



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

# MAGNETILISE SIDURI RAKENDUSVALDKONNAD NING PROJEKTEERIMINE

MAGNETIC CLUTCH APPLICATIONS AND DESIGN

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Jaanus Aas

Üliõpilaskood: 176869AAAM

Juhendaja: Ants Kallaste, vanemteadur

Tallinn 2019

## 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.

“.....” ..... 2019

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 2019

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....2019

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Jaanus Aas

*Lõputöö liik:* Magistritöö

*Töö pealkiri:* Magnetilise siduri rakendusvaldkonnad ja projekteerimine

*Kuupäev:* 24.05.2019

72 lk

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* vanemteadur Ants kallaste

*Töö konsultant (konsultandid):* Hans Tiismus

*Sisu kirjeldus:* Töö eesmärgiks on uurida püsिमagnetsidurite rakendusvaldkondi, üks magnetsidurite tüüpidest projekteerida ja metalli 3D printeriga valmis printida. Töös on lühidalt välja toodud rakendusvaldkonnad ja antud ülevaade püsिमagnetsidurite tüüpidest. Järgnevalt on kirjeldatud magnetite parameetreid ja kajastatud on analüütilised valemeid pöördemomendi ning jõu arvutamiseks. Seejärel on koostatud projekteeritava siduri lihtsustatud analüütiline kirjeldus, mille alusel saab leida siduri väljundsuurusi erinevate sisendväärtuste korral. Lähteandmete määramiseks on vaadeldud erinevaid püsिमagnetsiduri disaini põhimõtteid teadusartiklitest. Põhilisteks uuritavateks suurusteks on projekteeritava siduri pöördemoment ja jõud erinevatel sisendparameetritel. Seejärel on käsitletud magnetite toetusrõnga paksuse valikut vastavalt magnetite parameetritele ja optimaalse geomeetria valimist. Töös on kajastatud siduri pöördemomendi ja jõu suurused erinevate pöörlemisnurkade korral. Viimasena on toodud siduri osade 3D printimisvõimalused, puudused ja projekteeritava siduri testimisviisid.

*Märksõnad:* püsिमagnet, pöördemoment, jõud, 3D modelleerimine, 2D modelleerimine, analüütiline mudel, reluktantssidur, asünkroonsidur, sünkroonsidur, FEM, metalliprinter, 3D printimine, selektiivne lasersulatus, magnetvootihedus

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Jaanus Aas	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Magnetic clutch applications and design	
<i>Date:</i> 24.05.2019	<i>72 pages</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> senior research scientist Ants Kallaste	
<i>Consultant(s):</i> Hans Tiismus	
<p><i>Abstract:</i> The purpose of this thesis is to study the applications of permanent magnet clutches. Design and print one of them with 3D metal printing. The thesis briefly describes the fields of application and gives an overview of the types of permanent magnet clutches. Brief description about magnetic physics. Next there are analytical formulas for calculating torque and force. A simplified analytical description of the clutch is then prepared, based on which the clutch outputs can be found for different input values. Various permanent magnet clutch design principles from scientific articles have been considered to determine the source data. The main studied dimensions are the cogging torque and force of the clutch with different input parameters. Next the magnet support ring thickness is chosen with permanent magnet parameters. Also, good geometry is found. The clutch cogging torque and force dimensions with different rotation angles are reflected in the work. Lastly the possibilities and drawbacks of 3D metal printing of the clutch parts and the design of the clutch are presented.</p>	
<p><i>Keywords:</i> cogging torque, synchronous clutch, asynchronous clutch, reluctance clutch, FEM, 3D metal printing, selective laser melting, magnetic flux density, 2D modeling, metal printer, 3D printing 3D modeling, permanent magnet, analytical model, force</p>	

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	<b>Magnetilise siduri rakendusvaldkonnad ja projekteerimine</b>
Lõputöö teema inglise keeles:	<b>Magnetic clutch applications and design</b>
Üliõpilane:	<b>Jaanus Aas, 176869AAAM</b>
Eriala:	<b>Energiamuundus ja juhtimissüsteemid</b>
Lõputöö liik:	<b>magistritöö</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Ants Kallaste, vanemteadur</b>
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	<b>24.05.2021</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>24.05.2019</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Lõputöö teemaks valiti magnetiliste sidurite rakendusvaldkonnad ja projekteerimine, sest füüsiliselt eraldatud ülekandesüsteemid on arenev valdkond. Need suurendavad töökindlust uutel seadmetel ja muudavad seadmed hooldevabamaks. See teema annab võimaluse projekteerida ülikoolile töötav prototüüp, mida saavad tudengid uurida ja selle peal katseid läbi viia.

## 2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on uurida magnetiliste sidurite rakendusvaldkondi ja projekteerida valmis prototüüp.

## 3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Uurida, milliseid magnetilisi sidureid eksisteerib,
- Uurida, kuidas määratakse magnetiliste sidurite parameetreid,
- Selgitada, kuidas määrata magnetiliste sidurite poolt tekitatud jõud ja pöördemoment,
- Uurida, millised piirangud tekivad siduri projekteerimisel,
- Teostada magnetilise siduri projekteerimine,
- Teha järeldused.

## 4. Lähteandmed

Lähteandmed tulevad juhendajalt ja disainitava siduri mõõtudele seab piirangud metalli 3D printer. Metalli 3D printeri maksimaalne prinditav diameeter on 70 mm ja kõrgus 75 mm.

## **5. Uurimismeetodid**

Kõigepealt tehakse teoreetilised arvutused kirjanduse baasil, seejärel modelleerimine (tehnilise joonise tegemine) ja lõpuks praktilise osa tegemine ning katsetamine.

Metoodika põhineb arvutustel, katsetel ja modelleerimisel. Modelleerimine toimub lõplike elementide meetodil 3D modelleerimisprogrammis. Prototüübi disaini aitavad modelleerida ja analüüsida programmid Autocad, FEMM ja Comsol Multiphysics.

## **6. Graafiline osa**

Graafiline osa koosneb põhiliselt graafikutest, mudelitest, analüüside tulemustest, joonistest ja prototüübi piltidest. Enamus graafiline osa on põhiosas.

## **7. Töö struktuur**

SISSEJUHATUS

1. MAGNETILISED SIDURID

2. PÜSIMAGNETSIDURI TOPOLOOGIA

4. PÜSIMAGNETSIDURI PROJEKTEERIMINE

5. PRAKTILINE OSA

KOKKUVÕTE

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

LISAD

## **8. Kasutatud kirjanduse allikad**

Teadusartiklid, raamatud, internet

## **9. Lõputöö konsultandid**

Hans Tiismus

## **10. Töö etapid ja ajakava**

1. Arvutuste tegemine, modelleerimine ja FEM analüüs märtsis.
2. Praktiline kokkupanek mais.
3. Juhendajale läbilugemiseks saatmine mais.
4. Lõplik versioon valmis ja välja printitud 24 mai.

# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT.....	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	5
EESSÕNA.....	9
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU .....	10
SISSEJUHATUS .....	11
1. MAGNETILISED SIDURID .....	13
1.1 Rakendusvaldkonnad .....	13
1.2 Sünkroonsidur .....	15
1.3 Reluktantssidur .....	20
1.4 Asünkroonsidur .....	21
1.5 Püsimagnetsidurite analüüs .....	23
2. MAGNETILISE SIDURI TOPOLOOGIA.....	25
2.1 Magnetväli ja selle tekitamine .....	25
2.1.1 Püsimagnetmaterjalide omadused .....	26
2.2 Magnetite tüübid ja võrdlus.....	28
2.3 Magnetvoog ja jõud .....	29
2.4 Analüütilised arvutusvalemid.....	34
3. MAGNETILISE SIDURI PROJEKTEERIMINE.....	35
3.1 Lähteandmed .....	35
3.2 Analüütilised arvutustulemused .....	36
3.3 Magnetite valik.....	39
3.4 Reluktantssiduri 2D FEM modelleerimine.....	39
3.5 Reluktantssiduri 3D modelleerimine.....	45
3.6 Reluktantssiduri 3D analüüsimine.....	47
4. PROTOTÜÜBI VALMISTAMINE.....	56
4.1 Prototüübi parameetrite valik.....	56
4.2 Mootori valik .....	56
4.3 Prinditava metalli omadused .....	57
4.4 Metall 3D printimisprotsess .....	58
4.5 Kokkupanek.....	61
4.6 Testimine.....	61

KOKKUVÕTE .....	63
SUMMARY .....	65
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	67
Lisa 1 Valitud mootori parameetrid.....	70
Lisa 2 Valitud mootori mõõtmed .....	71
Lisa 3 Momendi, jõu tabel sõltuvuses mehaanilisest nurgast .....	72



## EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema pakkus välja Elektroenergeetika ja mehaanika instituudi vanemteadur Ants Kallaste. Prototüübi 3D printimine ja vaadeldavad katsed on läbi viidud Tallinna Tehnikaülikooli õppelaborites. Arvutuste koostamisel oli väga oluline koostöö lõputöö juhendajaga ja kaasjuhendajaga, kelle näpunäideteta ei oleks töö valminud.

Tänu juhendaja ja kaasjuhendajale õppis autor väga palju magnetmaterjalidest, metall materjalide printimisest ja leidma lahendusi projekteerimisel tekkivatele probleemidele.

Autor soovikski siinkohal tänada Ants Kallastet, kes leidis aega lõputöö juhendamiseks. Veel sooviks tänada Hans Tiismust, kes aitas läbi viia prototüübi printimist ja oli väga suureks abiks lõputöö koostamisel. Lõpetuseks tänab autor veel kõiki, kes aitasid kaasa lõputöö valmimisele.

## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

$FEM$	Lõplike elementide meetod ( <i>Finite element method</i> )
$W_m$	Püsimagneti laius
$L_m$	Püsimagneti pikkus
$H_m$	Püsimagneti kõrgus
$A_{pm}$	Püsimagneti pindala
$W_s$	Magnetite vaheline kaugus
$P_l$	Lekkejuhtivus naaberpoolustel
$P_{pm}$	Püsimagneti juhtivus
$l_g$	Õhupilu laius reluktantssiduri vahel.
$P_g$	Juhtivus õhupilus
$P_s$	Lekkejuhtivus naaberpoolusele
$\Phi_g$	Õhupilu magnetvoog
$\Phi_s$	Magnetvoo leke naaberpoolustele
$\Phi_l$	Magnetvoo leke magnetite külgedele
$\Phi_{pm}$	Püsimagneti magnetvoog
$B_m$	Püsimagneti magnetvootihedus
$B_g$	Püsimagneti magnetvootihedus õhupilus
$P_{Fe1}$	Raudplokkide taga olev toetusrõngas
$P_{Fe2}$	Magnetite taga olev toetusrõngas
$B_r$	Jääkvootihedus
$H_{bc}$	Vootiheduse koertsitiivjõud
$\mu_r$	Suhteline magnetiline läbitavus
$H_{ic}$	Magneetuvuse koertsitiivjõud
$l$	Pikkus
$BH_{max}$	Magneti maksimaalne energiatihedus
$\Phi_r$	Magneti jääkinduktsiooni poolt tagatud summaarne magnetvoog
$F_m$	Jõud magneti ja raudploki vahel
$R_e$	Pikkus toetusrõnga keskelt magneti keskele
$P_e$	Protsendiline erinevus

## SISSEJUHATUS

Magnetilised sidureid võimaldavad jõuülekannet ilma füüsilise kontaktita. Neid võib jagada kahte suurde kategooriasse: elektromagnetsidurid, mis kasutavad magnetjõudude tekitamiseks elektrienergiat ja püsिमagnetsidurid, mis töötavad püsिमagnetite jõul. Antud töös keskendutakse püsिमagnetsidurite uurimisele. Tuuakse välja püsिमagnetsidurite süsteemid, milleks on asünkroonsed, sünkroonsed ja reluktantssidurid. Kajastatakse püsिमagnetsidurite põhilised rakendusvaldkonnad ja projekteeritakse üks magnetsidur ka valmis. Püsिमagnetsidurite piiranguks on pidev magnetite tõmbejõud, mida muuta ei saa ja mis annab siduritele väiksema parameetrite muutmisevõimaluse, kui elektromagnetsidurid. Õhupilu kahe siduri vahel võimaldab ühe siduri poole eraldada välisest keskkonnast mittemagneetuva materjaliga ja selline süsteem tuleb kasuks suletud süsteemides näiteks meditsiinilistes pumpades. Magnetilised sidurid annavad pika eluea veo – ja ülekandesüsteemidele, sest sidur on hea momendi leevendi ja kaitseb süsteemi ülekoormuse eest.

Töö sisuks on püsिमagnetsiduri tööpõhimõtete ja rakendusvaldkondade uurimine, projekteerimise etapid ja projekteeritava püsिमagnetsiduri valimine, kirjeldava analüütilise mudeli koostamine, 2D ja 3D modelleerimise teel saadud andmete võrdlus ja analüüs, prototüübi valmistamine ja testimine. Töö tulemusi saab rakendada püsिमagnetsidurite optimeerimisel ja projekteerimisel. Lisaks saab valmistatud prototüüpi kasutada katsete ja erinevate analüüside läbiviimiseks laboris.

Püsिमagnetsidureid on erineva kujuga. Põhiliselt kasutatakse radiaalse ja aksiaalse magnetvooga sidureid [1]. Aktuaalseks teeb selle teema 3D ehk kolmemõõtmeline printimislahendus ja reluktantssüsteem. Antud töös on mõeldud reluktantssüsteemi all seda, et projekteeritav süsteem koosneb välja juhust ehk metallist ja mittejuhust ehk õhust. Mis tähendab, et juht tahab olla alati magnetväljas ja liigub magnetiga kaasa.

Püsिमagnetsiduri prototüübi valmistamine võimaldab kasutada metalli printimist. Metalliga 3D printimine on kiiresti arenev valdkond ning magnetilise siduri ehitamine 3D printeris võimaldab uurida ja arendada ka printimistehnoloogiat. Töös anti lühike ülevaade printimisprotsessist ja toodi välja positiivsed ja negatiivsed küljed. 3D printimisprotsess on hetkel veel arenemisfaasis ja on palju parameetreid, mis võivad printimise kvaliteeti mõjutada ning mille tagajärjel võib printimine ebaõnnestuda.

Eelnevalt on uuritud püsomagnetite mõju püsomagnet generaatorites, aga püsिमagnetsidureid varem Tallinna Tehnikaülikoolis uuritud pole. Küll on aga uuritud seda teemat mujal. Kõige rohkem on uuritud sünkroonset püsिमagnetsidurit, kus siduri mõlemal pool on püsिमagnetid ja asünkroonset sidurit, kus ühel pool on püsिमagnetid ja teisel pool on vaseketas. Reluktantssidurite kohta oli vähe infot ja selle kohta uurimustöid ei leitud.

Modelleerimised antud töös viidi läbi programmidega FEMM ja Comsol Multiphysics. FEMM programmiga analüüsiti siduri mudelit 2D FEM (*Finite element method*) ehk lõplike elementide meetodiga ja Comsol Multiphysics programmiga siduri mudelit 3D FEM – ga. Lisaks viidi mõlema programmiga läbi momendi ja jõu analüüsid.

Käesoleva töö seletuskirja põhiosa on jagatud nelja suuremasse peatükki. Esimene neist annab ülevaate rakendusvaldkondadest ja tööpõhimõtetest, teine vaatleb projekteerimiseks valitud siduri magnetite füüsikalist teooriat ja kirjeldavat lihtsustatud analüütilise mudeli koostamist. Seejärel kolmandas peatükis on välja toodud projekteerimise etapid ja käsitletud valitud siduri projekteerimist ja neljandas peatükis käsitletakse valitud siduri prototüübi valmistamist. Lisaks on välja toodud projekteeritavale sidurile õige võimsuse ja kiirusega valitud mootori parameetrid, dimensioonid ning 3D modelleerimise tulemuste tabel.

# 1. MAGNETILISED SIDURID

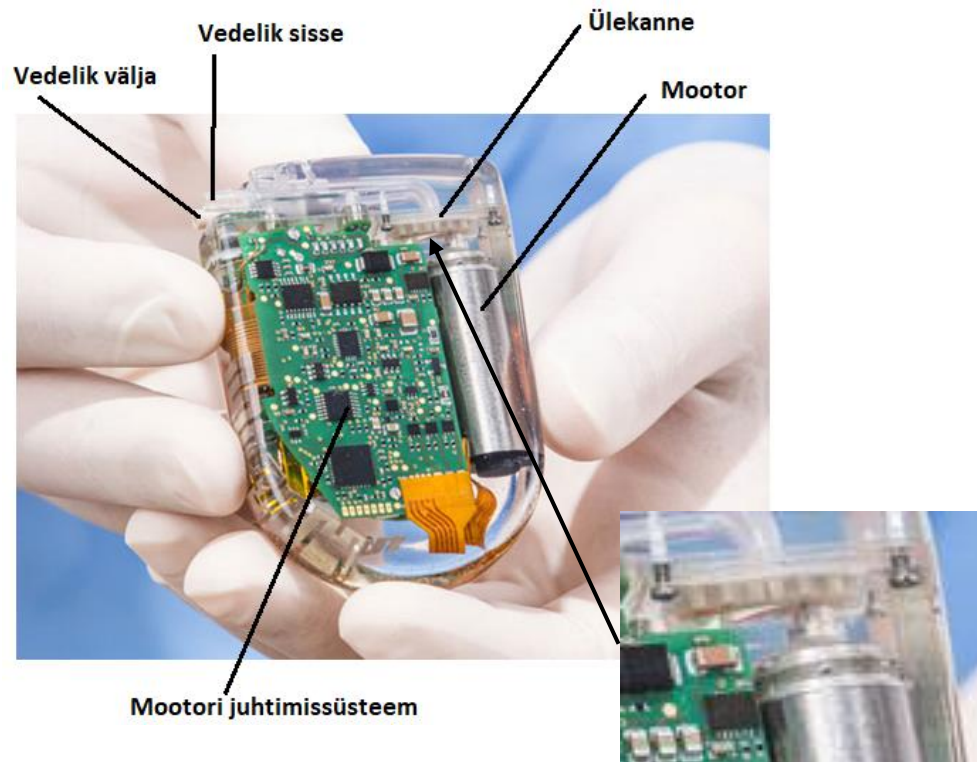
Magnetilisi sidureid kasutatakse jõu ülekandmiseks peavõllilt veetavale võllile ilma mehaanilise kontaktita. See on hea lahendus veetava süsteemi eraldamiseks välisest keskkonnast. Üks häid omadusi magnetilistel siduritel on selle kaitsevõime kaitsta võlli ülekoormuse eest ja võime taluda võlli nihkes olekut. Nad jagunevad kaheks: elektromagnetsidurid, mis kasutavad magnetjõudude tekitamiseks elektrienergiat ja püsिमagnetsidurid, mis töötavad püsिमagnetite jõul. Elektromagnetilised sidurid on keerulisemad, kui püsिमagnetsidurid ja vajavad töötamiseks välist allikat. Nende puhul on võimalik muuta siduri parameetreid ilma, et peaks disaini muutma ja on võimalik magnetilist tõmbejõudu välja lülitada. Antud töös keskendutakse püsिमagnetsiduritele ja elektromagnetsidureid ei uurita.

Põhilisteks rakendusvaldkondadeks püsिमagnetsiduritel on valdkonnad, kus veetav jõud ei ole suur. Näiteks ventilatsioonisüsteemid, kus on vaja eraldada veetav võll välisest keskkonnast. Veel on selline sidur kasulik meditsiini pumbasüsteemides, et tagada pumba tiiviku täielik isoleeritus. Püsिमagnetsiduri põhilised komponendid on allikas, juht ja tugi. Allikaks on magnetid ja juhid on magnetvoogu juhtivad metallist toetusrõngad, mis on magnetite taga. Toed aitavad kinnitada toetusrõngaid võlli külge. Püsिमagnetsidurite süsteeme on kolm: asünkroonsed sidurid, sünkroonsed sidurid ja reluktantssidurid.

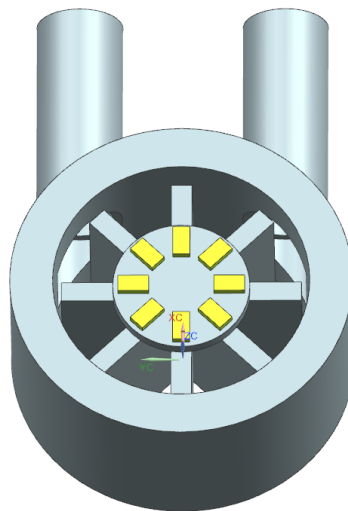
## 1.1 Rakendusvaldkonnad

Püsिमagnetsidurite eesmärk on eraldada mootor veetavast süsteemist, et säiliks mootori jahutus ja oleks võimalik veetav süsteem täielikult isoleerida välisest keskkonnast. See muudab lihtsamaks mootori probleemide analüüsimise ja rikke korral kergema mootori vahetuse, ilma et peaks kinnist ja isoleeritud süsteemi laiali võtma. Näiteks üks valdkondadest, kus sellist süsteemi saab rakendada on meditsiin. Siduritega on võimalik tagada jõu ülekande ilma füüsilise kontaktita. Joonisel 1.1.1 on näha, et pumpamissüsteemi isoleeritud korpust läbib mootori võll, mis võib pikapeale kuluda ja hakata lekkima. Selle asemel saaks kasutada püsिमagnetsidurit, mis asendaks praegust füüsilist ülekannet ja parandaks seadme töökindlust.

Joonisel 1.1.2 on toodud illustreeriv mudel, milline võiks välja näha magnetsiduril töötav pump. Kinnises ruumi osas asub siduri üks pool ja kinnise korpuse teisele poolele paigaldatakse mootor. Nii on võimalik vältida igasuguseid lekkeid ja tagada hea mootori jahutus.



