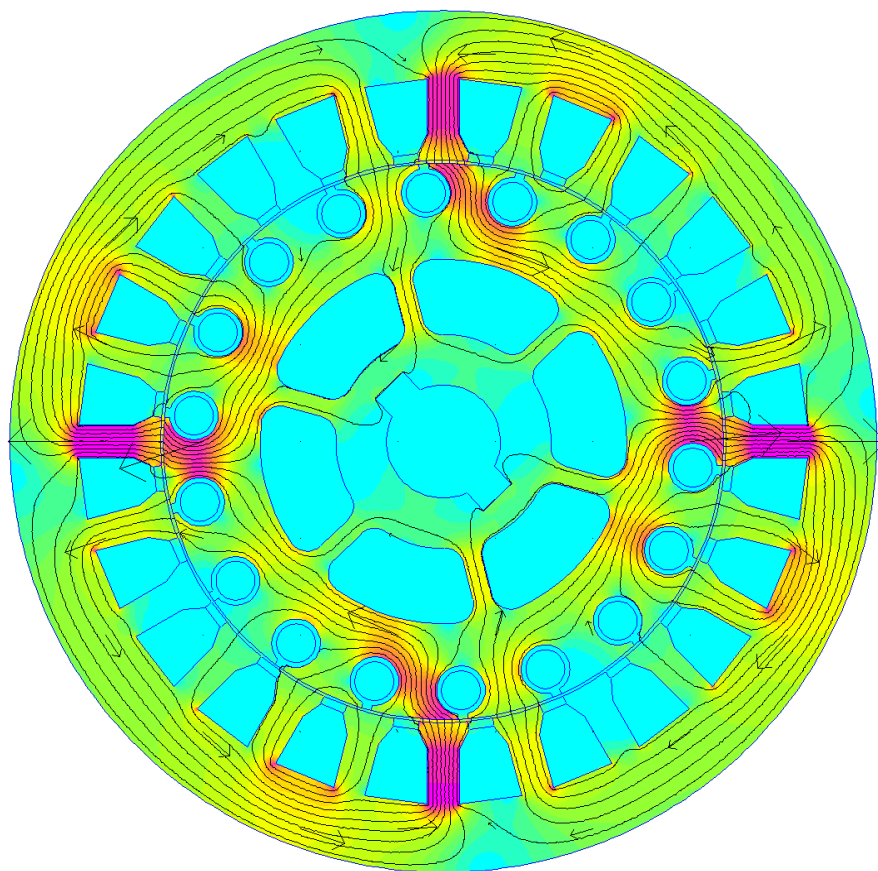
Lisa L8.3 Magnetväljade jaotus asendis 22,5°



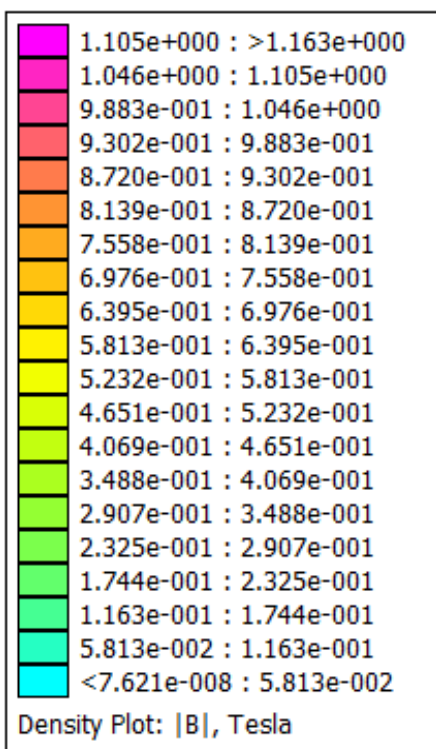
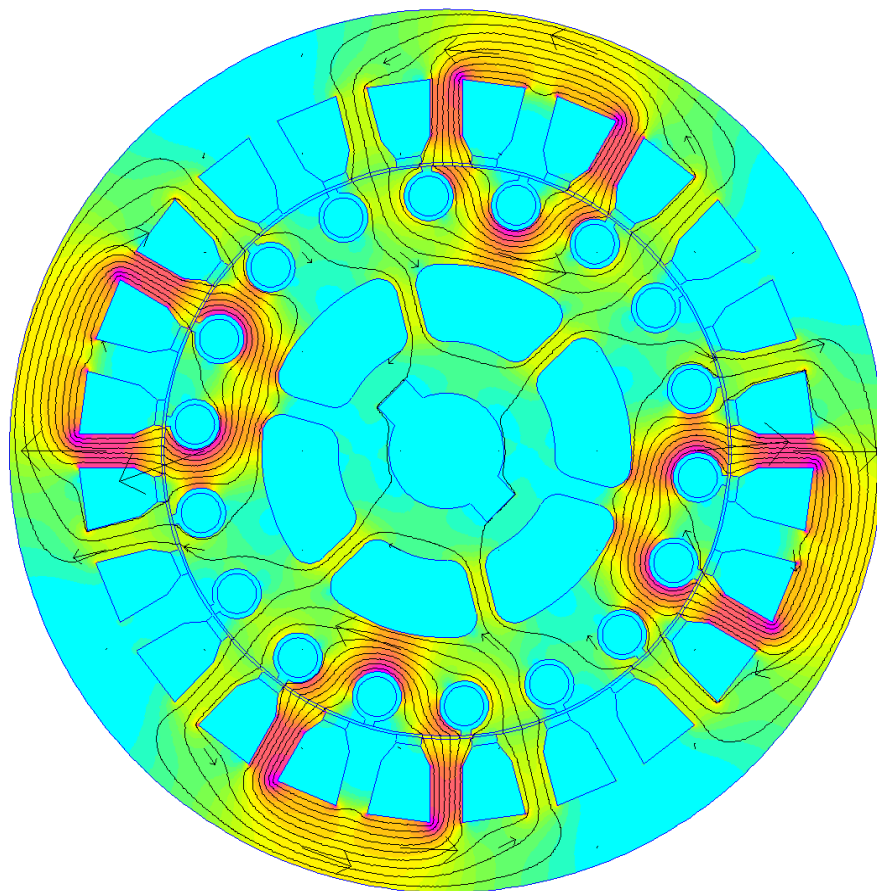
Lisa L8.4 Magnetväljade jaotus asendis 30°



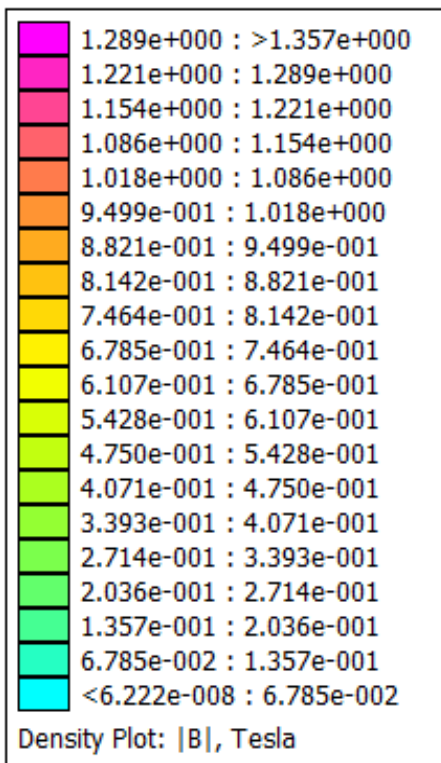
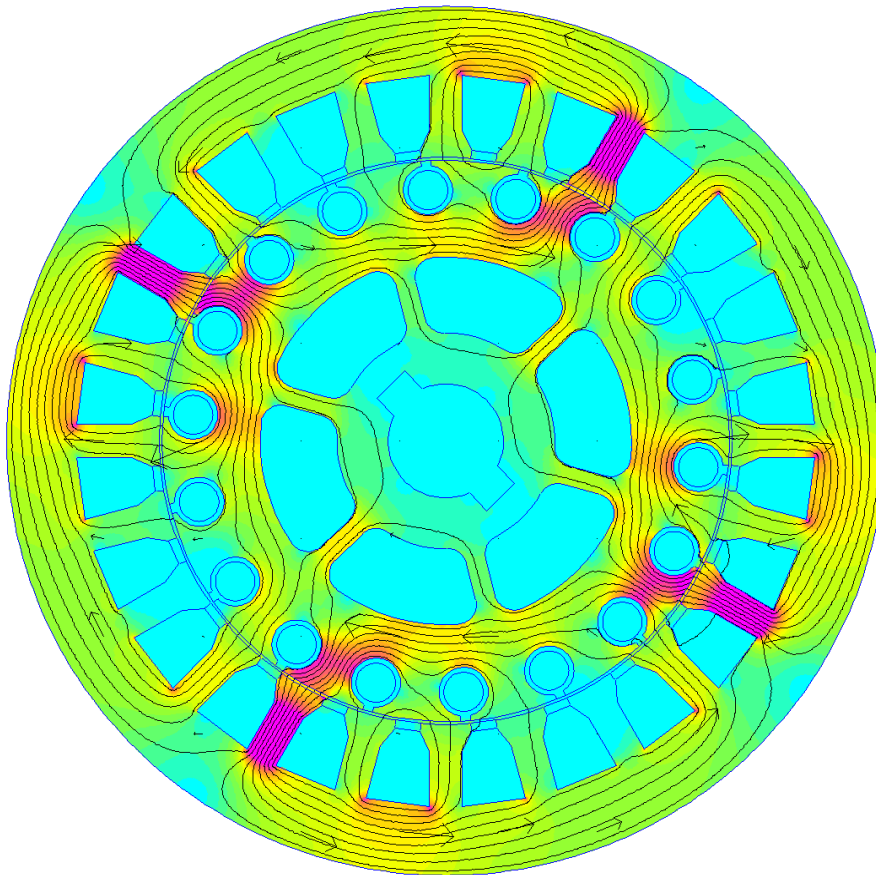