Joonis 1.1.1 Pumbasüsteem meditsiinilise eesmärgi jaoks, paremal on toodud suurendatud pilt pumbasüsteemi ülekandest [2]

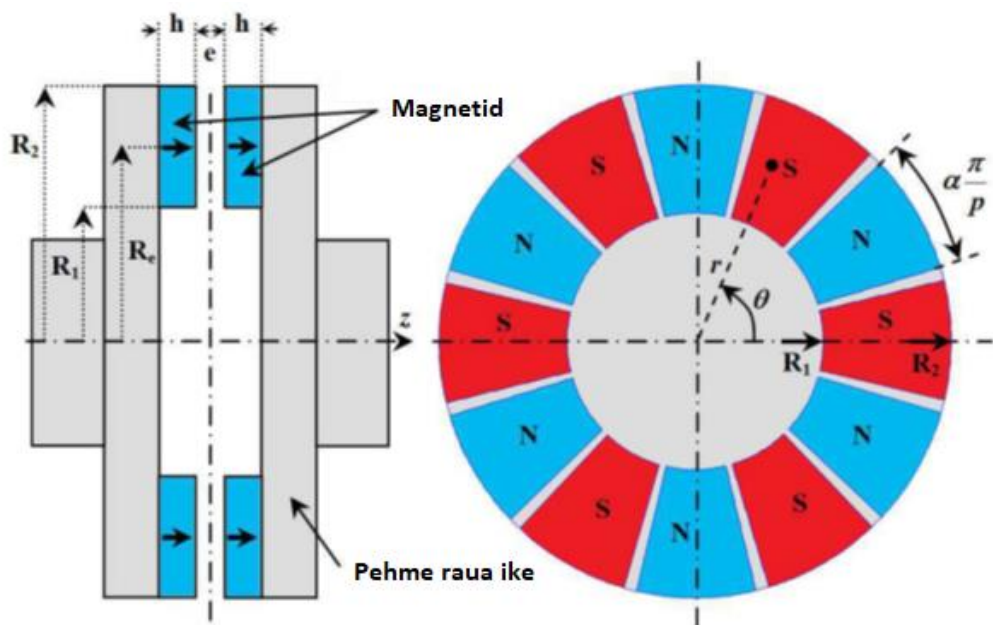


Joonis 1.1.2 Konstrueeritud pumbasüsteem NX modelleerimisprogrammiga

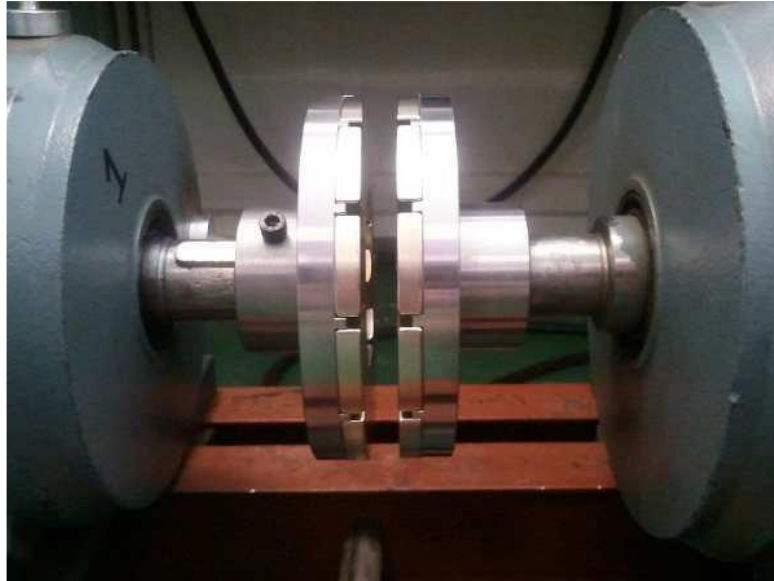
Teiseks põhivaldkonnaks, kus saab püsिमagnetsidureid kasutada on ventilatsioonisüsteemid. Selline lahendus tagab mootori ja ventilatsioonisüsteemi täieliku eralduse. Lisaks on lihtsam vahetada ventileerimissüsteemi osasid ja läbi viia parandustöid. Selliste sidurite puhul on tööiga väga pikk ja oluliselt parem kui tavalistel siduritel.

## 1.2 Sünkroonsidur

Püsिमagnetsidur koosneb kahest toetusrõngast, mille peal on sektori kujuga püsिमagnetid ja nende vahel on toetuseinad, et magnetid paremini pesas püsiksid. Magnetid on paigutatud telgjoone järgi nii, et üle ühe on põhja- ja lõunapoolus. Rauast toetusrõngad aitavad kaasa magnetvoo tekkele. Magnetite vahel tekib aheldusvoog, mis läbib sidurite vahel olevat õhupilu ja aitavad magnetvool sulguda. Kui toetusrõngad oleks mittejuhtivast materjalist, väheneks nende tõmbejõud rohkem kui poole võrra. Selleks, et leida stabiilseim olek ja parim efektiivsus on vaja täpsed teadmisi magnetvoo jaotusest õhupilus ja siduris. Magnetvoo tihedust saab hinnata analüütiliselt, kasutades lihtsustatud valemeid, mis annavad umbkaudseid tulemusi. Teine võimalus on kasutada matemaatilist lähenemist. Analüütilised meetodid vajavad tavaliselt palju vähem arvutamiseks kuluvat aega, kui 2D ja 3D mudeli matemaatilised meetodid. Matemaatilised meetodid aga pakuvad konkreetsemaid ja täpsemaid lahendusi jõu ja pöördemomendi arvutamiseks, mida saab püsिमagnetsiduri projekteerimisel kasutada. Stabiilse oleku jõudlust püsिमagnetsiduritel või magnet ülekannetel on laialdaselt uuritud kirjanduses. Praktiliste katsete kohta on infot pigem vähe. Joonisel 1.2.1 on ära toodud sünkroonse siduri geometria ja joonisel 1.2.2 on näidatud sünkroonse siduri testimise prototüüp.

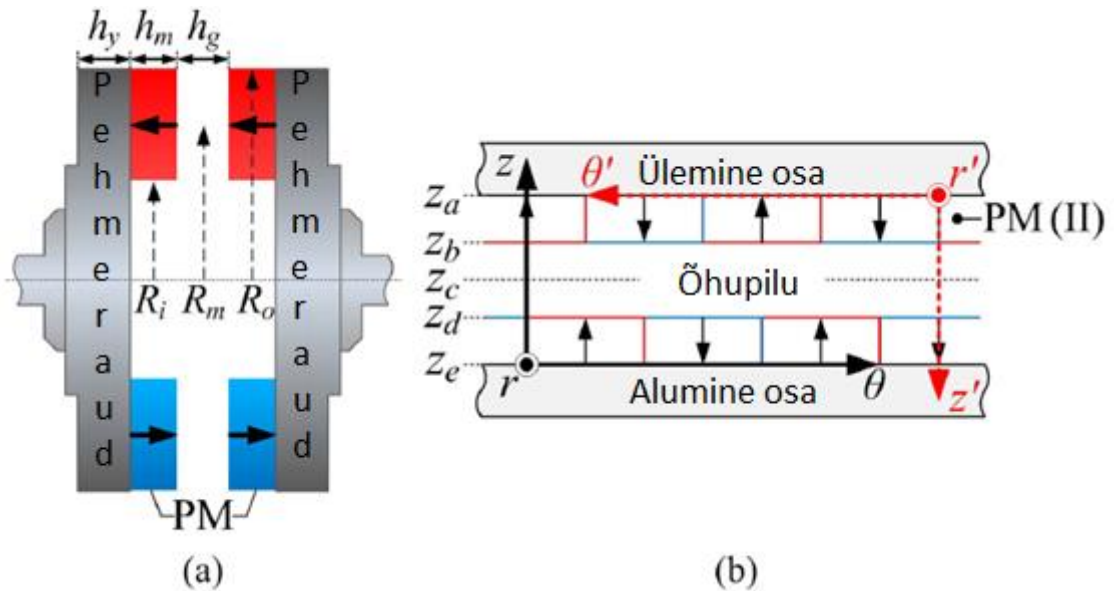


Joonis 1.2.1 Geomeetria magnetsiduril [3]



Joonis 1.2.2. Püsismagnetsiduri katsetamine laboris. Õhupilu laius on 9,5 mm antud pildil. [3]

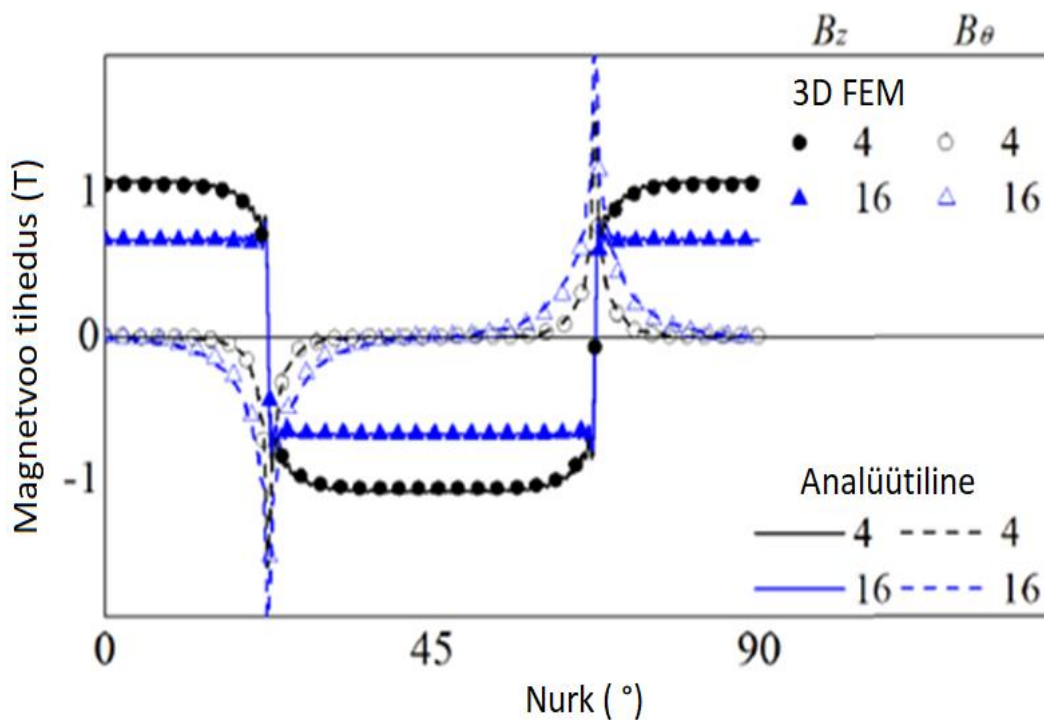
Jooniselt 1.2.3 b on näha, et püsismagnetid on nihkes. See on tingitud sellest, et üks magnet hakkab teist magnetit tagasi omaale kohale vedama, tekitades sellega momendi. Kui nihe läheb liiga suureks, hüppavad magnetid edasi, tekitades sellega vibratsioone võllil, mõjudes nii halvasti kogu süsteemile. Selle vältimiseks tuleb arvutada täpselt välja maksimaalne moment ülekandel ja vältida selle nähtuse tekkimist.



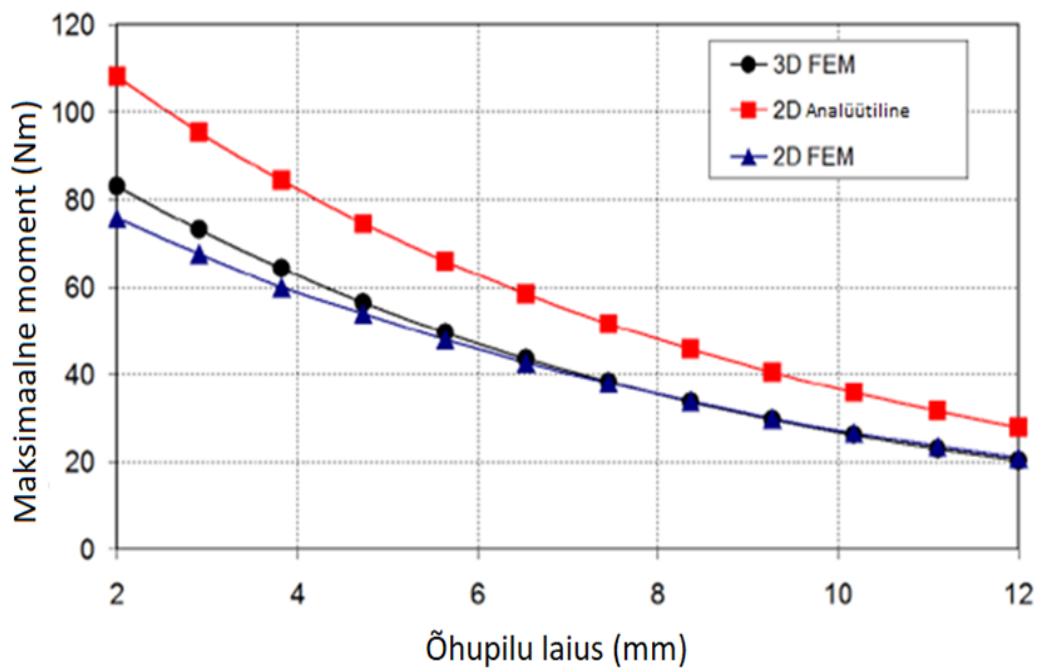
Joonis 1.2.3. Püsismagnetsiduri skeem (a) ja lihtsustatud analüütiline mudel (b) [4]



Vastavalt S. Hongi tehtud uurimisele on joonisel 1.2.4 on ära toodud kahe püsimagneti välja jõujoonte nihkenurk ehk mehaaniline nurk [4]. Mehaaniline nurk tekib, kui veetavale võlli lisada koormus. Koormus põhjustab magnetite nihkumise, mille tagajärjel tekib pöördemoment. Pöördemoment kasvab senikaua kuni on saavutatud maksimaalne võimalik moment. Sellel hetkel on ühe poole magnetid nii palju maha jäänud, et side katkeb magnetpooluste vahel ja side taastatakse jälle, kui õiged magnetpoolused ühtivad. Selline hüppamine põhjustab suuri vibratsioone ja on kogu süsteemile kahjulik. Thierry Lubin on uurinud erinevate arvutusmeetoditega pöördemomenti, mis on toodud joonisel 1.2.5 [3]. Analüütilise arvutusmeetodi puhul on väljundparameetrid kõige suuremad, aga ka kõige ebatäpsemad. Kõige täpsemad tulemused saab leida 2D ja 3D lõplike elementide meetodiga.

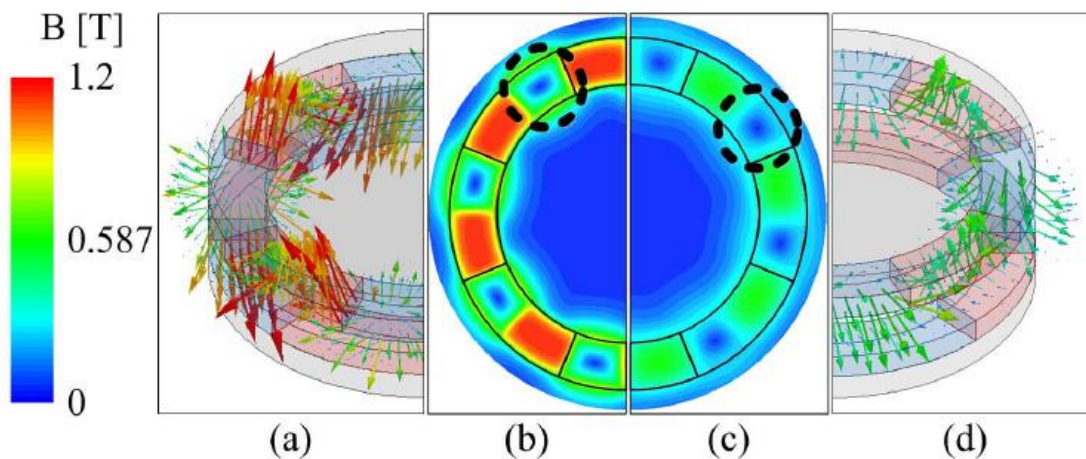


Joonis 1.2.4 Magnetvälja muutus sõltuvalt mehaanilise nurga järgi [4]



Joonis 1.2.5 Õhupilu laiuse muutuse mõju momendile [3]

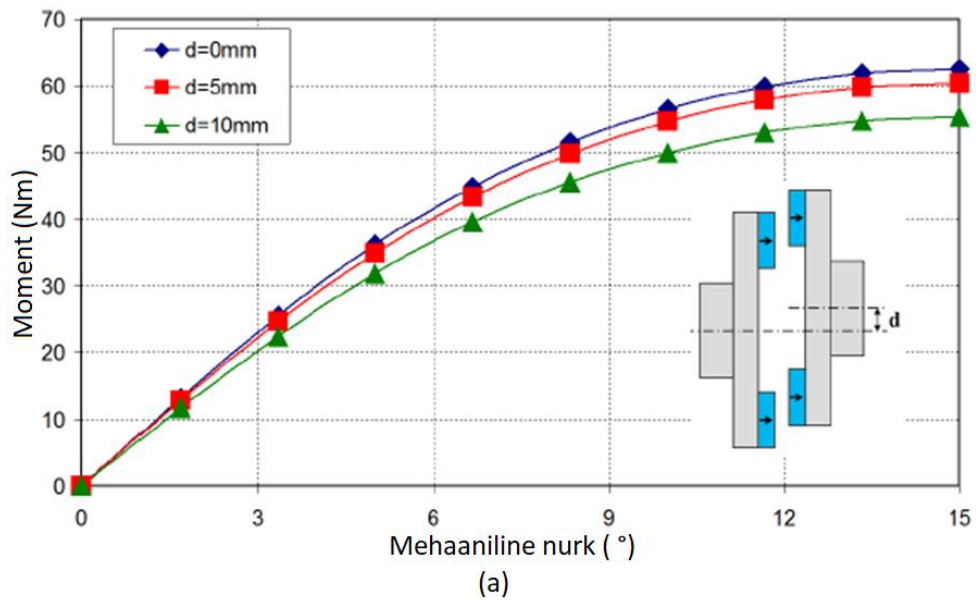
Joonisel 1.2.6 on visuaalselt ära toodud õhupilu laiuse muutus ja kuidas see mõjutab magnetvoogu kahe magnetsiduri ketta vahel. Pildid b ja c näitavad, et mida väiksem on õhupilu, seda ühtsem on magnetvoog siduris. Pildil d on näha suurt puistevoogu suure õhupilu tõttu.



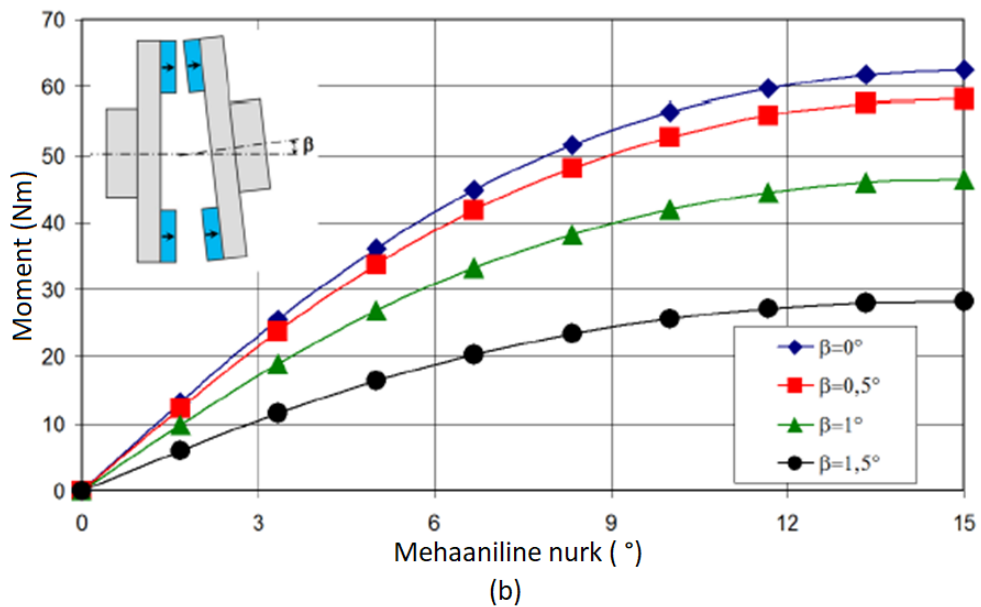
Joonis 1.2.6 3D FEM analüüsi tulemused maksimaalse momendiga. a) Vektorite suund, kui õhupilu laius on 4 mm, b) Magnetvoo jaotus, kui õhupilu laius on 4 mm, c) Vektorite suund, kui õhupilu laius on 16 mm, d) Magnetvoo jaotus, kui õhupilu laius on 16 mm. [4]

Thierry Lubin on lisaks uurinud, kuidas erinev mehaaniline nurk mõjutab jõuülekannet siduril, kui on tekitatud kõrvalekalle (joonis 1.2.7a) ja kuidas erinev mehaaniline nurk mõjutab jõuülekannet siduril, kui õhupilu laius ei ole staatiline (joonis 1.2.7b) [3].

Lisaks on joonistelt 1.2.7a ja b näha, et nihe  $y$ -telje suunas avaldab oluliselt väiksemat mõju momendile kui nihe  $x$ -telje suunas.