Lisa L8.5 Magnetväljade jaotus asendis 37,5°



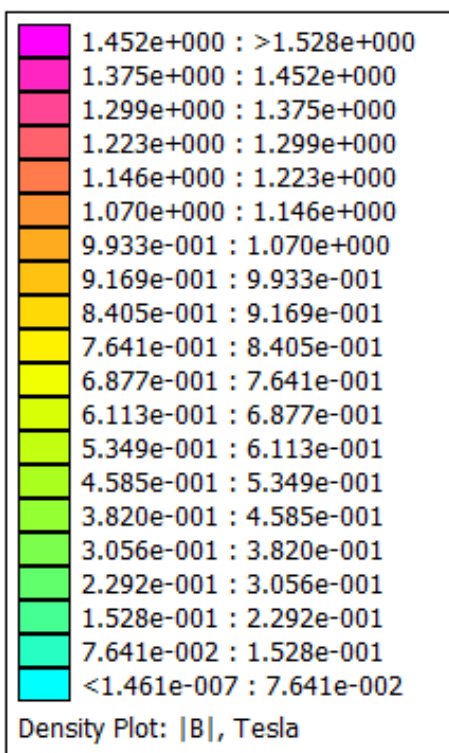
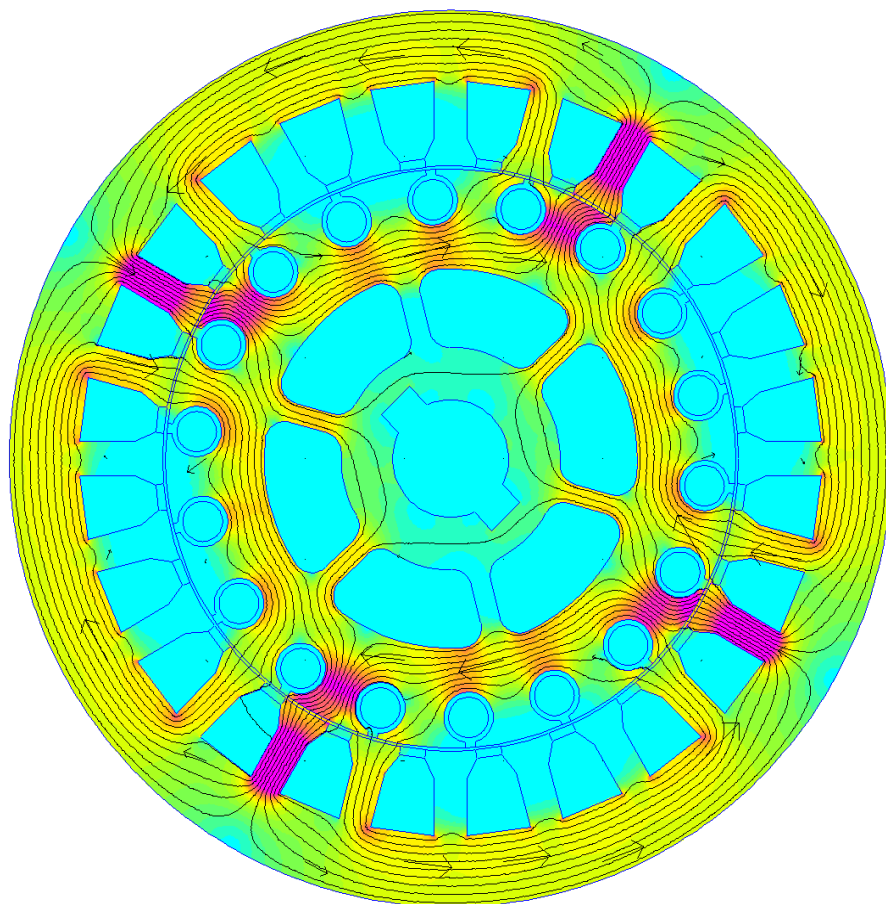
Lisa L8.6 Magnetväljade jaotus asendis 45°



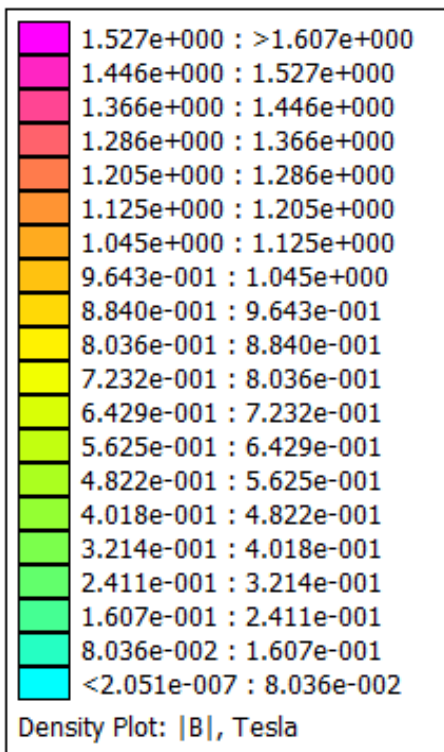
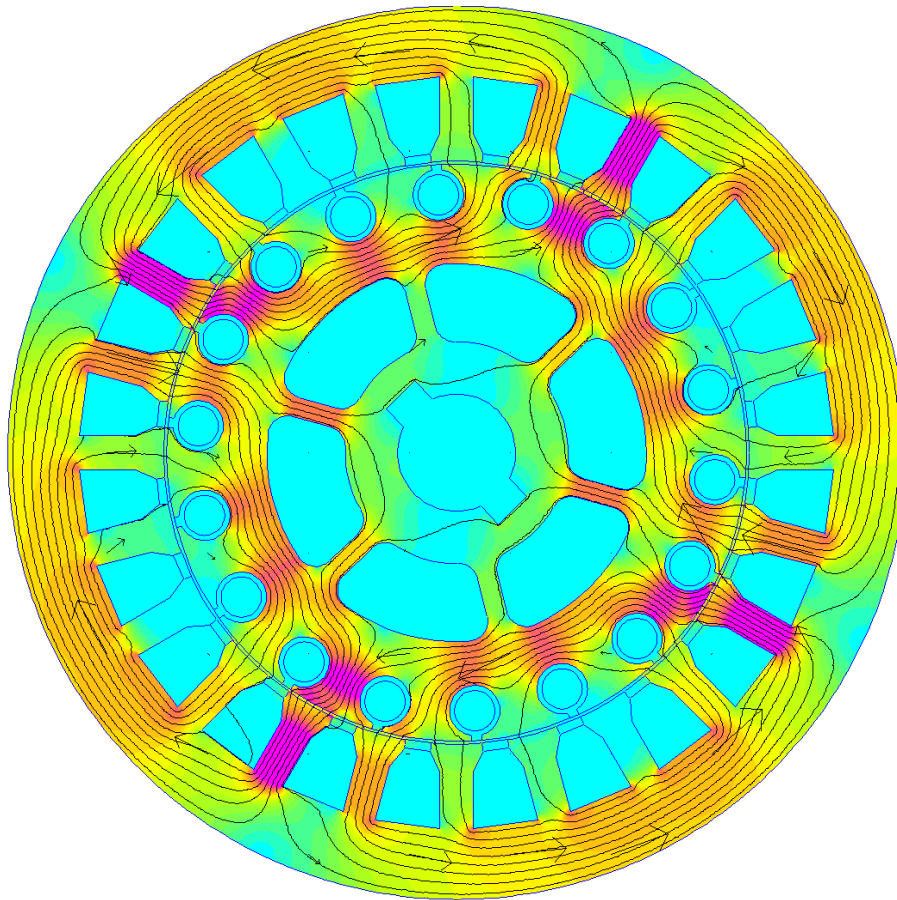
Lisa L8.7 Magnetväljade jaotus asendis 52,5°



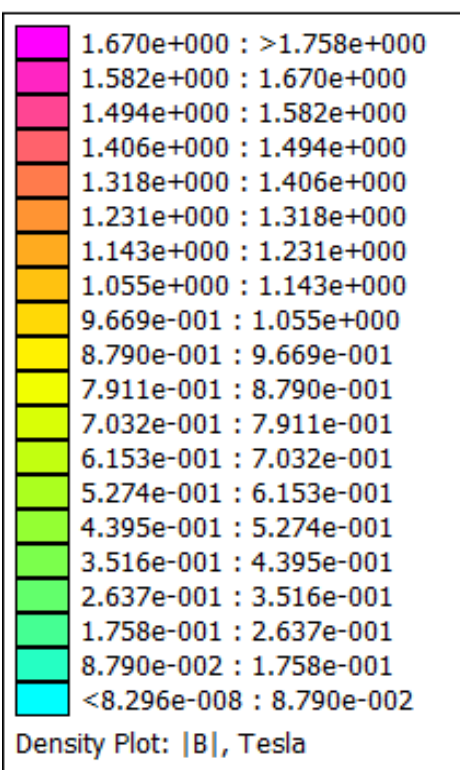