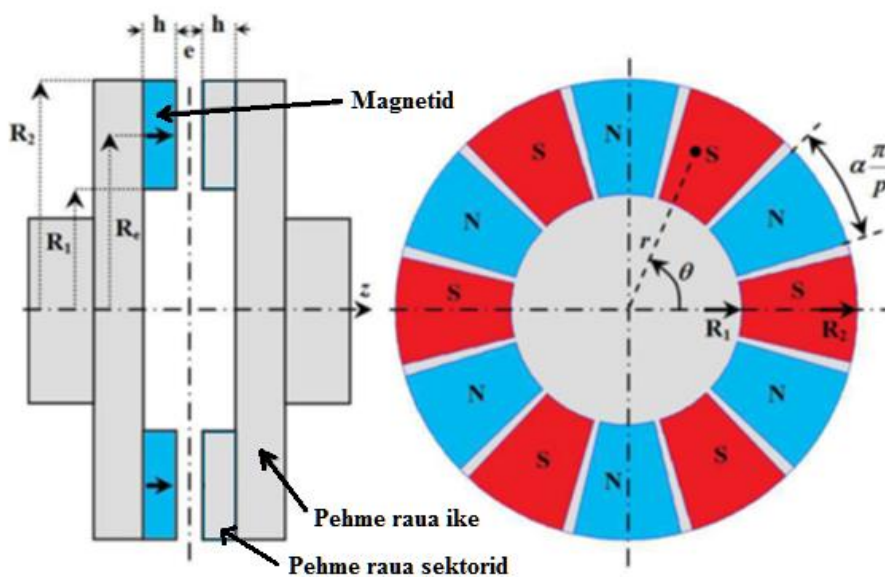
Joonis 1.2.7a Momendi sõltuvus mehaanilisest nurgast, kui on tekitatud kõrvalekalle [3]



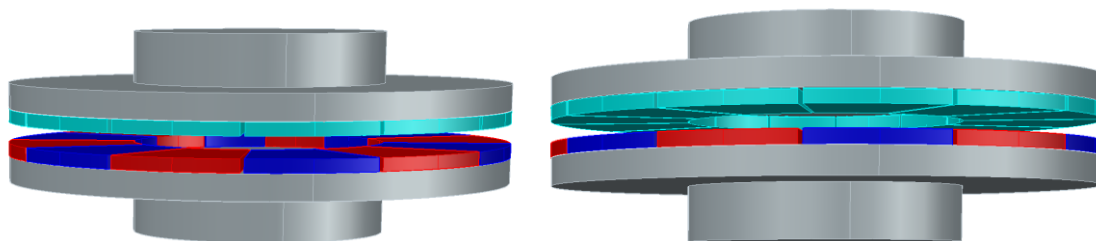
Joonis 1.2.7b Momendi sõltuvus mehaanilisest nurgast, kui on tekitatud dünaamiline õhupilu muutus [3]

### 1.3 Reluktantssidur

Reluktantssidur koosneb kahest toetusrõngast, millel ühel pool on sektori kujuga püsिमagnetid ja teisel pool ferriitmaterjalist (nt pehme raud) tehtud sektorid. Mõlemad siduri pooled on omakorda eraldatud väikse õhupiluga. Joonisel 1.3.1 on ära toodud reluktantssiduri geomeetria ja joonisel 1.3.2 3D mudel sidurist. Magnetid on paigutatud telgjoone järgi, et üle ühe on põhja- ja lõunapoolus vahelduvad sektori kaupa. Siduri teisel pool on paigutatud rauast plokid vastavusse magnetitega. Toetusrõngad aitavad kaasa magnetvoo juhtimisele. Reluktantssiduri parameetrite leidmiseks saab kasutada analoogseid analüütilisi ja matemaatilisi valemeid, mida on kasutatud sünkroonse siduri parameetrite leidmiseks. Reluktantssiduris hakkavad poolused vahetuma peale maksimaalse momendi ületust. See juhtub ühe magneti ja raudploki vahel kui aheldusvoog katkeb ja raudplokk hüppab naabermagnetiga aheldusvoogu. Sel hetkel poolused vahetuvad ja see põhjustab vibratsioone. Need vibratsioonid on küll väiksemad kui sünkroonsel siduril, aga endiselt kahjulikud mootori laagritele ja veetavale süsteemile. Selle nähtuse likvideerimiseks tuleb suurendada raadiust või kasutada võimsamaid magneteid.



Joonis 1.3.1. Geomeetria reluktantssiduril [3]

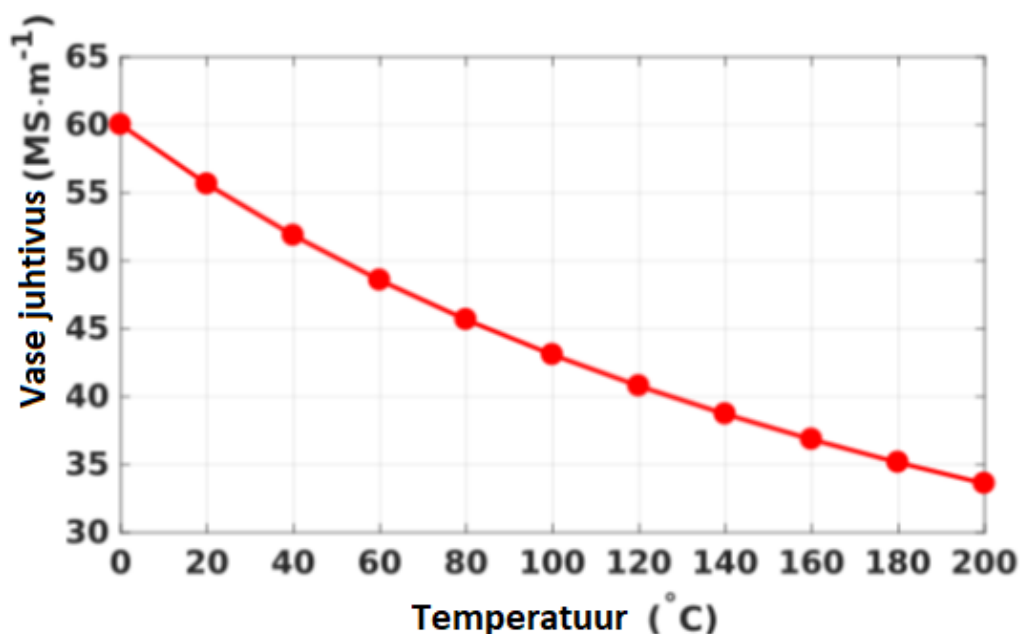


Joonis 1.3.2 3D mudel reluktantssidurist

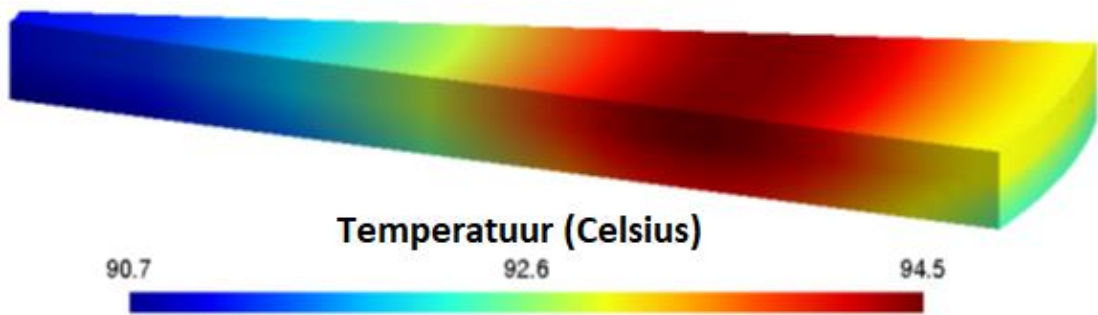
## 1.4 Asünkroonsidur

Asünkroonsidur koosneb toetusrõngast, magnetitest ja vasekettast. Pöörlevad magnetid indutseerivad vaskplaadis pöörisvoolud. Pöörisvoolud tekivad sellepärast, et vedava võlli  $N_1$  ja veetava võlli  $N_2$  kiiruse vahel on libistus.  $N = N_2 - N_1$  [4]. Pöörisvoolud vases tekitavad magnetvälja ja vaseketas liigub magnetitega kaasa. Magnetitega poole kiirus on suurem ja vaseplaadi poolel väiksem, sellepärast kutsutaksegi seda sidurit asünkroonseks siduriks. Pöörisvoolud põhjustavad ja pöörisvoolu kadusid ja mida suuremad on kaod seda väiksemaks siduri moment läheb [5]. Kaod sõltuvad temperatuurist ja pöörlemiskiirusest.

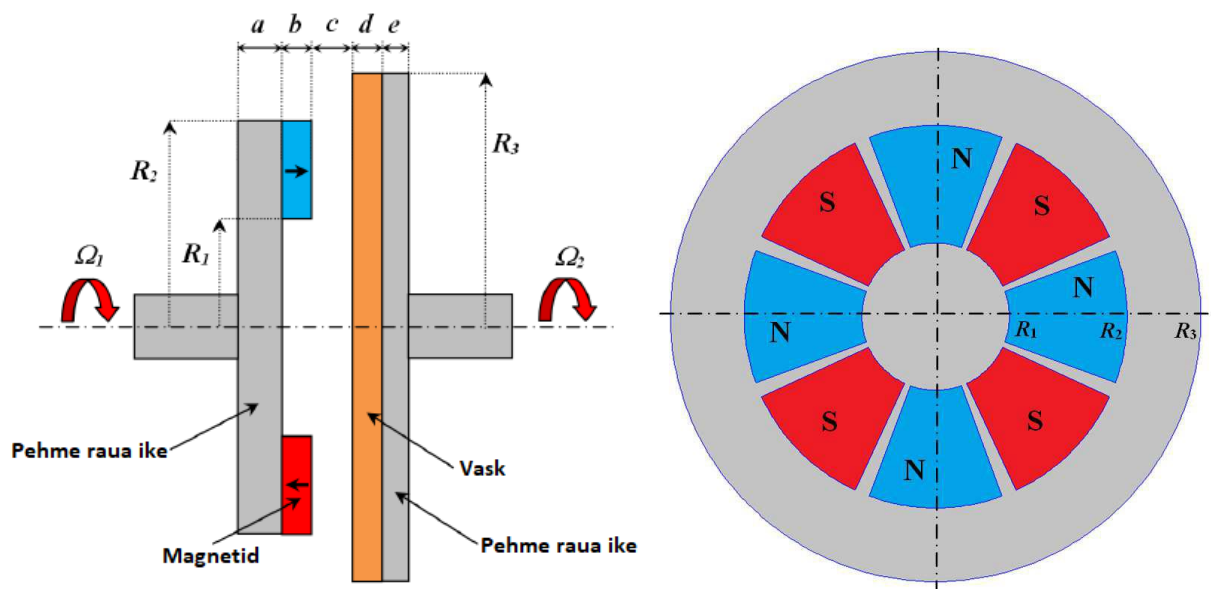
J. Fontchastagneri on uurinud, kuidas temperatuuri muutumisel vase juhtivus väheneb ja kaod suurenevad, mis on ära näidatud ka joonisel 1.4.1 ja joonisel 1.4.2 on näidatud temperatuuri jaotus vaskplaadis [6]. Voolu tekkel on ka positiivne mõju, see aitab pehmenendada käivitusel tekkivat momenti ja järske kõikumisi. Joonisel 1.4.3 on näidatud läbilõige mõlemast liikuvast võlliosast, mille ühel poolel on püsimagnetid, teisel poolel vaseketas ja vahel õhupilu. Püsimagnetid on liimitud rauast toetusrõnga külge.  $R_3$  raadius on valitud tunduvalt suurem, kui  $R_2$ . See on suurem, kuna see aitab tagasi tulevate voolude mõju vähendada ja sellega kahandada kadusid siduris.



Joonis 1.4.1 Vase juhtivus temperatuuri muutumisel [6]

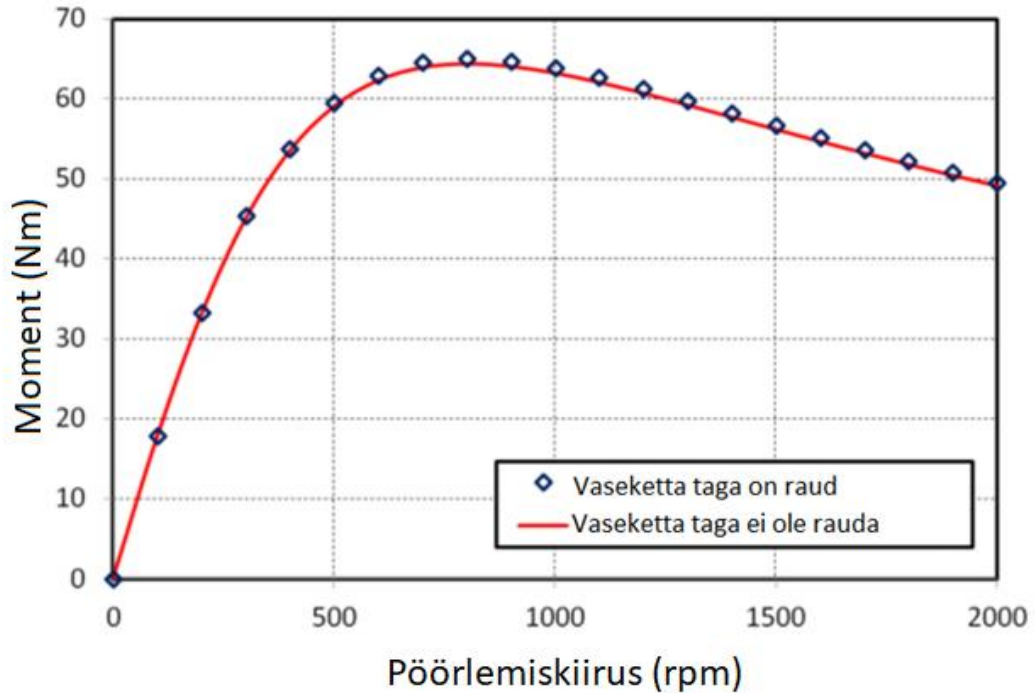


Joonis 1.4.2 Temperatuuri jaotus ühes sektoris [6]



Joonis 1.4.3 Asünkroonsiduri geomeetria [6]

Joonisel 1.4.4 on uuritud A. Rezzougi poolt, kuidas pöörlemiskiirus mõjutab asünkroonsiduri momenti väljajuhiga ja ilmavälja juhita vaseketta taga [7]. Graafikult on näha, et vaseketta taga olev väljajuht ei anna olulist mõju momendile. Õhupilu laius on 1mm ja magneteid on 8.



Joonis 1.4.4 Asünkroonsiduri momendi sõltuvus pöörlemiskiirusest [7]

## 1.5 Püsimagnetsidurite analüüs

Püsimagnetsidurid on tavasiduritest paindlikumad nihetele ja nurga all töötamisele, kuna puudub füüsiline kontakt. Momenti on võimalik vähendada ja suurendada vastavalt vähendades või suurendades õhupilu laiust.

Püsimagnetsiduritest kõige lihtsam on valmistada asünkroonseid sidureid. Selle siduri teeb lihtsaks väike komponentide ja magnetite arv ning lihtsam geomeetria. Magnetid on vaja paigutada ainult ühele siduri poolele ja teine pool on koosneb ainult vasest kettast. Asünkroonsidur on teistest siduritüüpidest kõige sujuvam. Vibratsiooni ja kiiruse kõikumisi on kõige vähem ja tagab stabiilsuse. Sellist tüüpi siduri miinuseks on väiksem kiirus kui allikal ja temperatuurid tõusevad momendi kasvades. Temperatuur kasvu põhjustavad vasekettas indutseeritavad pöörivoolud. Asünkroonsidur peab tunduvat suuremate mõõtmetega olema, et saavutada samasugust momenti, mida tekitab sünkroonsidur. Asünkroon- siduril pöördemomendi suurenemisel väheneb veetava võlli kiirus. See on väga kriitiline miinus süsteemides, kus kiirus on tähtis.

Sünkroonsiduril on võimalik tekitada kõige suurem moment kõige väiksemate mõõtmetega. Sellist tüüpi sidur on hästi kompaktne ja võimekas. Ei ole kiiruse kadusid, ega ka vooluga seotud kadusid, sest sellel mõjuvad ainult magnetilised jõud. Sünkroonsidur on ka kõige kallim kolmest sidurist, sest mõlemal siduri poolel on püsिमagnetid. Sellise siduri miinuseks on kõige suurem vibratsioon, mis on põhjustatud vastaspoole magnetite vahetusega. Sünkroonsiduril on ka kõige suurem magnetvälja mõju välistele objektidele ning suur magneti tõmbejõud, mis mõjub laagritele halvasti.

Reluktantssiduril on võimalik saavutada sünkroonkiiruse ülekanne odavama lahendusena kui sünkroonsiduril. Sellist sidurit on odavam valmistada, sest ainult ühel pool on magnetid. Teisel siduri poolel on raudplokid. Miinuseks on siduri tootmine, kuna raudplokid peavad olema võimalikult lähedal toetusrõngale, et ei tekiks lisatakistusi magnetvoole. Kõige parem on keevitada raudplokid toetusrõnga külge. Reluktantssidur peab olema ka suurem, et saavutada sama momenti sünkroonsiduriga. Sidur koosneb ainult magnetitest ja rauast ning see teeb sellise siduri ka kõige odavamaks tootmisel.

Lõputöö raames valitakse projekteerimiseks reluktantssidur, sest sellise siduri kohta on kõige vähem teadusliku tausta ja seda on kõige odavam toota. Prototüübi valmistamiseks saab kasutada metalli 3D printimist, mis aitab kaasa sellist tüüpi printimise arendamisele ja materjalide analüüsimisele.



## 2. MAGNETILISE SIDURI TOPOLOOGIA

Püsिमagnetsiduri kõige tähtsamad komponendid on magnet, väljajuht ja kinnitustoad. Suure tähtsusega on teotusrõngaste materjal. See materjal peab magnetväljas omandama magnetilised omadused. Mida paremini omandab teotusrõngaste materjal magnetvälja, seda efektiivsem on püsिमagnetsidur. Arvestada tuleb ka rõngaste paksusega. Nad peavad olema piisavalt paksud, et magnetvootihedus ei ületaks metalli küllastuspiiri. Küllastuspiiri ületamisel väheneb moment kiiresti ja sidur muutub ebaefektiivseks.

Magneteid on erineva kuju ja võimusega. Magnetilise siduri puhul on tähtis, et magnet oleks võimalikult kompaktne ja oleks suure magnetvootihedusega. Teaduslikest artiklitest selgus, et kõige parem magnet sidurile on trapetsikujuline. Nendega on võimalik katta ära kõige suurem ala ja magnetid jäävad üksteisest optimaalsesse kaugusesse, et ei tekiks ebavajaliku puistevoogu. Sellise kujuga magnetid on erilised ja tavalistes poodides raske leida. Neid magneteid on võimalik tellida eritellimusena, aga see võtab kaua aega. Üldiselt on magnetid ringi-, ploki-, ketta- või silindrikujulised. Selleks, et anda parem ülevaade magnetitest, räägitakse järgmistes alampeatükkides magnetite füüsikast ja tuuakse välja erinevad magnetmaterjalide tüübid ning nende erinevused.

### 2.1 Magnetväli ja selle tekitamine

Magnetmaterjalidena kasutatakse põhiliselt ferromagnetikuid. Nendel materjalidel on võime magnetväljas magnetiseeruda. Magnetvälja allikad on looduses põhiolemuselt dipolaarsed, mis tähendab, et neil on lõuna- ja põhjapoolus. Magnetvälja jõujooned on kinnised ja väljasuund on kokkuleppeliselt võetud magneti põhjapoolusest lõunapooluseni.

Magnetiline induktsioon ehk magnetiliste jõujoonte tihendus või suund on defineeritud Lorentsi jõu seadusest ja nimelt liikuva laengule  $q$  mõjuvast jõust  $F$ : [8]

$$F = q \cdot v \cdot B \tag{2.1.1}$$

Kus,

$v$  on laenguliikumise kiirus,

$B$  on magnetvootihedus.

Väikseim magnetiline induktsiooni ühik on gauss 1G. 1T võrdub 10000G.

### 2.1.1 Püsimagnetmaterjalide omadused

Magnetiseeritud materjalidest tekkinud magnetvälja kirjeldamiseks on kasutusele võetud suurus, mida kutsutakse magnetvälja tugevuseks  $H$  ja ühik on  $\frac{A}{m}$ . See on väärtus, mis üheselt määrab väliste voolude poolt tekitatud magnetilise mõju aines ilma aine enda magnetilise mõjuta. Määratakse võrdusega [8]:

$$H = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{B_0}{\mu_0} - M \quad (2.1.1.1)$$

Kus,

$B_0$  on väline magnetiline induktsioon,

$\mu_0$  on vaakumi magnetiline läbitavus

$M$  on materjali magneetumus.

Summaarne magnetväli  $B$  magnetilises keskkonnas on antud valemiga: [8]

$$B = \mu_0 \cdot (H + M) = B_0 + \mu_0 M \quad (2.1.1.2)$$

Kus,

$B_0$  on välise allika magnetiline induktsioon,

$\mu_0 M$  on materjali magneetumusest tingitud magnetiline induktsioon.

Olenevalt vastupanust väliselt rakendatud magnetväljale jagunevad materjalid järgmiselt: diamagnetism, paramagnetism, ferromagnetism. Selleks, et seletada lahti magnetismi liigid, on vaja teada, mis on domeenid. Domeenid koosnevad aatomitest, millel on magnetväli ja mis üritavad orienteeruda samasuunaliselt. Püsimagneti pooleks murdmisel ei saa me eraldi põhja – ja lõunapoolust vaid kaks eraldi väiksemat magnetit. See näitab, et magnet koosneb väikestest samasuunalistest magnetitest ehk domeenidest. Tavaliselt on domeenid ruumis orienteeritud kaootiliselt ja summaarne väli on väga väike. Kui domeenid satuvad välisesse magnetvälja, sunnib see domeene sama suunda võtma, mis on magnetväljal ja sellest tulenevad ka erinevad materjali tüübid.

Ferromagnetism tähendab, et domeene on võimalik väikese välise jõuga samasse suunda saada ja magnetilisi omadusi säilitada. Selliseid materjale on lihtne magnetiseerida ja magnetilised omadused jäävad püsima. Sellised materjalid on näiteks nikkel, raud ja koobalt. Paramagnetismi puhul võtavad domeenid magnetväljaga sama suuna ja võimendavad välist magnetvälja. Need omadused kaovad, kui väli eemaldada.

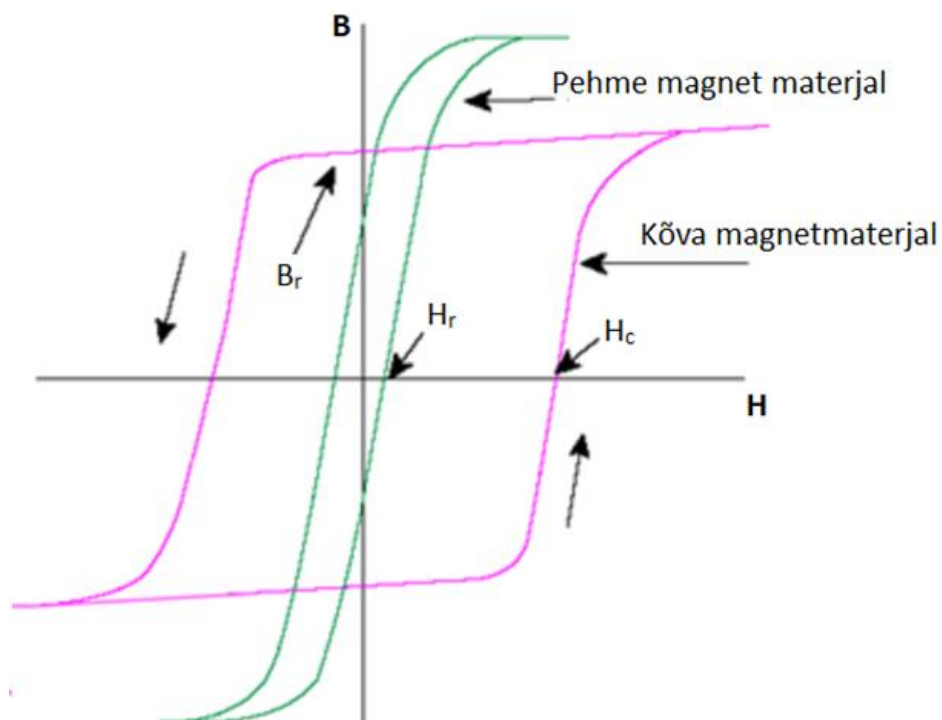
Dimagnetismi puhul hakkab materjal välise magnetvälja toimet vastu töötavat magnetvälja tekitama. Välise magnetvälja ja materjali vahel tekivad samad poolused ning tekib tõukumine.

Koertsitiivsuse järgi magnetmaterjalid jagunevad kolme gruppi:

- Pehmed magnetmaterjalid,
- Kõvad magnetmaterjalid,
- Eriomadustega magnetmaterjalid.

Magnetvälja iseloomustamiseks on kaks välja:  $H$  ja  $B$ .  $H$  ja  $B$  väli esinevad alati koos ja nad on samasuunalised, kuid suuruselt erinevad. Joonisel 2.1.1.1 on ära toodud demagneetimiskõver, mis näitab magnetmaterjali magnetomadusi ja võimet vastupanu osutada teistele magnetmaterjalidele, ilma et ise kaotaks magnetilisi omadusi. Pehme magnetmaterjal kaotab hästi kiiresti oma magnetvälja, kui teda mõjutada välise magnetväljaga Kõva magnetmaterjal kannatab suurt välist magnetvälja ja ei kaota nii kiiresti oma magnetvälja.

Jääkvootihedus  $B_r$  on magnetvootiheduse väärtus, mis püsib magnetil, kui väline magnetväli puudub. Mida kõrgem on jääkvootihedus, seda suurem saab olla magnetvootihedus magnetahela õhupilus. Ühik on tesla T, kuid sageli kasutatakse mõõtühikuna ka gaussi G. [9]



Joonis 2.1.1.1 Püsिमagneti demagneetimiskõver [10]

Demagneetimiskövera järgi on võimalik määrata püsimagneti põhilised parameetrid, milleks on: jääkvootihedus  $B_r$ , magneetuvuse koertsitiivjõud  $H_{ic}$ , vootiheduse koertsitiivjõud  $H_{bc}$ , magneti maksimaalne energiatihedus  $BH_{max}$ , ning magneti suhteline magnetiline läbitavus  $\mu_r$ . [9]

Vootiheduse koertsitiivjõud ehk  $H_c$  on väärtus, mis näitab, kui suurt välist väljatugevust tuleb rakendada, et magnetiseeritud magneti vootihedus nulli viia. Magneetuvuse koertsitiivjõud ehk  $H_{ic}$  on väärtus, mis näitab, kui suurt välist väljatugevust on vaja rakendada, et magnet demagnetiseerida või täielikult magnetiseerida. Tavaliselt mõõtühikuks on amprit meetri kohta  $\frac{A}{m}$ , koertsitiivsuse mõõtmiseks ka mõõtühikut Oersted ehk Oe. 1 Oe võrdub  $\frac{1000}{4\pi} \cdot \frac{A}{m}$ . [9]

Magneti maksimaalne energiatihedus  $BH_{max}$  vastab punktile demagneetimisköveral, kus  $B$  korda  $H$  tootlikus on maksimaalne. Energiatiheduse mõõtühikuks on džauli kuupmeetris  $[\frac{J}{m^3}]$ , tihti kasutatakse ka teist ühikut gvašš – oersted (GOe). [9]

Püsimagneti suhteline magnetiline läbitavus  $\mu_r$  näitab, kui järsult  $BH$  – kõver lineaarses algusosas langeb. Tavaliselt jääb püsimagnetite suhteline magnetiline läbitavus vahemikku 1...3,5. [9]

## 2.2 Magnetite tüübid ja võrdlus

Magnetid on üheks tähtsaks komponendiks püsimagnetsiduris. Selleks, et valida välja parim magnetmaterjal projekteeritavale sidurile, tuleb neid võrrelda. Tänapäevased üldlevinud püsimagnetmaterjalid on ferriitmagnetid, AlNiCo – magnetid, SmCo – magnetid, Neodüümmagnetid. Tabelis 2.2.1 on ära toodud põhiliste püsimagnetmaterjalide võrdlus, nende plussid ja miinused ning subjektiivne hinna võrdlus.

Tabel 2.2.1 Magnetite parameetrite võrdlus [9]

Suurus	Tähis	Ühik	Ferrite, pressitud/valatud	SmCo, pressitud/valatud	NdFeB, pressitud/valatud
Jääkvootihedus, 20°C	$B_r$	$T$	0,4/0,2	1,1/0,6	1,3/0,7
Maks. energiatihedus	$BH$	$\frac{kJ}{m^3}$	20-30	100-200	200-300
Koertsitiivjõud, 20°C	$H_d$	$\frac{kA}{m}$	-200	-1000	-2000
Hind			odav	kallis	keskmine

Tabelis 2.2.2 on ära toodud erinevad magnetmaterjalid ja materjalide all erinevad tüübid, mille maksimaalne energiatootlikkus oli kõige suurem. Parimaks magnetivalikuks on neodüümmagnetid, sest neil on kõige suurem maksimaalne energiatootlikkus ja suurim jääkvootihedus.

Tabel 2.2.2 Magnetite tüübid [11]

Materjal	Tüüp	Jääkvootihedus, Br (KG)	Koertsitiivjõud, Hcb (KOe)	Maksimaalne energiatootlikkus, BHmax (MGOe)	Maksimaalne töötemperatuur
NdFeB	N45	13.2-13.8	≥11.6	43-46	80C
	N48	13.8-14.2	≥11.6	46-49	80C
	N50	14.0-14.5	≥10.0	48-51	70C
	N52	14.3-14.8	≥10.0	50-53	70C
	45M	13.2-13.8	≥12.5	43-46	100C
	48M	13.6-14.3	≥12.9	46-49	100C
	50M	14.0-14.5	≥13.0	48-51	100C
Ferrite	C10	4.0	3.617	3.51	250C
	C11	4.3	2.512	2.56	250C
SmCo	YXG30	10.8-11.0	≥9.8-10.5	28-30	300C
	YXG30B	10.8-11.0	≥5.2-5.6	28-30	300C
AlNiCo	LNGT60	9.0	1.38	7.5	550C
	LNGT72	1.05	1.4	9.0	550C

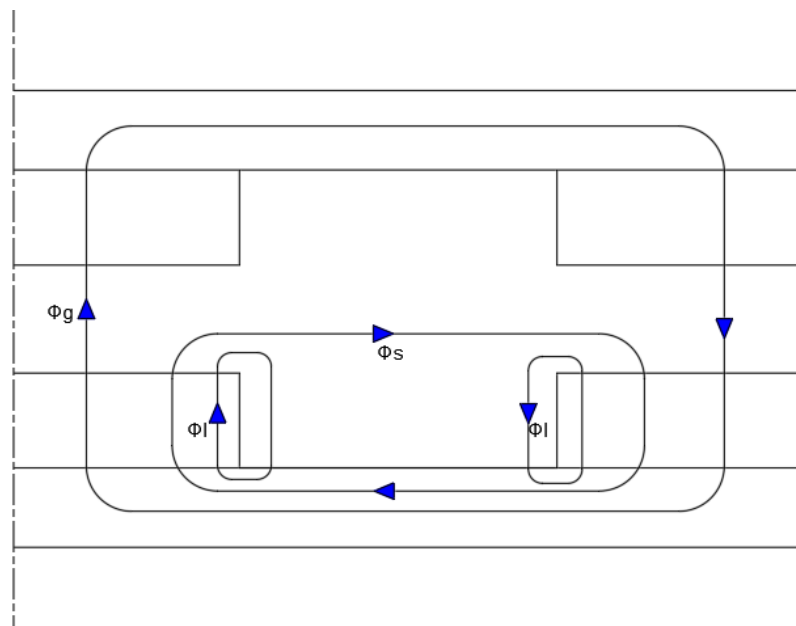
## 2.3 Magnetvoog ja jõud

Jõu arvutamine annab üldse pildi, kui suured jõud erinevate magnetmaterjalidega tekivad ja milline materjal on parim valik projekteeritavale sidurile. Selle arvutamiseks on vaja teada magnetvootihedust õhupilus ja magnetvoogu läbivat pindala. Magnetvootihedust leiti magnetahelaga läbi juhtivuste. Analüütilistes arvutustes ei ole tähtsad täpsed väärtused ja sellepärast loodi lihtsustatud mudel, kus arvestati rauda ideaalse materjalina ja raudplokkide koos rauast toetusrõngaga ühtse takistusena. Selle mudeli eesmärk on anda ülevaatlilikud tulemused, mille järgi on lihtsam edasi projekteerida.

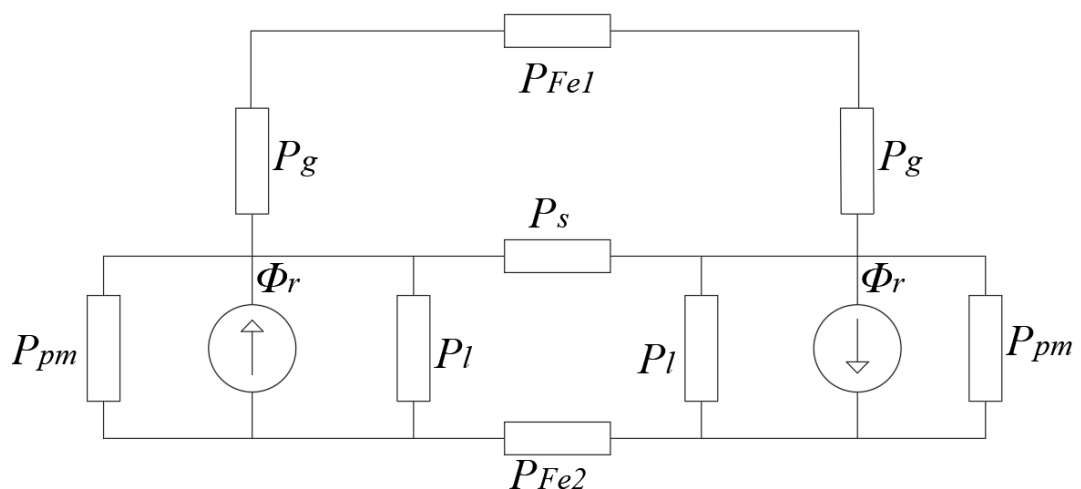
Lihtsuse mõttes vaadeldi pindu tasapinnalistena. Jõu leidmiseks on koostatud magnetvoo lihtsustatud kontuurid. Uuritakse magnetvoogude jaotumist püsिमagnetid ja pehme raua vahel. Joonisel 2.3.1 on kujutatud magnetvoogude kulgemise kontuurid lihtsustatud kujul. Alumine osa on püsिमagnetid ja toetusrõngas ning ülemine osa on raudplokid ja toetusrõngas. Magnetvoog õhupilus on  $\Phi_g$ ,  $\Phi_s$  on magnetvoo leke naaberpoolusele ja  $\Phi_l$  on magnetvoo leke magnetite külgedel.

Magnetvoogude täpsemaks analüüsimiseks rakendati magnetahela teooriat [12]. Kasutades magnetvoo lihtsustatud kontuuri, koostati lihtsustatud magnetahel magnetvooallika ja magnetjuhtivustega.

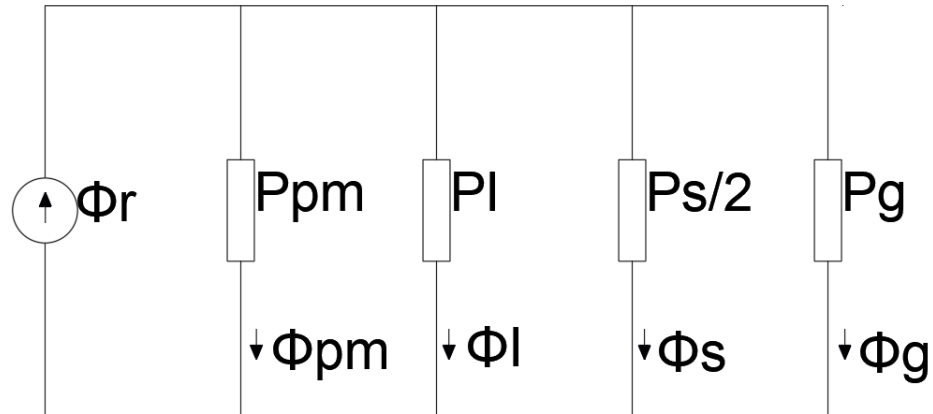
Joonise 2.3.2 magnetahelas on ära toodud juhtivused ja magnetvood reluktantssiduris. Selle ahela abil leiti õhupilu magnetvood.  $P_{Fe1}$  ja  $P_{Fe2}$  on siduri toetusrõngaste juhtivused, mille läbi sulguvad magnetvood.  $P_g$  on juhtivus õhupilus,  $P_s$  on lekkejuhtivus naaberpoolusele,  $P_l$  on juhtivuse leke magnetite külgedel,  $P_{pm}$  on püsimagneti juhtivus, Püsimagneti magnetvoog on  $\Phi_{pm}$  ja  $\Phi_r$  on magneti jääinduksiooni poolt tagatud summaarne magnetvoog. Joonisel 2.3.3 on ära toodud magnetahela juhtivuse lihtsustatud skeem, kus ei arvestata toetusrõngaste juhtivust.



Joonis 2.3.1 Magnetvood reluktantssiduris lihtsustatud kujul

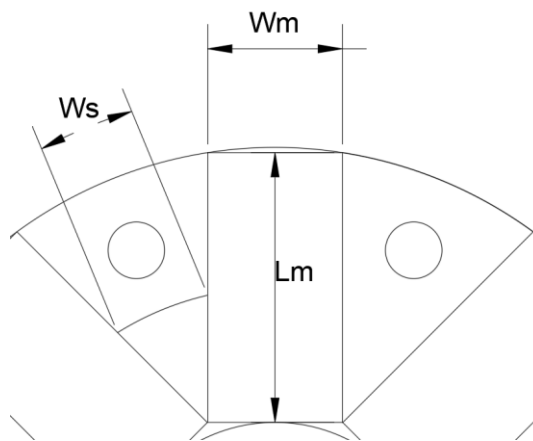


Joonis 2.3.2 Magnetahel reluktantssiduris lihtsustatud kujul



Joonis 2.3.3 Lihtsustatud magnetahel

Joonisel 2.3.4 on ära toodud mõõtude tähised. Magneti laius on  $W_m$ ,  $L_m$  on magneti pikkus ja  $W_s$  magnetite vaheline kaugus.



Joonis 2.3.4 Sektsioon reluktantssidurist

Analüütilise arvutuste jaoks vajalikud algandmed on: magneti pikkus  $L_m$ , kõrgus  $H_m$ , laius  $W_m$ , magnetite vaheline kaugus  $W_s$ , jääinduktsioon  $B_r$ , magnetiline konstant  $\mu_0$ , magnetite suhteline läbitavus  $\mu_r$ .

Alltoodud valemeid 2.3.1 – st kuni 2.3.12 kasutatakse üldise hinnangu loomiseks reluktantssiduris - kui suured jõud tekivad ja milliste parameetritega magneteid kasutada. Kõigepealt selgitati välja milline on kogu juhtivus, seejärel leiti magnetvood ja magnetvoo tihedused. Jõu arvutamiseks leiti magnetvoo tihedust ja magnetivoogu läbiv magneti pindala. Lekkejuhtivuse arvutamiseks kasutati integreeritud valemeid.

Püsimagneeti juhtivuse arvutamiseks kasutati valemit [12]:

$$P_{pm} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{A_{pm}}{H_m} \quad (2.3.1)$$

Kus,

$A_{pm}$  on püsimagneeti pindala,

$H_m$  on püsimagneeti kõrgus.

Lekkejuhtivuse arvutamiseks naaberpoolustele kasutatakse integreeritud valemit [12]:

$$P_l = \frac{\mu_0 \cdot L_m}{\pi} \int_0^{\frac{W_m}{2}} \frac{dx}{x + \frac{H_m}{\pi}} = \frac{\mu_0 \cdot L_m}{\pi} \int_0^{\frac{W_m}{2}} \frac{d \cdot \left(x + \frac{H_m}{\pi}\right)}{x + \frac{H_m}{\pi}} = \frac{\mu_0 \cdot L_m}{\pi} \cdot \ln \left(x + \frac{H_m}{\pi}\right) \Bigg|_0^{\frac{W_m}{2}} =$$

$$\frac{\mu_0 \cdot L_m}{\pi} \left[ \ln \left(\frac{W_m}{2} + \frac{H_m}{\pi}\right) - \ln \left(\frac{H_m}{\pi}\right) \right] = \frac{\mu_0 \cdot L_m}{\pi} \cdot \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot W_m}{2 \cdot H_m}\right) \quad (2.3.2)$$

Lekkejuhtivuse arvutamiseks õhupilus kasutatakse integreeritud valemit [12]:

$$P_s = \frac{\mu_0 \cdot L_m}{\pi} \int_0^{l_g} \frac{dx}{x + \frac{W_s}{\pi}} = \frac{\mu_0 \cdot L_m}{\pi} \int_0^{l_g} \frac{d \cdot \left(x + \frac{W_s}{\pi}\right)}{x + \frac{W_s}{\pi}} = \frac{\mu_0 \cdot L_m}{\pi} \cdot \ln \left(x + \frac{W_s}{\pi}\right) \Bigg|_0^{l_g} = \frac{\mu_0 \cdot L_m}{\pi} \left[ \ln \left(\frac{l_g}{2} + \frac{W_s}{\pi}\right) - \ln \left(\frac{W_s}{\pi}\right) \right] =$$

$$\frac{\mu_0 \cdot L_m}{\pi} \cdot \ln \left(\frac{l_g + \frac{W_s}{\pi}}{\frac{W_s}{\pi}}\right) = \frac{\mu_0 \cdot L_m}{\pi} \cdot \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot l_g}{W_s}\right) \quad (2.3.3)$$

Kus,

$l_g$  on õhupilu laius reluktantssiduri vahel.

Õhupilu juhtivuse arvutamiseks kasutatakse valemit [12]:

$$P_g = \mu_0 \cdot \frac{A_{pm}}{l_g} \quad (2.3.4)$$

Kogu ahela juhtivust arvutatakse valemiga [12]:

$$P_{\Sigma} = P_{pm} + P_l + \frac{P_s}{2} + P_g \quad (2.3.5)$$



Selleks, et arvutada magnetvoogusid on vaja kõigepealt leida jääkmagnetvoogu [12]:

$$\Phi_r = B_r \cdot A_{pm} \quad (2.3.6)$$

Kus,

$B_r$  on jääk magnetväli.