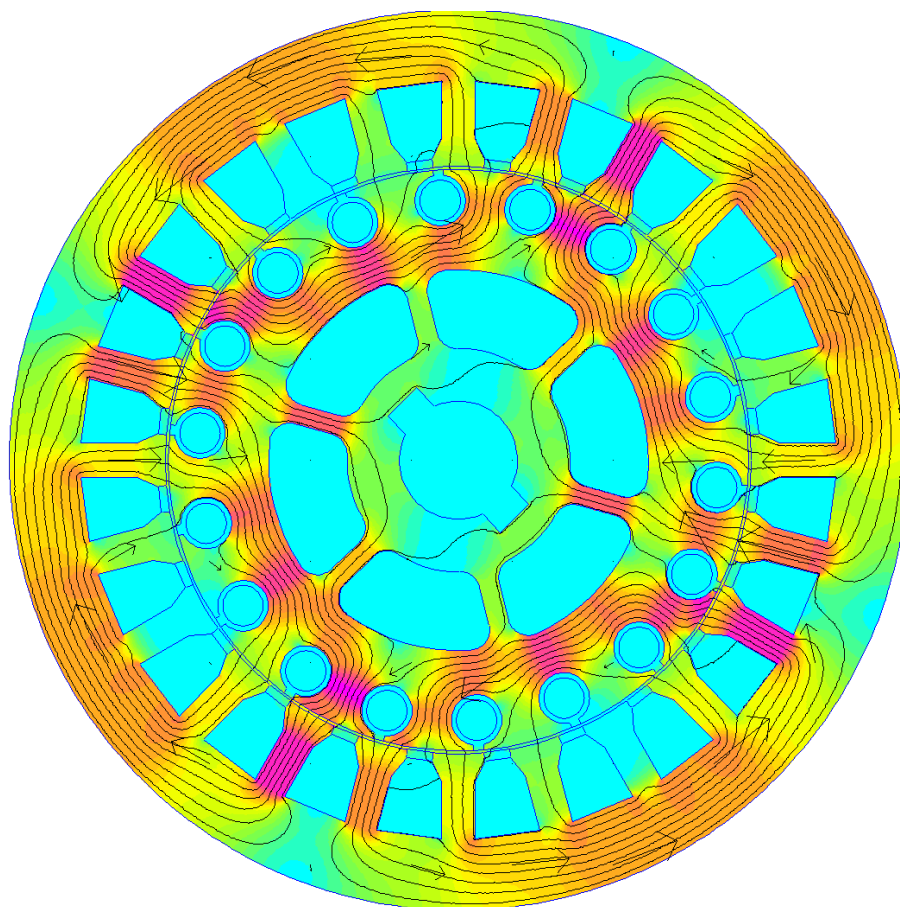
Lisa L8.8 Magnetväljade jaotus asendis 60°



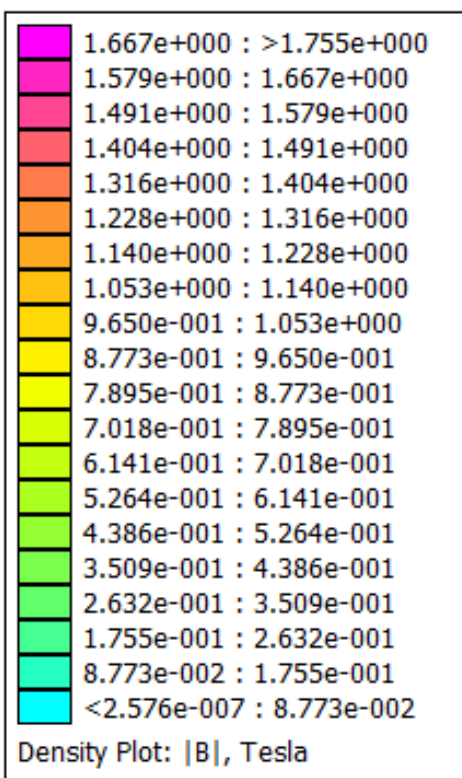
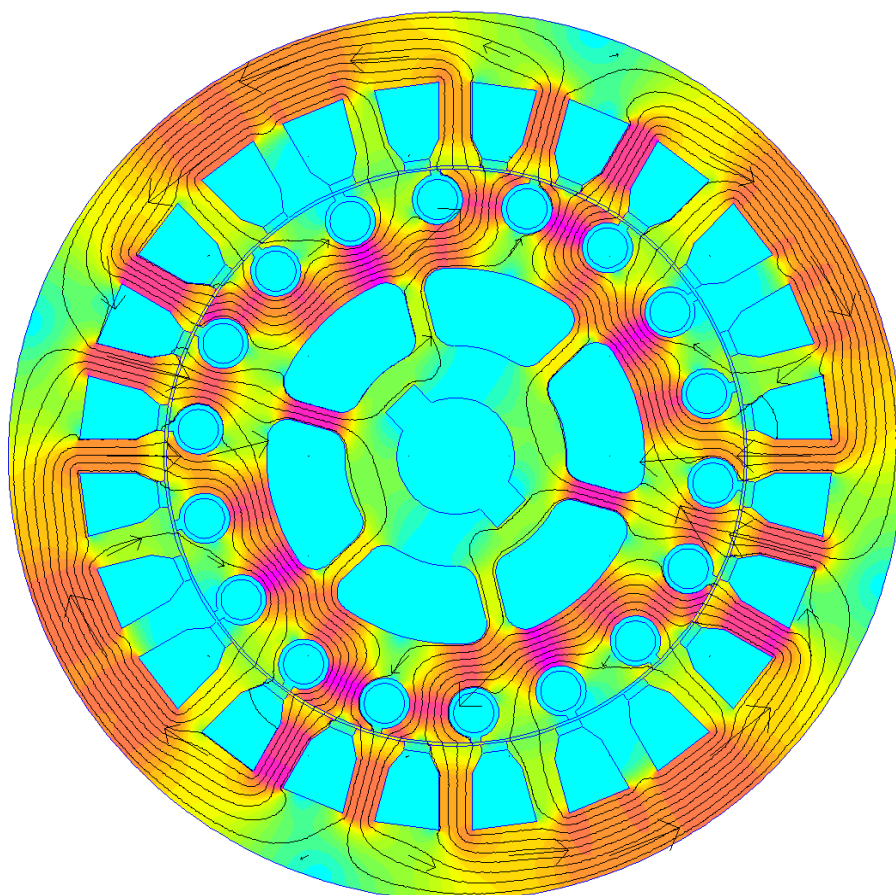