Püsिमagnetvoo leidmiseks tuleb kasutada valemit [12]:

$$\Phi_{pm} = \Phi_r \cdot \frac{P_{pm}}{P_{\Sigma}} \quad (2.3.7)$$

Lekkevoog magneti otstel leitakse valemiga [12]:

$$\Phi_l = \Phi_r \cdot \frac{P_l}{P_{\Sigma}} \quad (2.3.8)$$

Magnetvoo arvutamiseks õhupilus kasutatakse valemit [12]:

$$\Phi_g = \Phi_r \cdot \frac{P_g}{P_{\Sigma}} \quad (2.3.9)$$

Magnetvootiheduse leidmine püsिमagnetis [12]:

$$B_m = B_r - \frac{\Phi_{pm}}{A_{pm}} \quad (2.3.10)$$

Magnetvootiheduse leidmine õhupilus [12]:

$$B_g = B_r - \frac{\Phi_g}{A_{pm}} \quad (2.3.11)$$

Jõu arvutamine magneti ja raua vahel [12]:

$$F_m = \frac{\mu_0 \cdot B_g^2 \cdot A}{2} \quad (2.3.12)$$

Ülevalpool ära toodud jõu valemiga on võimalik arvutada jõudude summa. See annab parema ülevaate, kui suured jõud mõjuvad kahe võlli vahel ja kui suure jõuga tõmbab reluktantssidur veetavat ja vedavat võlli omavahel kokku. Sellega tuleb arvestada ka mootori valikul, sest kui jõud on liiga suur, mõjub see laagritele halvasti. Lihtsustatud arvutustes eraldi momendi arvutamiseks välja ei toodud. Piisas summaarse jõu arvutamisest, et luua üldine pilt, kuidas erinevad magneti parameetrid mõjutavad disaini.

## 2.4 Analüütilised arvutusvalemid

Kirjanduses olevad analüütilised mudelid asünkroonsidurile 3D mudelis. 3D mudeli üheks arvutamise meetodiks on Descartes'i kordinaatsüsteem. Moment ja koertsitiivjõud arvutatakse valemitega [7]:

$$M = M_z(R, \theta, t)e_z \quad (2.4.1)$$

$$M_z(R, \theta, t) = \Re\left\{\sum_{n=1}^{\infty} M_n(r)e^{jnp(\theta-\Omega t)}\right\} \quad (2.4.2)$$

$$X(R, \theta, z, t) = \Re\left\{\sum_{n=1}^{\infty} \bar{X}_n(r, z)e^{jnp(\theta-\Omega t)}\right\} \quad (2.4.3)$$

$$H_i\left(r, \frac{\pi}{2p}, z, t\right) = -H_i\left(r, -\frac{\pi}{2p}, z, t\right) \quad (2.4.4)$$

$$H_i \cdot e_r = 0, \text{ kui } r = R_3 \quad (2.4.5)$$

$$H_i \text{ on lõpmatu, kui } r = R_3 \quad (2.4.6)$$

$$B_1 \cdot e_r = 0, \text{ kui } z = 0 \quad (2.4.7)$$

$$\tau = m \times B \quad (2.4.8)$$

Kus

$\tau$  on jõud,  $m$  – magnetiline moment,  $B$  – pöördemoment

Võimalik on välja arvutada moment magnetsiduri momendi ülekandel, kui on teada poolide arv, raadiused ja magnetilise nurga nihe. Selles valemis on arvestatud keerukat püsimagneti geomeetriat, et saada täpne momendi arvutus. Allpool on toodud selle arvutamiseks valem 2.4.9 [13]:

$$T_{z(\text{total})}(\theta) = \frac{\mu_0}{4\pi} M^2 N_{pole} \left[ \frac{\pi(R_2^2 - R_1^2)}{N_{pole} N_r N_\theta} \right]^2 \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_\theta} \sum_{i'=1}^{N_r} \sum_{j'=1}^{N_\theta} \sum_{n=1}^{N_{pole}} \sum_{m=0}^2 \frac{(-1)^{(n+m)} \alpha_m r_i r_{i'} \sin(\theta_j - \theta_{j'})}{[r_i^2 + r_{i'}^2 - 2r_i r_{i'} \cos(\theta_j - \theta_{j'}) + h^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (2.4.9)$$

kus,

$N_{pole}$  on poolide arv,

$R_1$  on magneti sisemine raadius,

$R_2$  on magneti välimine raadius,

$\theta$  on magnetite suhteline nurga nihe.

### 3. MAGNETILISE SIDURI PROJEKTEERIMINE

Alguses tehti kindlaks, millised on lähteandmed ja piirangud, millega tuleb disainil arvestada. Projekteerimise käigus vastuse saavad küsimused on järgmised:

- Milline peab disain välja nägema?
- Missugune otstarve on projekteeritaval seadmel või detailil?
- Kas ja kuidas on võimalik projekteeritavat seadeldist ehitada?
- Milline on mootori moment?
- Kui suur peab siduri maksimaalne moment olema?
- Kas sidur on nihkes või paralleelselt paigutatud veetava võlliga?

Esimeses peatükis mainiti, et projekteeritavaks siduriks on reluktantssidur kuna see on odav ja võimaldab kasutada metall 3D printimistehnoloogiat. Magnetite valimisel arvestati nende pikkuse, laiuse, kõrguse, jääkindluse, koertsitiivjõu, suhtelise magnetilise läbitavuse ja maksimaalse töötemperatuuriga. Arvestati ka magnetite taga oleva pehme metalli toetusrõngastega. Paksus valiti sobiv, et vältida liigset küllastust.

Projekteerimise käigus viidi läbi kõigepealt lihtsustatud analüütilised arvutused, mis on vajalikud üldise pildi loomiseks. Seejärel loodi esialgne 2D joonis ja prooviti 2D lõplike elementide meetodiga leida kõige sobivamad mõõtmed ja sobivus, lähtudes sisendandmetest ja parameetritest. Järgmisena loodi 3D mudel ja analüüsiti seda FEM-iga, kas väljundparameetrid on piisavad ja sobivad edasi liikumiseks detailide ostmiseks ja printimise faasi liikumiseks. Lõppfaasis kinnitati püsimagnetid magnetliimiga toetusrõngaste külge ja valmistati sidurile sobivad toed mootori külge kinnitamiseks. Toed prinditi plastmassist, kasutades 3D printerit. Seejärel saab prototüüpi testida ja võrrelda projekteerimise käigus leitud tulemustega.

#### 3.1 Lähteandmed

Projekteerimise esimeses etapis määrati ära lähteandmed ja piirangud, mida arvestati prototüübi disainil. Kõige suuremaks piiranguks on siduri toetusrõngaste diameeter, mida on võimalik toota. Ülikoolis oleva metall 3D printeriga on võimalik toota maksimaalselt detaile suurusega 70 mm. Probleemide vältimiseks printimisel võeti projekteeritava siduri toetusrõngaste diameetriks 65 mm.

Prinditavaks metalliks on Fe<sub>3</sub>Si, mis on 3 protsendiline silikoonteras. Selle materjali küllastuspiir on 1,5 teslat ja seda tuli arvestada toetusrõngaste paksuse valimisel, sest kui magnetvoog läheneb 1,5 teslale, siis moment väheneb ja ei ole võimalik kasutada siduri täielikku potentsiaali. Prototüübi lihtsamaks ja odavamaks tootmiseks prinditi siduri toetusrõngaste tagumine kinnitus plastist 3D printeriga ja kinnitati raua külge mutri ja poltidega.

Uuriti mitmeid magneti tarnijaid ja selgus, et kõige lihtsam, kiirem ja odavam viis on kasutada plokkmagneteid. Magnetitel on erinev demagneetumise temperatuur ja neodüümmagnetil on see kõige madalam. Selle projekti puhul ei olnud temperatuur takistuseks. Selleks, et saada väikese diameetriga reluktantssidurist kõige suuremat maksimaalset momenti, otsustati kasutada neodüümmagneteid.

## 3.2 Analüütilised arvutustulemused

Projekteerimise teises etapis viidi läbi analüütilised arvutused lihtsustatud arvutusmodelitega ja tulemused kajastati tabeli ja graafiku kujul. Kõigepealt valiti sisendparameetrid lähteandmeid silmas pidades. Seejärel viidi läbi arvutused erinevate magnetmaterjalidega ja võrreldi saadud jõude. Eesmärk oli saada võimalikult väikse geomeetriaga magnetitest võimalikult palju jõudu kätte.

Tabelis 3.2.1 on ära toodud põhilised sisendparameetrid, mida arvutustel kasutati ja tabelis 3.2.2 on analüütilised arvutustulemused erinevate magnetmaterjalidega. Magnetil mõõtmed valiti teotusrõnga maksimaalse suuruse järgi, et magnetid toetusrõngale ära mahuks. Magnetil pikkus on 20 mm, laius 10 mm ja kõrgus 5 mm. Magnetil suhteline magnetiline läbitavus on 1.

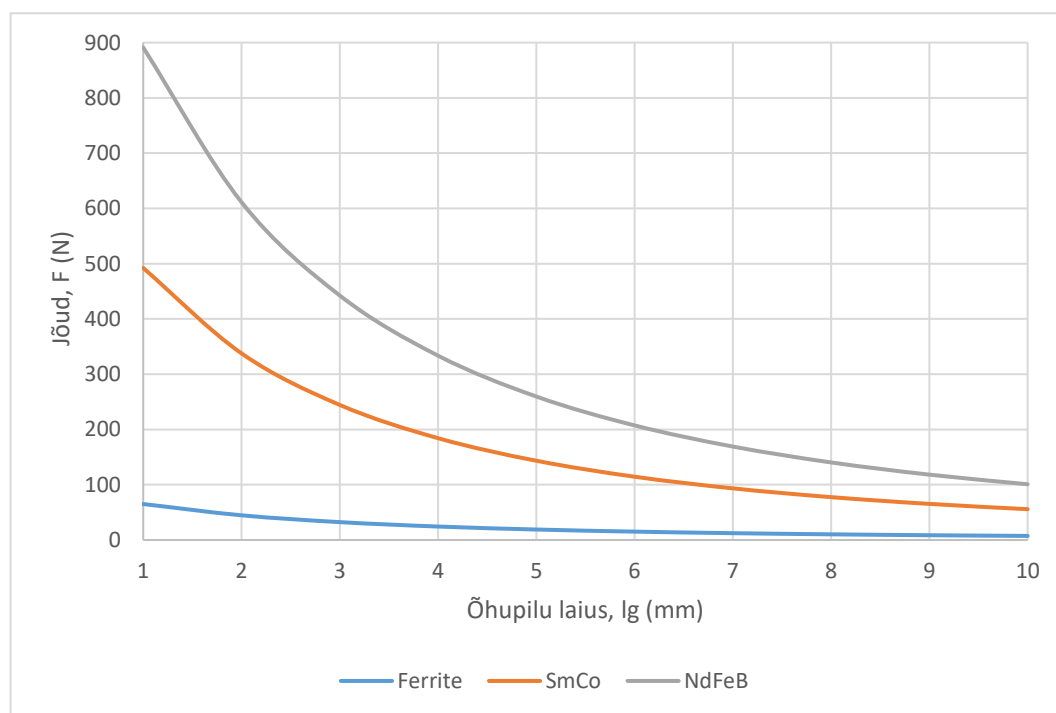
Tabel 3.2.1 Sisendparameetrid

Suurus	Tähis	Ühik	Väärtus
Püsimagnetil kõrgus	$H_m$	mm	5
Püsimagnetil pikkus	$L_m$	mm	20
Püsimagnetil laius	$W_m$	mm	10
Magnetite vaheline kaugus	$W_s$	mm	7,28
Jääkinduktsioon	$B_r$	T	1,48
Pooluste arv	$p$		8
Magnetiline konstant	$\mu_0$	$\frac{H}{m}$	$1,26 \cdot 10^{-6}$
Magnetil suhteline magnetiline läbitavus	$\mu_r$		1

Tabel 3.2.2 Väljundparameetrid

Õhupilu laius	Ferrite	SmCo	NdFeB
$l_g$ (mm)	$F_{sum}$ (N)		
1	65,09	492,25	891,10
2	44,66	337,72	611,35
3	32,32	244,40	442,42
4	24,36	184,23	333,51
5	18,96	143,40	259,60
6	15,14	114,53	207,32
7	12,35	93,41	169,10
8	10,25	77,53	140,35
9	8,63	65,31	118,23
10	7,37	55,71	100,86

Joonisel 3.2.1 on ära toodud erinevad summaarsed jõud erinevate magnetmaterjalide korral, kui magneti mõõdud on samad. Kõige suurema summaarse jõuga on neodüümmagnetid, kui õhupilu laius on 1 mm. SmCo magnetid on jõu poolest teisel kohal ja Ferrite magnetid on kõige nõrgemad. Summaarne jõud langeb õhupilu suurenedes, kuna õhk on halb väljajuht, suureneb magnetahela takistus ja väheneb aheldusvoog.



Joonis 3.2.1 Erinevate magnetmaterjalide summaarne jõu muutus õhupilu suurenedes

Allpool on ära toodud arvutused neodüümmagnetitega. Õhupilu laiuseks on võetud 1 mm antud arvutustes. Kõigepealt arvutatakse püsिमagneti juhtivus, seejärel lekkejuhtivus naaberpoolustele ja lekkejuhtivus õhupilus. Edasi leitakse juhtivus õhupilus ja summaarne juhtivus. Eelviimasena leitakse õhupilu magnetvoog ja magnetvootihedus. Viimasena arvutatakse summaarne jõud. Valemite seletused on ära toodud peatükis 2.3 (valemid 2.3.1 – 2.3.12):

$$P_{pm} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{A_{pm}}{H_m} = 5,03 \cdot 10^{-8} S \quad (3.2.1)$$

$$P_l = \frac{\mu_0 \cdot L_m}{\pi} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\pi \cdot W_m}{2 \cdot H_m} \right) = 1,14 \cdot 10^{-8} S \quad (3.2.2)$$

$$P_s = \frac{\mu_0 \cdot L_m}{\pi} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\pi \cdot l_g}{W_s} \right) = 2,87 \cdot 10^{-9} S \quad (3.2.3)$$

$$P_g = \mu_0 \cdot \frac{A_{pm}}{l_g} = 2,51 \cdot 10^{-7} S \quad (3.2.4)$$

$$P_{\Sigma} = P_{pm} + P_l + \frac{P_s}{2} + P_g = 3,14 \cdot 10^{-7} S \quad (3.2.5)$$

$$\Phi_g = \Phi_r \cdot \frac{P_g}{P_{\Sigma}} = 2,37 \cdot 10^{-4} Wb \quad (3.2.6)$$

$$B_g = B_r - \frac{\Phi_g}{A_{pm}} = 1,18 \frac{Wb}{m^2} \quad (3.2.7)$$

$$F_{sum} = p \cdot \left( \frac{\mu_0 \cdot B_g^2 \cdot A}{2} \right) = 891,10 N \quad (3.2.8)$$

Kus,

$p$  on pooluste arv.

### 3.3 Magnetite valik

Projekteerimise kolmandas etapis analüütilistes arvutustes võrreldi erinevate materjalidega magneteid ja valiti kõige sobivamad magnetid välja, milleks olid neodüümmagnetid tüübiga N52. Tehti selline valik, sest nende energiatihedus oli kõige suurem. Nende magnetitega oli võimalik saavutada kõige suurem moment väikeste mõõtude juures. Geomeetrilised mõõtmed valiti välja vaadates erinevaid müügil olevaid magneteid ja valiti kõige sobivam suurus.

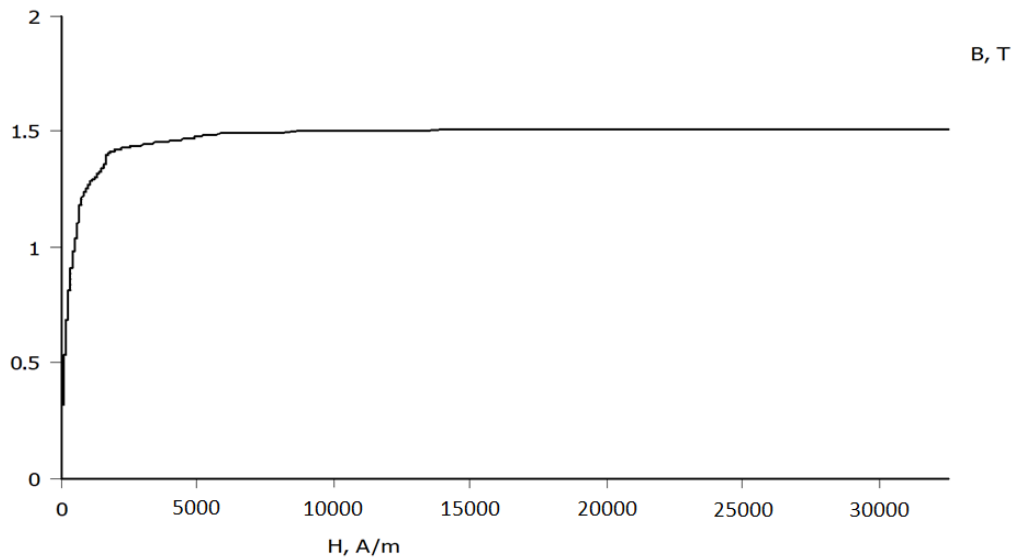
Tabel 3.3.1 Neodüüm raud borooni magneti andmed [14]

Suurus	Tähis	Ühik	Väärtus
Pikkus	$L_m$	mm	20
Laius	$W_m$	mm	10
Kõrgus	$H_m$	mm	5
Jääkinduksioon	$B_r$	T	1.48
Koertsetiivjõud	$H_c$	$\frac{kA}{m}$	1178
Suhteline magnetiline läbitavus	$\mu_r$		1
Maksimaalne töötemperatuur	$T_{max}$	°C	60

### 3.4 Reluktantssiduri 2D FEM modelleerimine

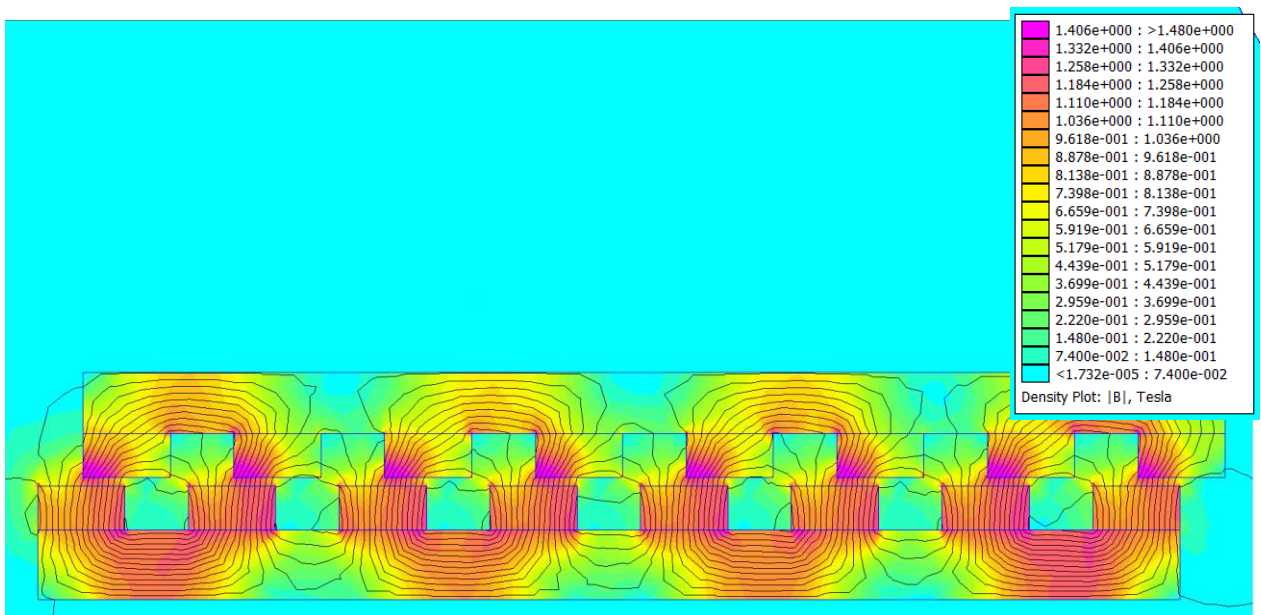
Projekteerimise neljandas etapis olid analüütilistest arvutustest esimesed järeldused tehtud ja edasi vaadeldi, kuidas projekteeritav sidur kahemõõtmelises keskkonnas käitub. Selleks tehti sidurist pinnalaotus ja viidi FEMM programmiga FEM analüüs läbi. Lõpliku elementide meetodiga simuleeriti mõjuvad magnetjõud ja suunad. Sisestati magneti mõõdud ja magnetite vahekaugus. Magnetite vahekaugus leiti 2D jooniselt, kus ploki keskelt siduri keskkohani võeti raadius ja sellega joonestati ring. See ringi osa, mis jäi magnetite vahele, mõõdeti ära ja saadi vajalik mõõt  $W_s$  (joonis 2.3.4).

2D FEM analüüsis kasutati ka sügavust ehk magnetipikkust, et saada täpsemad tulemused. Toetusrõngaste paksus tuli valida vastavalt raua küllastusele: piisavalt õhuke, et oleks odav printida ja piisavalt paks, et raud ei satuks küllastusse ja selle tagajärjel moment ei väheneks. Kui raud on küllastuses, piirab ta aheldusvoogu ja moment langeb. Raua küllastuspiir oli 1,5 T ja see sisestati magneetumiskõvera kujul ka programmi (joonis 3.4.1).



Joonis 3.4.1 2D FEM analüüsis kasutatud metalli magneetumiskõver

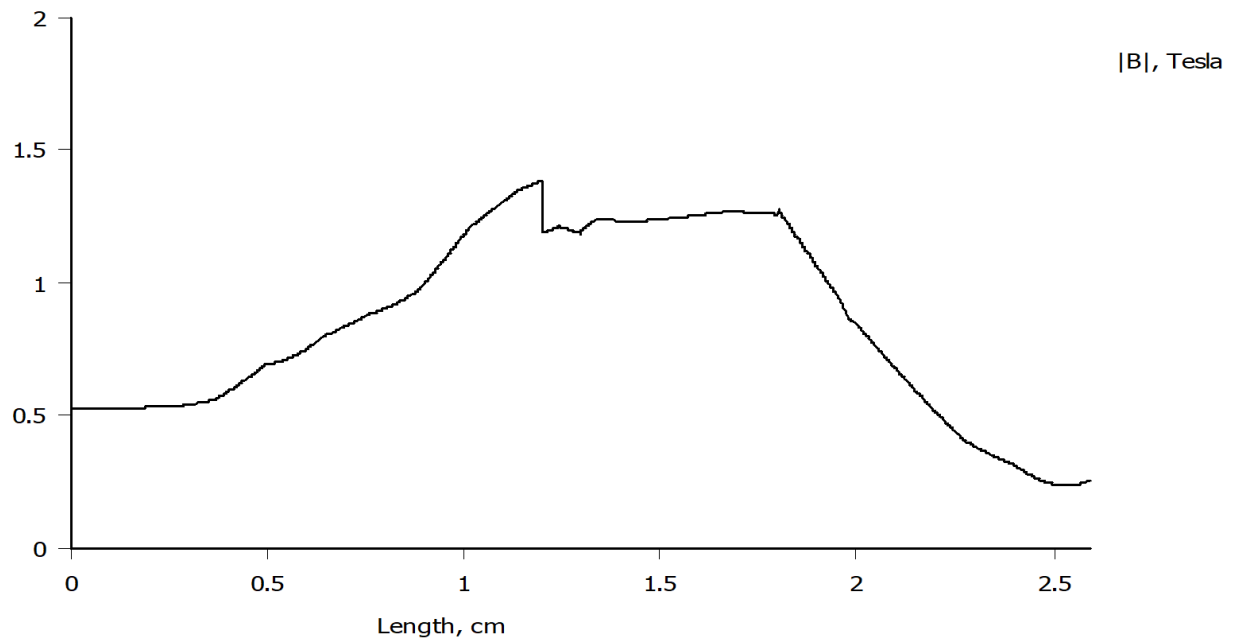
Joonisel 3.4.1 on kujutatud 2D FEM analüüs reluktantssiduriga. Sellel on ära näidatud magnetvood ja magnetvootihedus siduri erinevates osades. Paremalt on ära toodud magnetvootiheduse legend. Õhupilu laius 2D analüüsis 1 mm, magnetite paksus 5 mm ja rauast toetusrõngaste paksus on vastavalt magnetitega rõngal 8 mm ja ilma magnetiteta toetusrõngal 6.5 mm. Analüüsis on näha, miks on vajalik magnetite taga olev pehmest rauast toetusrõngad: see aitab magnetvälja paremini juhtida ja väldib selle hajumist. Kõige suurem magnetvoo mõju on püsimagneti serva ja pehme raua vahel. See tuleb välja ka joonisel kujutatud tumedamates osades. Analüüsis kasutati 3D prinditava metalli magneetumiskõverat.



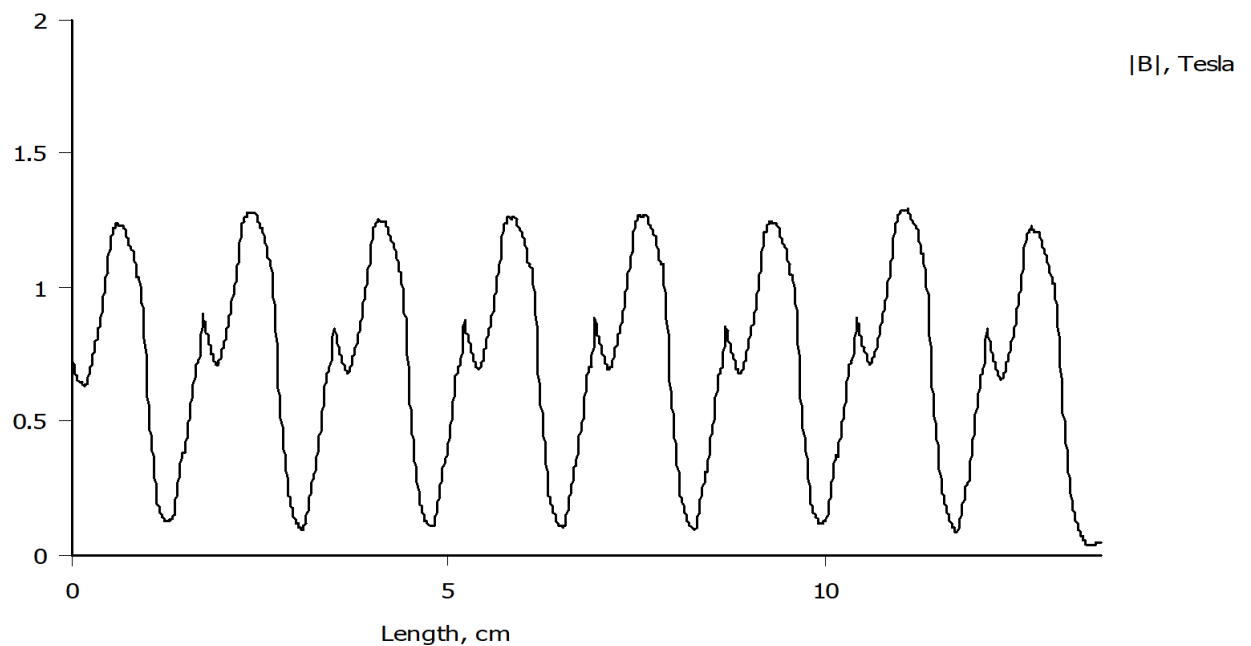
Joonis 3.4.2 FEM analüüs



Joonisel 3.4.3 on ära toodud vertikaalne läbilõige 2D reluktantssidurist kõige suurema magnetvootihedusega kohas alustades ülevalt ja liikudes alla. Graafikult on näha, et maksimaalne magnetvootihedus jääb alla 1,5 T. Joonisel 3.4.4 on ära näidatud kuidas magnetvootihedus muutub õhupilus horisontaalselt. Maksimaalne magnetvootihedus jääb 1,2 – 1,3 T vahele. Teravad tipud antud graafikul näitava lekkevoogu kõrval olevale magnetile ja raudplokile.



Joonis 3.4.3 Magnetvootiheduse muutus siduris vertikaalselt



Joonis 3.4.4. Magnetvoo muutuse läbilõige õhupilus horisontaalselt simuleeritud reluktantssiduris

Kõige suurem moment on magneti ja metalli vahel kui nihe on 52 mm. Tabelis 3.4.1 on ära toodud x ja y telje suunas mõjuvad jõud, mis saadi 2D FEM analüüsist. Siduri õhupilu on 1 mm. Tabeli keskel muudeti nihet täpsemaks, et leida nihe, kus nihke nurk annab kõige suurema x – telje suunas mõjuva jõu. See jõud määrab ära momendi suuruse. Antud tabelis leiti moment valemiga 3.4.1.

Tabel 3.4.1 Nihke mõju jõule

Nihe magneti ja metallbloki vahel	Horisontaalselt mõjuv jõud	Vertikaalselt mõjuv jõud	Kokku mõjuv jõud	Moment
$l$ (mm)	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_{sum}$ (N)	$\tau$ (Nm)
1	40,98	736,6	777,58	0,914
2	84,03	695,14	779,17	1,874
3	117,1	643,84	760,94	2,612
4	139,1	588,48	727,58	3,103
5	139,6	519,72	659,32	3,114
5,1	141,11	515,48	656,59	3,148
5,2	143,27	511,19	654,46	3,196
5,3	139,91	500,31	640,22	3,121
6	133,15	453,9	587,05	2,970
7	89,69	404,67	494,36	2,001
8	48,18	379,62	427,8	1,075

$$\tau = F_x \cdot R_e = 40,98 \text{ N} \cdot 0,02231 \text{ m} = 0,914 \text{ Nm} \quad (3.4.1)$$

kus,

$R_e$  on pikkus toetusrõnga keskelt magneti keskele.

$$P_e = \left(1 - \frac{X_1}{X_2}\right) * 100 \quad (3.4.2)$$

kus,

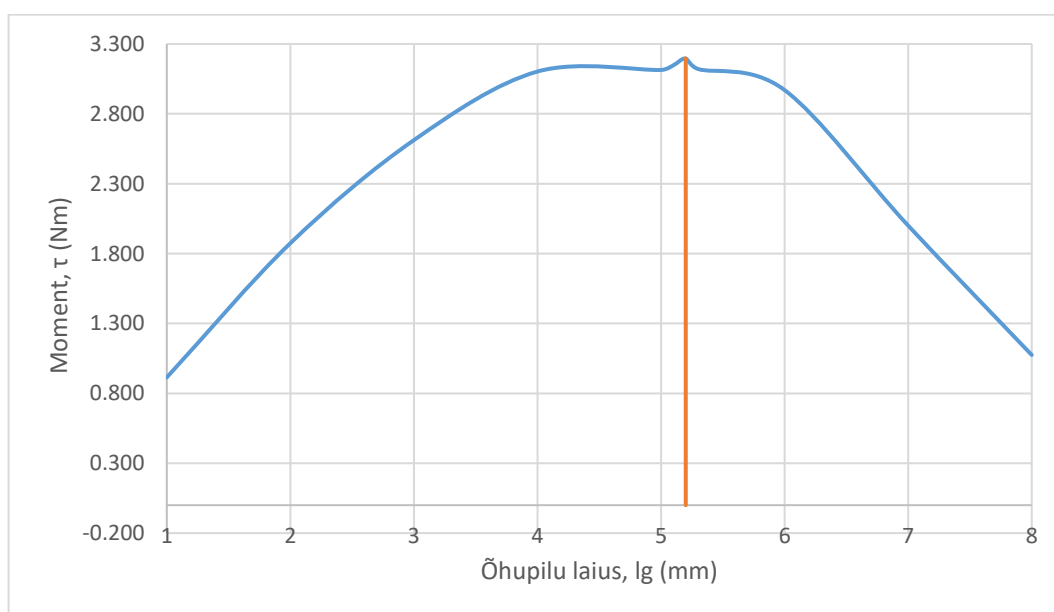
$X_1$  on väiksem arv,

$X_2$  on suurem arv.

Tabelis 3.4.2 on ära toodud jõu mõju õhupilu suurenemisel. Võrreldi summaarseid arvutuslike ja analüüsis saadud jõude. Selles katses muudeti ainult õhupilu laiust. Summaarne jõud väheneb 1,5 korda, kui õhupilu suurendati 1 mm võrra. Võrreldi analüütilist arvutust ja 2D FEM analüüsi jõude ja leiti protsent, mis näitab, kui suur on jõudude erinevus. Väärtusi vaadeldi ja tehti järeldus, et kõige täpsemad analüütilised arvutused on minimaalse õhupilu korral.

Õhupilu suurenedes läheb analüütilise arvutuse ja 2D FEM analüüsi erinevus nii suureks, sest analüütilistes arvutustes kasutati ideaalset mudelit ja ei arvestatud kõiki füüsikalisi tegureid näiteks puistevoogusid. Puistevoog tähendab, et õhus kulgevad vood ei aheldu vastas oleva raudploki ühteviisi või ahelduvad seejuures mittetäielikult. Valemit 3.4.2 on kasutatud tabelis protsendilise erinevuse leidmiseks.

Joonis 3.4.5 on kujutatud momendi muutus nihke suurenedes. Graafikul on kujutatud ainult väike osa momendi muutusest. Ideaalne momendi graafik siduri pöörlemisel moodustab siinuse kuju. Graafikul on näidatud maksimaalne moment, mille ületamisel muutub magnetväli raudploki nõrgaks ja raudploki hüppavad ühe magneti võrra edasi nii kaua kuni moment lõpuks langeb. See olukord põhjustab süsteemis vibratsioone.

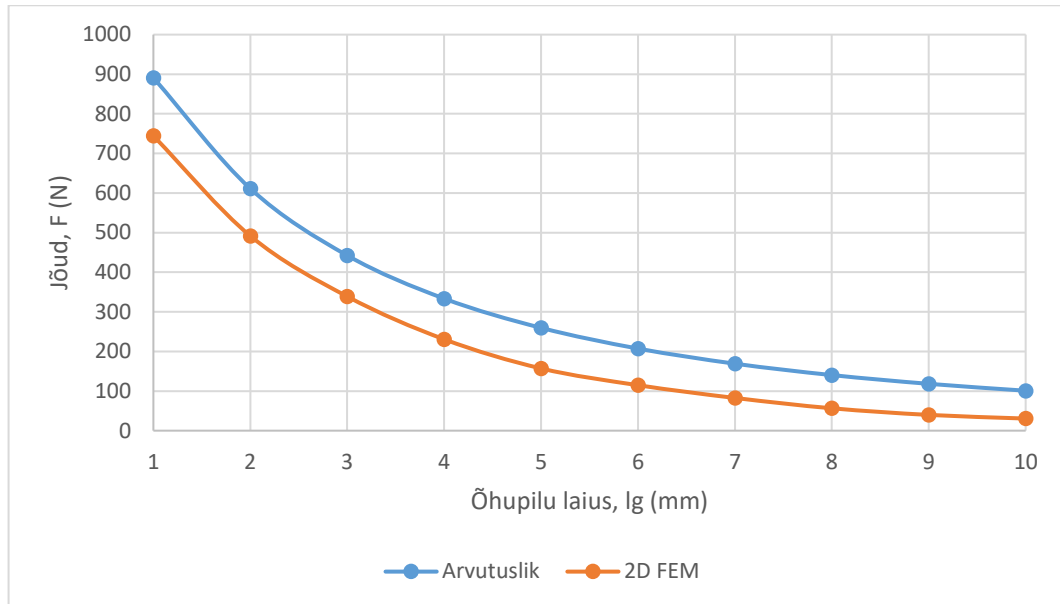


Joonis 3.4.5 Momendi muutus ja maksimum moment magnetite nihkesse viimisel

Tabel 3.4.2 Jõu muutus 2D FEM analüüsis ja analüütiliselt õhupilu laienedes

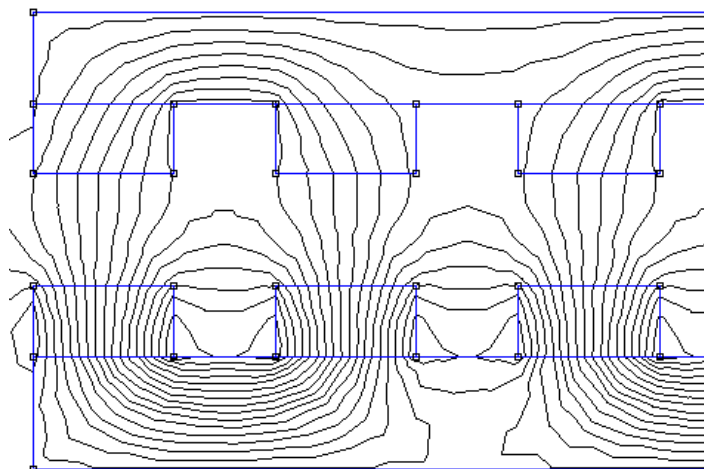
Õhupilu laius	Analüütiline arvutus	2D FEM analüüs	Erinevus protsentides
$l_g$ (mm)	$F_{sum}$ (N)	$F_{sum}$ (N)	%
1	891,1	744,34	16
2	611,35	491,81	20
3	442,42	338,81	23
4	333,51	230,72	31
5	259,6	157,1	39
6	207,32	114,83	45
7	169,1	82,59	51
8	140,35	56,49	60
9	118,23	39,78	66
10	100,86	30,56	70

Joonisel 3.4.6 on toodud graafiliselt analüütiliste arvutuste ja 2D FEM analüüsiga leitud jõud. Graafikult on näha, et jõu väärtus on analüütilisel arvutusel mõnevõrra suurem, kui analüüsis. Õhupilu laiuse suurenemisel väheneb jõud eksponentsiaalselt.



Joonis 3.4.6. Õhupilu laienedes jõu muutus 2D FEM analüüsis ja analüütiliselt arvatatud

Joonisel 3.4.7 On ära näidatud, mis juhtub kui õhupilu laius on liiga suur. Osa magnetvoost kandub otse naabermagnetile ja ei läbi enam vastas olevat rauast keha. Reaalselt toetusrõngal on magnetite vaheline kaugus üksteisest erinev välimisel ja sisemisel ringil, mille tõttu ei kasutata magnetite vahelisele kaugusele magnetite efektiivselt ära. Õhupilu suurenedes kasvab magnetahela takistus ja aheldusvoog väheneb. Lisaks suureneb puistevoog ja tekivad kaod. Puistevoog ei tee kasuliku tööd ja on ebavajalik leke.

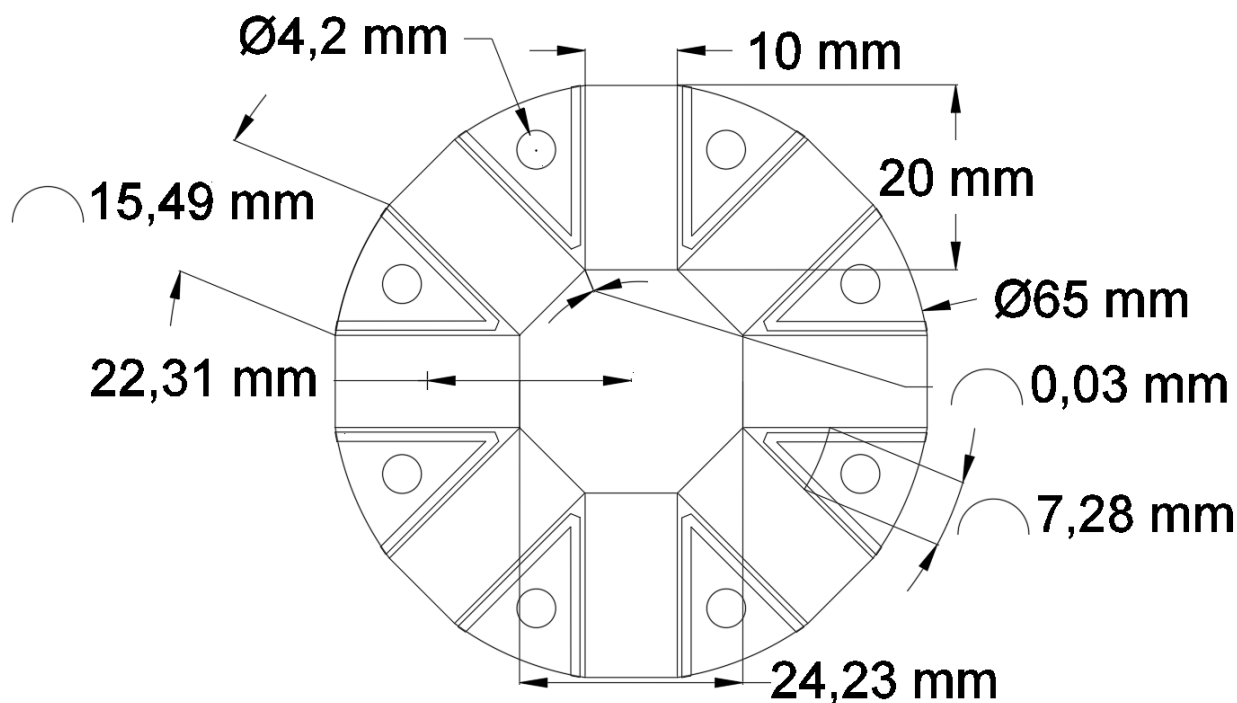


Joonis 3.4.7. Jõujoonte paigutus reluktantssiduris kui õhupilu vahe on 8 mm

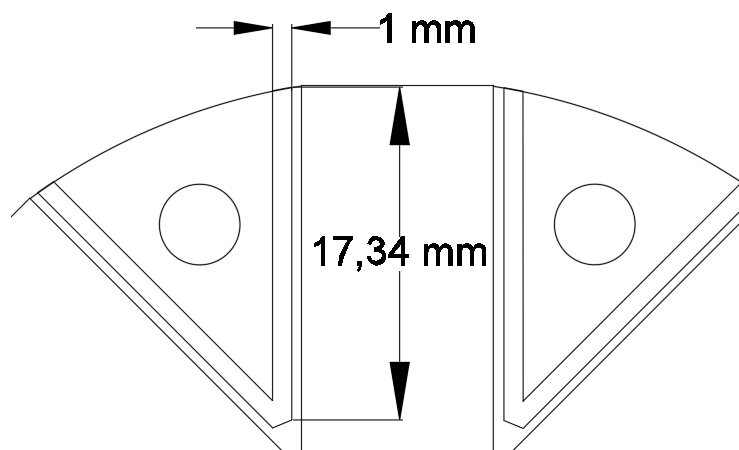
### 3.5 Reluktantssiduri 3D modelleerimine

Projekteerimise viiendas etapis joonestati prototüübi mõõtmed kahemõõtmelises ruumis ja koostati mudel kolmemõõtmelises ruumis. Lähteandmetest tuli väline toetusrõnga diameeter, milleks oli 65 mm. Magnetite pindala on 200 mm<sup>2</sup> ja magnetite vaheline tühimiku pindala on 151,38 mm<sup>2</sup>. Raua kokkuhoiu eesmärgil on toetusrõngas jäetud keskelt tühjaks.