Lisa L8.9 Magnetväljade jaotus asendis 67,5°



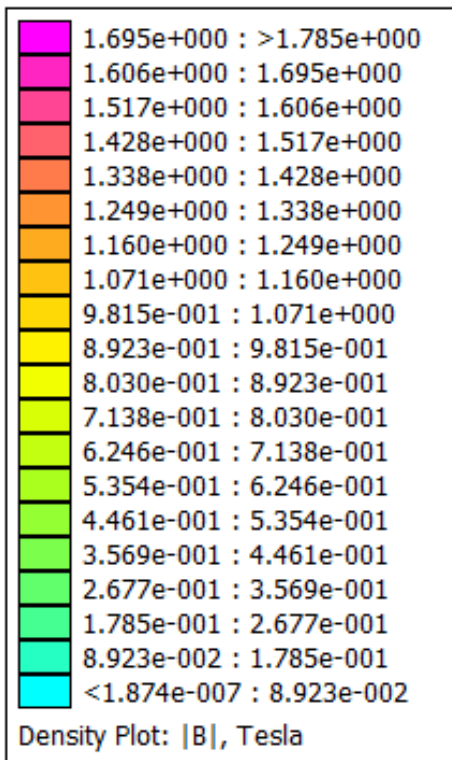
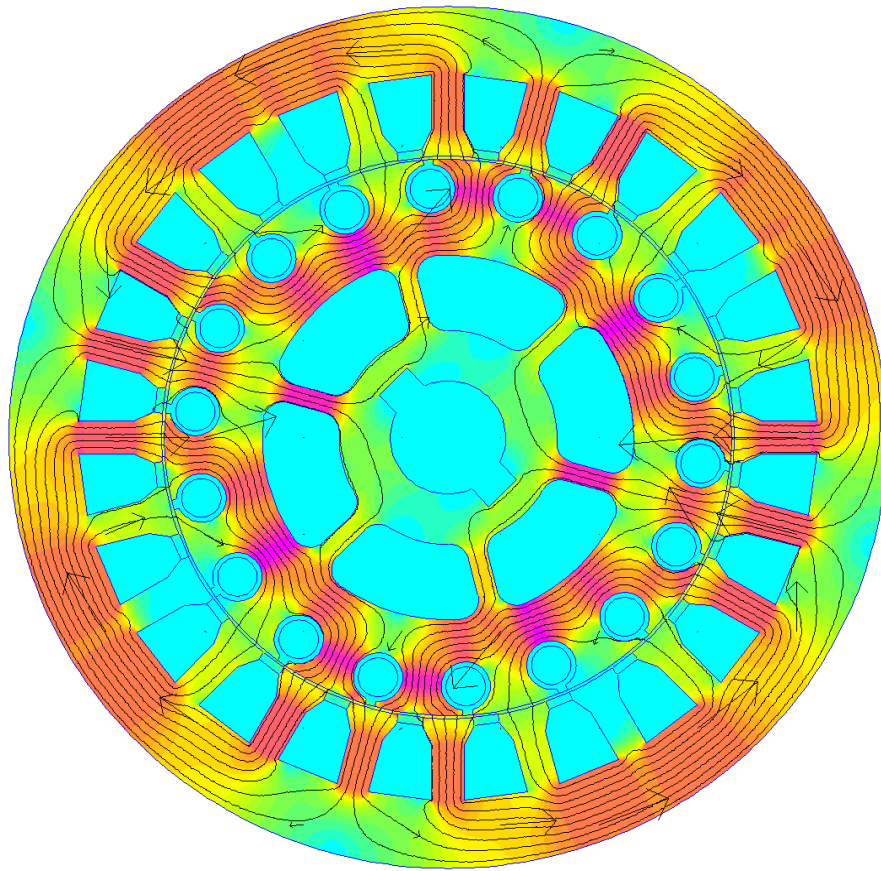
Lisa L8.10 Magnetväljade jaotus asendis 75°



Lisa L8.11 Magnetväljade jaotus asendis 82,5°



Lisa L8.12 Magnetväljade jaotus asendis 90°



Lisa 9 Koormusmootori tühijooksu katsed