Joonisel 3.5.1 on toodud 2D joonis koos mõõtudega. Seal on näidatud kinnitusaugud ja magnetite rauaplokkide paigutusmuster. Sisemise ringi juures on kahe magneti vaheline osa laius 0,03 mm. Välimise ringi ja magneti keskpunkti pikkus  $R_e$  on 22,31 mm. Raua toetusrõnga paksuseks võeti samad mõõtmed, mida kasutati 2D FEM analüüsis. Rauaplokkide poolel on 6,5 mm ja magnetite toetusrõnga paksus on 8 mm. Alguses disainiti sidur ümmarguseks, aga materjali kokkuhoiu eesmärgil lõigati välimist ringi kandilisemaks magnetite juurest ja sisemine ring moodustati mööda magneteid, millest tekkis keskele kuusnurk. Sellist geometriat oli parem ka uurida 3D FEM analüüsis. Reluktantssiduri 2D ja 3D mudelid modelleeriti Autocad 2018 student versiooniga. Joonisel 3.5.2 on magnetite kinnitusraamid, mille laius on 1 mm, kõrgus 1 mm ja pikkus 17,34 mm.

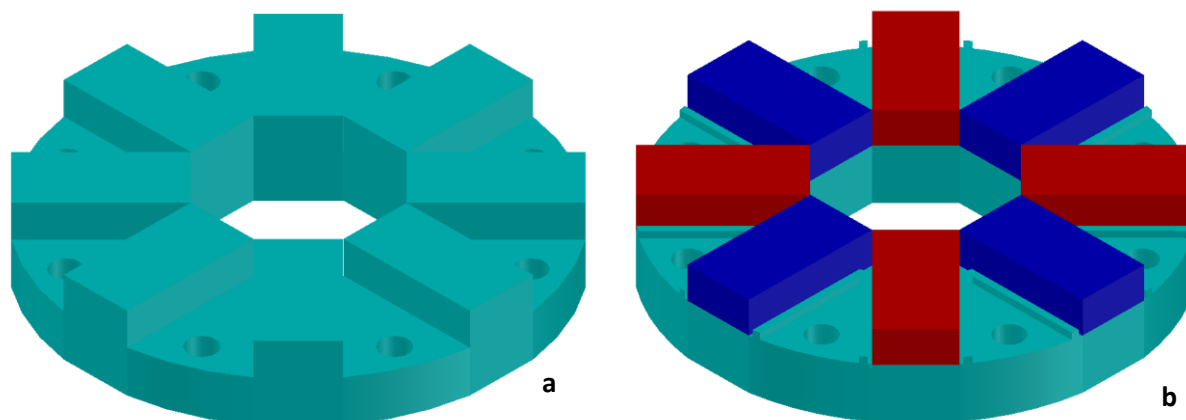


Joonis 3.5.2. Projekteeritava reluktantssiduri mõõdud



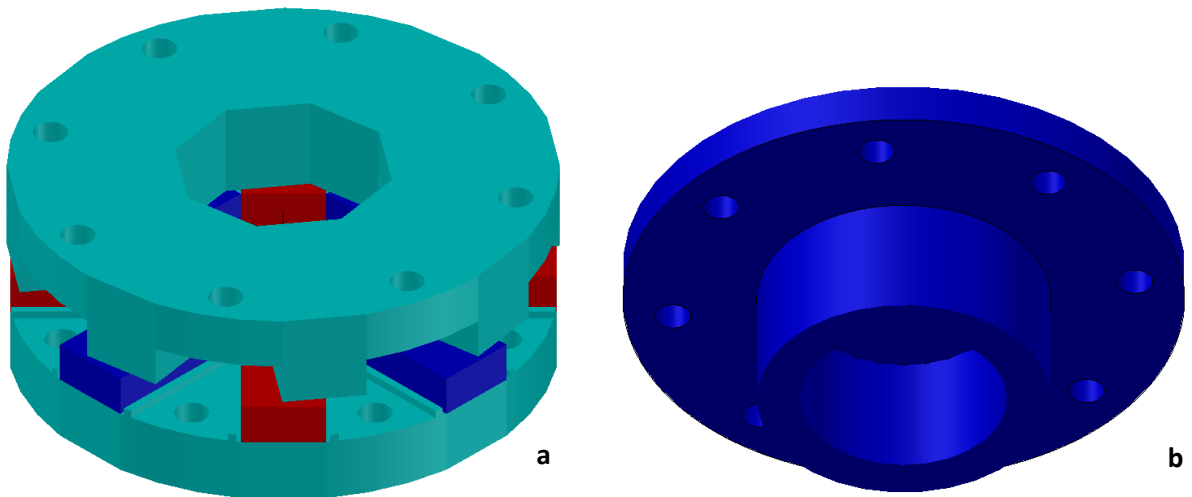
Joonis 3.5.1 Magnetite pesa äärte mõõdud

Joonisel 3.5.3 on toodud modelleeritud 3D reluktantssidur. Joonise a osas on rauast plokid, mis on ühes tükis toetusrõngaga. Joonise b osas on vaheldumisi poolustega vahelduvad magnetid, mis on toetatud rauast äärtega, et magnetid ei nihkuks. Rauast ääred prinditakse koos toetusrõngaga. Printimise 3D mudelil eemaldati magnetplokid.



Joonis 3.5.3. a) on magnetiteta ja b) on magnetitega 3D mudel siduri poolest

Joonise 3.5.4 a osas on näidatud siduri toetusrõngaste paiknemine töörežiimis. Joonisel näidatud nihe tekitab momenti. Joonise b osas on 3D modelleeritud plastmassist kinnitus alusvõllile, mille paksus on 5 mm. Kinnituspoltide ja plastmassi paksus on piisav, et taluda magnetite summaarset tõmbejõudu.

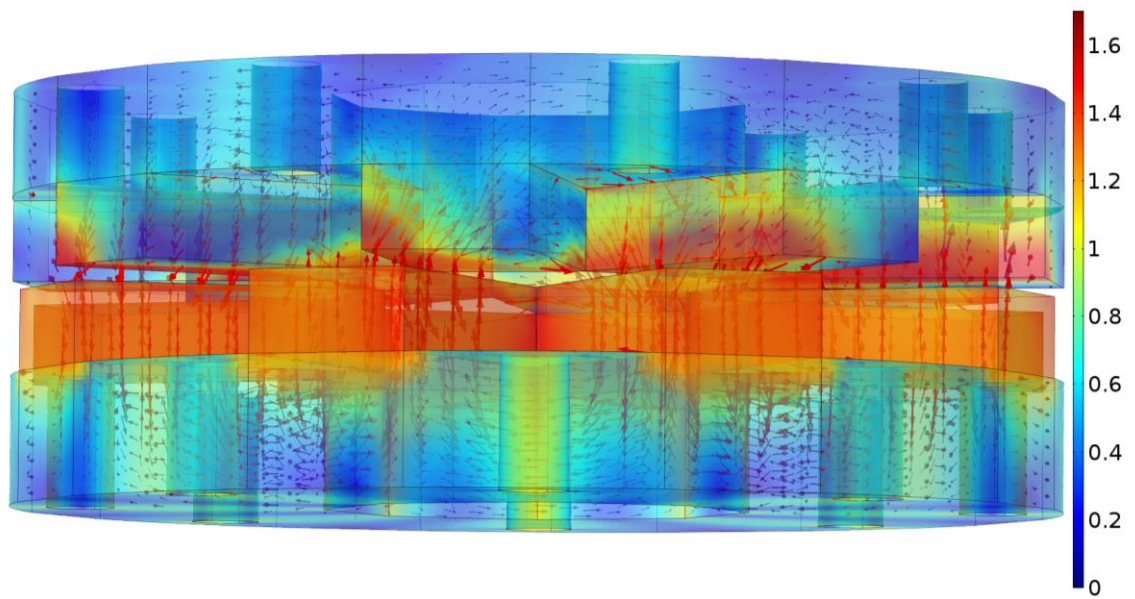


Joonis 3.5.4. a) on reluktantssidur nihkega ja kokkupandult, b) on näidatud plastikust kinnitus vahelüli võlli külge kinnitamiseks.

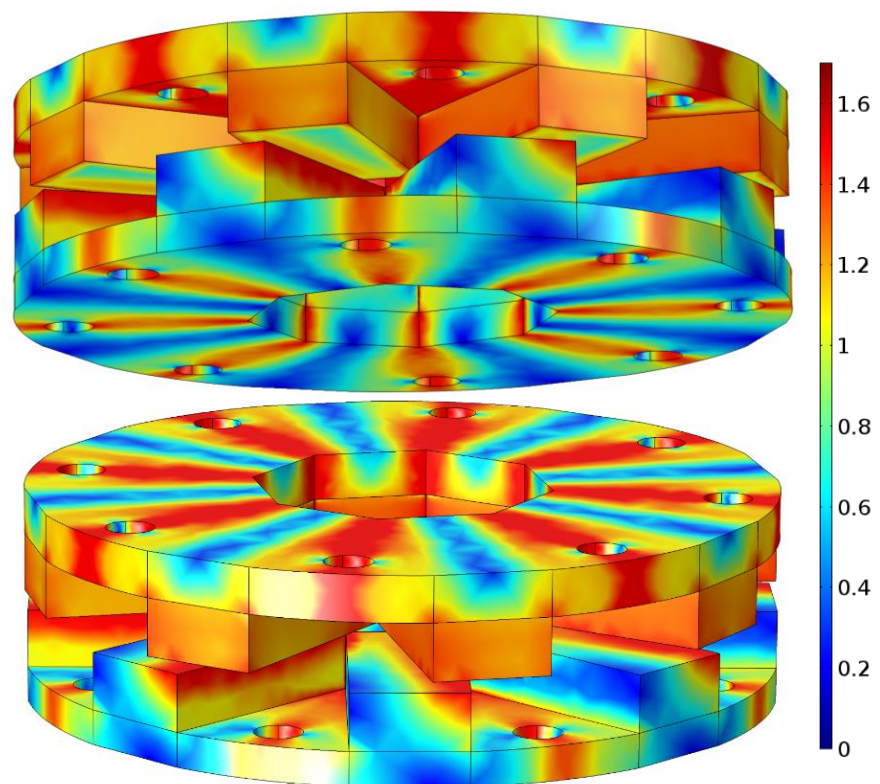
### 3.6 Reluktantssiduri 3D analüüsimine

Projekteerimise kuuendas etapis tehti kolmemõõtmelises ruumis FEM analüüs. See on kolmest analüüsist kõige täpsem ja lähim tulemus testimistulemustele. Selles analüüsis on näha kõige paremini magnetvoo liikumissuunad ja mõjuvad jõud erinevates siduri osades. 3D FEM analüüs viidi läbi Comsol Multiphysics programmiga. Joonisel 3.6.1 on näidatud magnetvoo suunavektorid ja magnetvootihedus erinevates siduri osades. Selle mudeli mehaaniline nurk on 13 kraadi ja see on simuleeritud rauaga, mille küllastuspiir on 1,5 T.

Joonistel 3.6.2a ja 3.6.2b on näidatud magnetvootiheduse uurimistulemused. Mõlema joonise korral on kasutatud rauda küllastuspiiriga 1,5 T ja sidur on viidud maksimaalse momendi asendisse, kui mehaaniline nurk on 13 kraadi. Õhupilu laius joonistel on 1 mm. Joonisel 3.6.2a on magnetite toetusrõnga paksus on 4 mm ja raudplokkide toetusrõnga paksus on 3 mm ja joonisel 3.6.2b on magnetite toetusrõnga paksus on 2 mm ja raudplokkide toetusrõnga paksus on 1 mm. Joonise analüüsimisel järeldati, et esimesel joonisel on küllastust rauas natukene näha ja et teise joonise toetusrõngad on suures küllastuses.

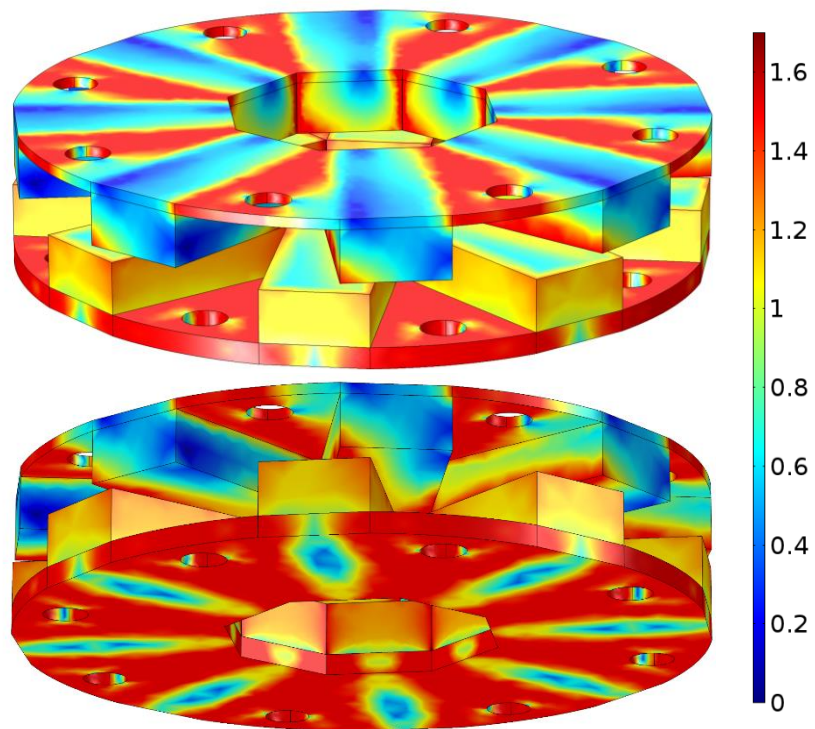


Joonis 3.6.1 Joonisel on kujutatud magnetvootihedus koos magnetvoo joonte suundadega



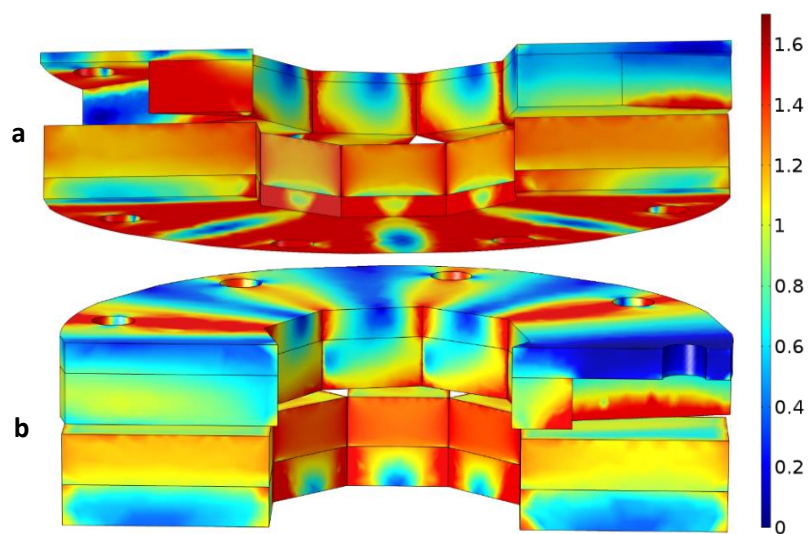
Joonis 3.6.2a Magnetvoo tihedus reluktantssiduris





Joonis 3.6.2b Magnetvoo tihedus reluktantssiduris

Joonisel 3.6.3 on toodud läbilõike magnetvootiheduse uurimistulemused erineva toetusrõngaste paksuse korral reluktantssiduris. Mõlema joonise korral on kasutatud rauda küllastuspiiriga 1,5 T ja sidur on viidud maksimaalse momendi asendisse, kui mehaaniline nurk on 13 kraadi. Õhupilu laius joonistel on 1 mm.



Joonis 3.6.3 Läbilõige reluktantssidurist koos magnetvoo tihedusega. a) Magnetite toetusrõnga paksus 3 mm ja raudplokkide toetusrõnga paksus on 2 mm, b) Magnetite toetusrõnga paksus 4 mm ja raudplokkide toetusrõnga paksus on 3 mm.

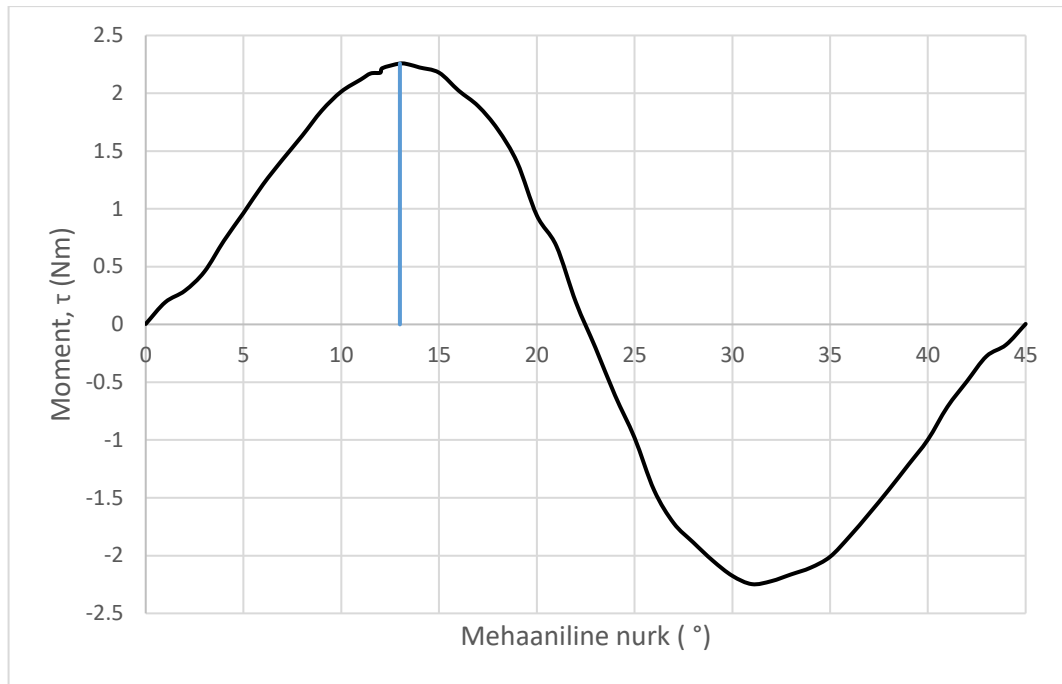
Tabelis 3.6.1 on näidatud, kuidas mõjub toetusrõngaste paksus momendile, kui mehaaniline nurk on 13 kraadi. Rauda küllastuspiir on 1,5 T. Kõige suurema momendiga on sidur, kui raudplokkide toetusrõnga paksus on 6,5 mm või kõrgem ja magnetite toetusrõnga paksus on 8 mm või kõrgem. Kui mõlema toetusrõnga paksus on 1 mm siis moment on ainult 0,98 Nm.

Tabel 3.6.1 Maksimaalne moment erinevatel toetusrõngaste paksustel

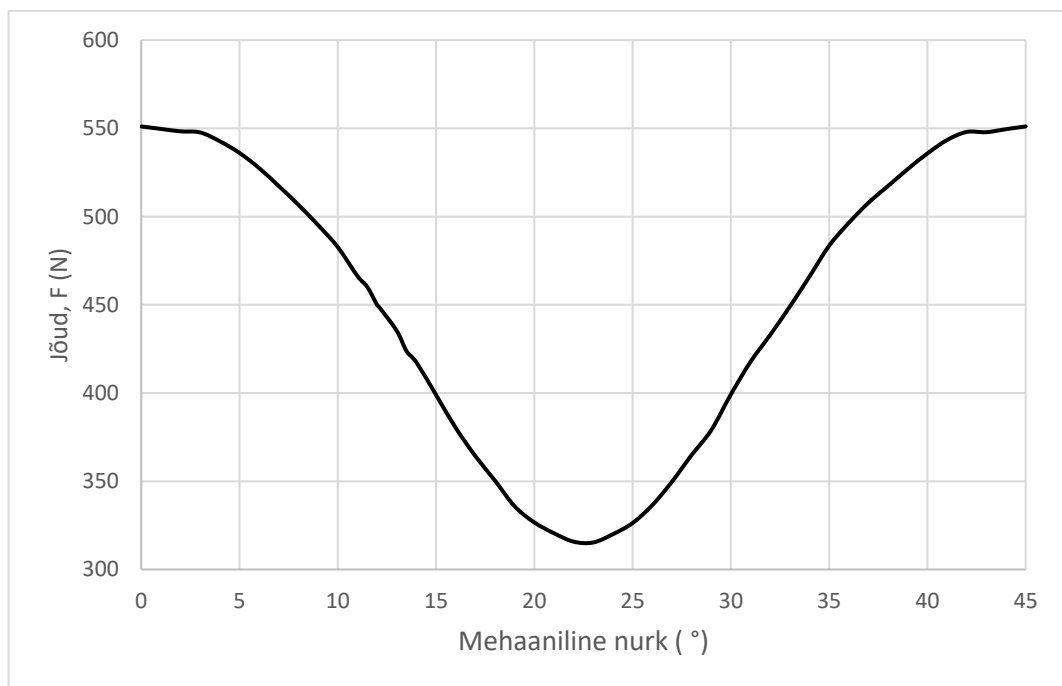
Nr	Raudplokkide toetusrõngas, $l$ (mm)	Magnetite toetusrõngas, $l$ (mm)	Moment, $\tau$ (Nm)
1	6,5	8	2,410
2	6	7	2,400
3	5	6	2,400
4	5	5	2,380
5	4	5	2,360
6	3	4	2,260
7	2	5	2,010
8	2	3	1,830
9	1	2	1,170
10	1	1	0,980

3D FEM analüüsis arvatati välja erinevad momendi väärtused, kui mehaanilist nurka muudeti. Ühest kohakuti seismise asendist magnetitega teiseni on 45 kraadi. Joonisel 3.6.4 on näha, mis juhtub pärast maksimaalse momendi ületust. Moment läheb negatiivseks, sest poolused magnetiteta poole peal vahetuvad, magnetvoo suund muutub ja magnetid hakkavad raudploki järelvedamise asemel seda hoopis lükkama. See toimub senikaua kuni pöördemoment ületab maksimaalset momenti. Sidur stabiliseerub kui moment muutub väiksemaks. Magnetiteta poole peal maksimaalse momendi ületusel toimub pooluste vahetus, sest magnetid on erinevate poolustega ja raud võtab välise magnetvälja suuna. Maksimaalne moment on 13 kraadi juures, kus momendi väärtus on 2.26 Nm. See väärtus on ära näidatud ka joonisel 3.6.4.

Joonisel 3.6.5 on näidatud summaarse jõu erinevad väärtused mehaanilise nurga muutmisel. Mehaanilist nurka on muudetud 45 kraadi, mis on kahe magneti vaheline nurk. Summaarne jõud on kõige väiksem, kui raudplakk asub kahe magneti vahel ja toimub pooluste vahetus magnetiteta poole peal, sest siis on aheldusvoog kõige väiksem ja esineb palju puistevoogu. Kõige suurem summaarne jõud on magnetite ja raudplokkide kohakuti paiknemisel, sest siis on aheldusvoog kõige suurem.



Joonis 3.6.4 Mehaanilise nurga mõju momendile [Lisa 3]



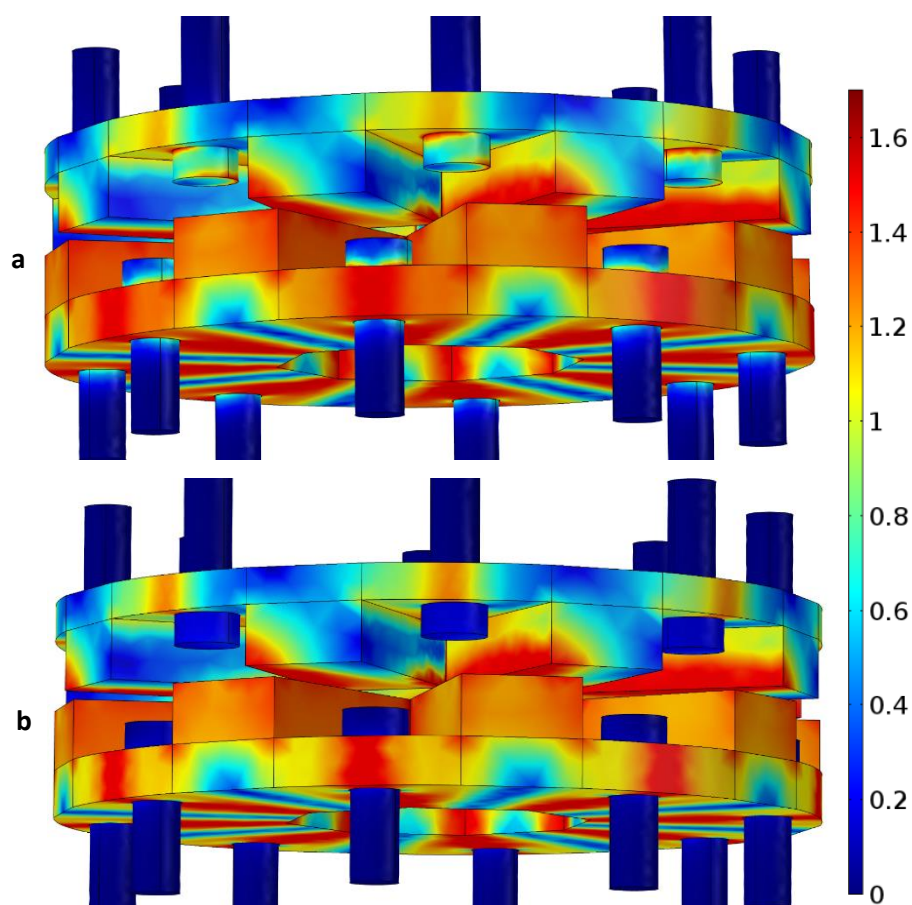
Joonis 3.6.5 Võlli suunas mõjuva jõu sõltuvus mehaanilisest nurgast [Lisa 3]

Tabelis 3.6.2 on näidatud maksimaalne võimsus, mida erinevatel kiirustel projekteeritava siduriga kasutada saab. Järeldus on tehtud arvestades ainult 2,5 kordset erinevust nimimomendist ja reluktantsiduri mehaanilist tugevust erinevatel kiirustel ei ole kontrollitud. Selline momendi kordsus valiti piisavalt suur, et sidur ei annaks kohe väikese koormuse juures järgi ja samas piisavalt väike, et kaitsta mootorit. Antud tabelis momendi arvutamiseks kasutati valemit (3.3.1).

Tabel 3.6.2 Mootori maksimaalsed võimsused erineval pöörlemiskiirusel vastavalt siduri momendile

Mootori pöörlemiskiirus (rpm)	Mootori maksimaalne lubatud võimsus, $P$ (W)	Mootori moment, $\tau$ (Nm)	Kahe ja poole kordne moment, $\tau$ (2.5 x Nm)
750	70	0,89	2,23
1000	94	0,90	2,24
1200	113	0,90	2,25
1500	141	0,90	2,24
3000	283	0,90	2,25

Poltide materjali mõju on näha joonisel 3.6.6. Esimese pildi peal on tehtud poldid samast materjalist, millest koosnevad toetusrõngad. Teise pildi peal on poldid tehtud mittemagneetuvast materjalist. Magnetiseeruvate poltide korral väheneb moment 0.21 Nm. Õhupilu laius on 1 mm, mehaaniline nurk on 13 kraadi ja raua küllastuspiir on 1,5 T.



Joonis 3.6.6 Poltide mõju momendile ja jõule. a) joonisel on kujutatud magneetivast materjalist poldid. b) joonisel on kujutatud sellisest materjalist poldid, mis ei magneetu.

Allpool toodud tabelites on võrreldud erinevaid tulemusi erinevatel parameetritel. Tabelis 3.6.3 on näidatud kuidas muutub moment ja summaarne jõud erinevatel õhupilu laiustel. Tabelis 3.6.4 on näidatud kolme erineva meetodiga leitud summaarne jõud. Valemit 3.4.2 on kasutatud tabelis protsendilise erinevuste leidmiseks.

Tabel 3.6.3 Õhupilu laiuse mõju momendile ja jõule kui mehaaniline nurk on 13 kraadi

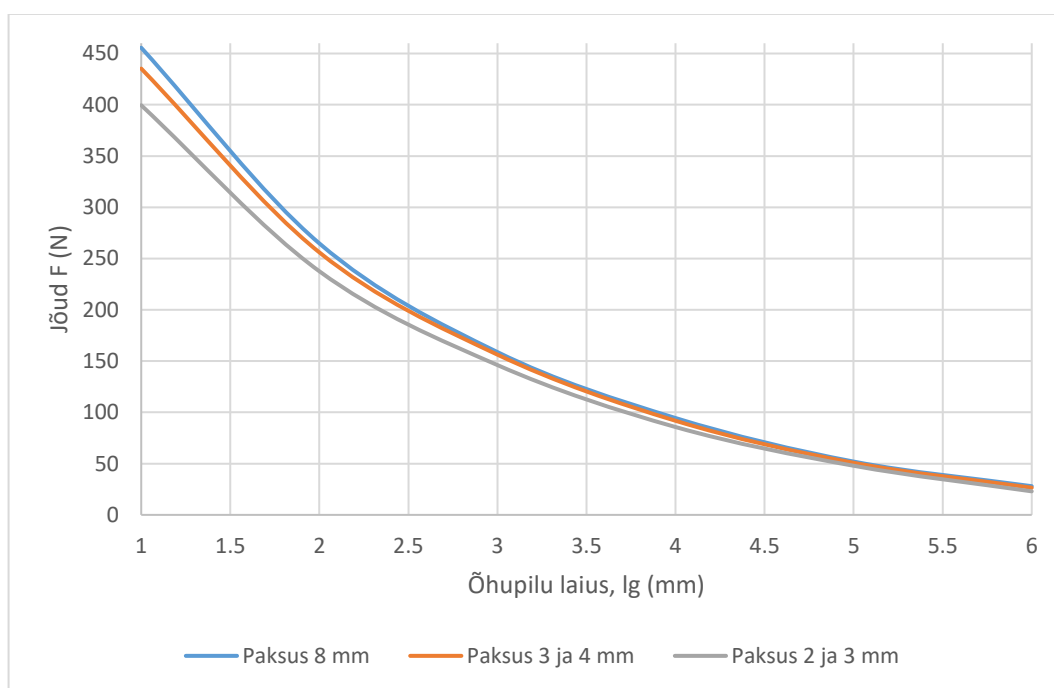
Õhupilu laius, $l_g$ (mm)	Toetusrõngaste paksus on 8 mm		Raua toetusrõnga paksus on 3 mm ja magnetite toetusrõnga paksus 4 mm		Raua toetusrõnga paksus on 2 mm ja magnetite toetusrõnga paksus 3 mm	
	Moment, $\tau$ (Nm)	Jõud, $F_{sum}$ (N)	Moment, $\tau$ (Nm)	Jõud, $F_{sum}$ (N)	Moment, $\tau$ (Nm)	Jõud, $F_{sum}$ (N)
1	2,416	455,63	2,257	435,29	1,878	399,53
2	1,383	264,81	1,349	256,04	1,125	237,64
3	0,847	158,81	0,839	156,31	0,703	146,13
4	0,549	94,48	0,527	91,81	0,507	85,71
5	0,392	52,00	0,352	50,80	0,308	47,94
6	0,233	28,00	0,212	26,51	0,208	22,98

Tabel 3.6.4 Erinevate meetoditega arvatud summaarsete jõudude võrdlus

Õhupilu laius, $l_g$ (mm)	Toetusrõngaste paksus on 8 mm (3D FEM)	Raua toetusrõnga paksus on 3 mm ja magnetite toetusrõnga paksus 4 mm	Toetusrõngaste paksus 8 mm (2D FEM)	Toetusrõngaste paksus on ideaalne (Arvutuslik)	2D FEM ja 3D FEM analüüsi jõudude erinevus	Arvutusliku ja 3D FEM analüüsiga leitud jõudude erinevus
	Jõud, $F_{sum}$ (N)				%	%
1	650,47	551,06	744,34	891,10	13	27
2	361,93	331,29	491,81	611,35	26	41
3	211,64	200,97	338,81	442,42	38	52
4	125,10	121,06	230,72	333,51	46	62
5	69,52	70,06	157,10	259,60	56	73
6	37,11	37,21	114,83	207,32	68	82

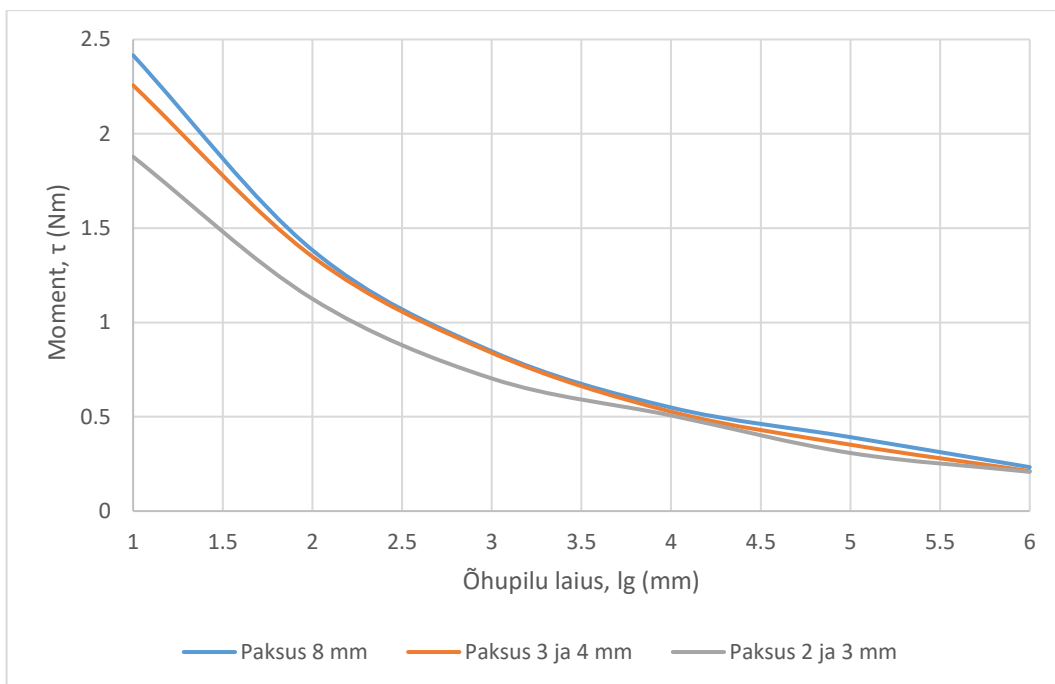
Allpool toodud joonistel on toodud välja tabelite 3.6.3 ja 3.6.4 võrdlused graafilisel kujul. Joonisel 3.6.7 on näidatud, kuidas summaarne jõud muutub erinevatel õhupilu laiustel ja erinevatel toetusrõngaste paksustel. Joonise analüüsist selgub, et kõige rohkem avaldab väljajuhtide paksus mõju, kui õhupilu laius on väike, sest siis on aheldusvoog kõige suurem.

Kui aheldusvoog on suur on ka magnetvootihedus suur ja väljajuht saavutab küllastuspiiri kiiremini, kui madala magnetvootiheduse korral. Laia õhupilu korral on summaarne jõud madal ja magnetvoog ei ole piisavalt suur, et tekitada küllastust väljajuhis. Joonisel 3.6.8 on toodud momendi erinevad väärtused õhupilu suuruse muutmisel erinevate väljajuhi paksuste korral. Moment sõltub magnetilistest jõududest ja on korrelatsioonis summaarse jõu väärtustega. Seega on moment suur väikese õhupiluga ja madal suure õhupilu väärtuse korral. Legendis esimene number näitab magnetite taga oleva väljajuhi paksust ja teine number näitab raudplokkide taga oleva väljajuhi paksust. Kui on ainult üks arv, siis mõlemad väljajuhid on sama suured.

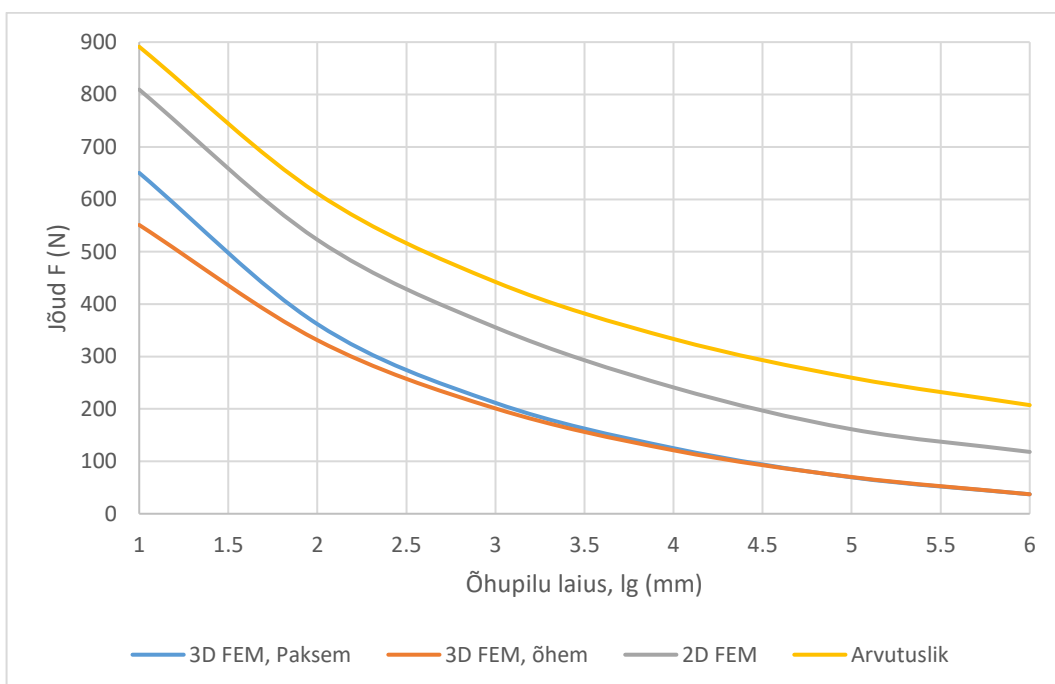


Joonis 3.6.7 Summaarne jõu muutus õhupilu laienedes erineval toetusrõngaste paksustel

Joonisel 3.6.9 on näidatud tabeli 3.6.4 põhjal erinevate arvutusmeetoditega leitud summaarsed jõu väärtused erineva õhupilu laiuse korral. Joonist analüüsid selgub, et kõige madalamad ja täpsemad tulemused tulid 3D FEM analüüsiga. 3D FEM analüüs on kõige täpsem, sest selle analüüsiga arvestatakse kõiki parameetreid ja keerukat geometriat. Kõige ebatäpsem on analüütiliste arvutustega analüüs, kuna seal kasutati lihtsustatud mudelit ja ideaalsete parameetritega materjale. 2D FEM analüüs ebatäpsus tekib osade geomeetriliste parameetrite mitte arvestamisel. Joonisel on näidatud kaks erinevat 3D FEM analüüsi tulemust üks ehk paksema korral on väljajuhi paksuseks võetud 8 mm ja teine ehk õhema korral on magnetite taga oleva väljajuhi paksus 4 mm ja raudplokkide taga oleva väljajuhi paksus 3 mm.



Joonis 3.6.8 Momendi muutus öhupilu laienedes erineval toetusrõngaste paksustel



Joonis 3.6.9 Erinevatel meetoditel saadud summaarse jõu tulemused

## 4. PROTOTÜÜBI VALMISTAMINE

Eelnevalt on läbi viidud projekteeritava siduri analüütilised arvutused, modelleerimine, 2D ja 3D FEM analüüsid ning tehtud järeldus nende tulemuste põhjal, millised geomeetrilised mõõtmed ja parameetrid tuleb valmistatavale prototüübile valida. Prototüübil saavutati valitud mõõtmete juures väike materjali kulu ja võimalikult suur moment.

### 4.1 Prototüübi parameetrite valik

Projekteerimise seitsmendas etapis prototüübi toetusrõngaste paksus valiti piisavalt paks, et pöördemoment on maksimaalne ja piisavalt õhuke, et printimine võtaks vähem aega. 3D FEM analüüsiga prooviti erinevaid paksuseid ja printimiseks valiti magneti taga oleva toetusrõnga paksuseks 4 mm ja raudplokkide taga oleva toetusrõnga paksuseks 3 mm. Magnetitega pool on paksem kuna seal on suurem magnetvoog. Raudplokkidega pool ei vaja nii suurt paksust ja selline läbimõõt aitab printimisel materjali kokku hoida. Kõige väiksema küllastusega paksus magnetite pool on 8 mm ja raudplokkide pool on 6,5 mm. Sellise kombinatsiooni puhul on moment 2,41 Nm. Tabelist 3.6.1 on näha, et eelmainitud geomeetristest mõõtudest allapoole tulles moment väheneb. Selline printitav paksuse valik tehti momendi põhjal. Valiti punkt, kus moment väga palju ei lange ja samas tuleb säilitada sobilik paksus, et printimisel kuluks vähe aega ja materjali. Valitud paksuse juures on pöördemoment 2.26 Nm. Magnetite toetavate äärte paksus ja laius on 1 mm, kuna magnetid on õhukesed ei ole vaja paksemaid toetavaid ääri. Magnetiteks valiti neodüümmagnetid tüübiga N52, mille parameetrid on ära toodud tabelis 3.3.1.

### 4.2 Mootori valik

Projekteerimise kaheksandas etapis valiti projekteeritud reluktantssidurile 2,5 korda väiksema momendiga mootor. Valiku tegemiseks kasutati tabelit 3.6.2 ja selle juures on ka kirjas, miks moment peab 2,5 korda väiksem olema. Mootoriks valiti kolmefaasiline asünkroonmootor, mis töötab nii kolmnurk- kui tähtühenduses. Allpool tabelis 4.2.1 on ära toodud mootori andmed. Tabelis sulgudes olevad D ja Y tähendavad mootori ühendusviisi. Antud tabelis momendi arvutamiseks kasutati valemit (3.3.1). Mootori kiiruse ühik rpm tähendab pööret minutis. Mootori täpsemate parameetrite lehed on välja toodud lisa (Lisa 1 ja 2).



Tabel 4.2.1 Mootori andmed. [15]

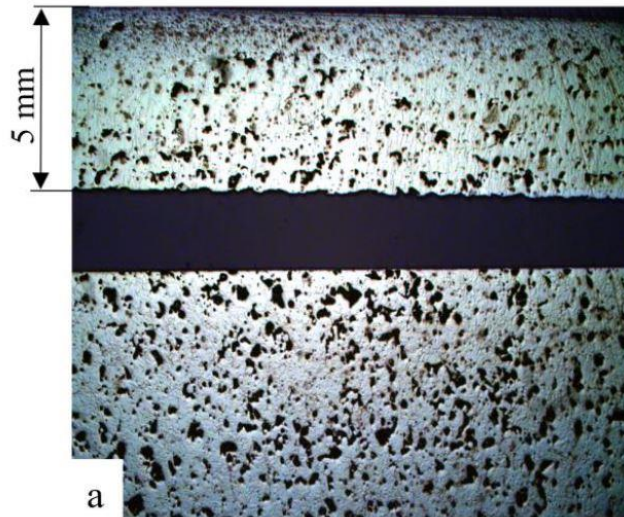
Suurus	Tähis	Ühik	Väärtus
Võimsus	$P$	W	90
Nimivool (D/Y)	$I$	A	0,39/0,23
Nimipinge (D/Y)	$U$	V	230/400
Pöörlemiskiirus	$N$	rpm	1000
Moment	$\tau$	Nm	0,86

### 4.3 Prinditava metalli omadused

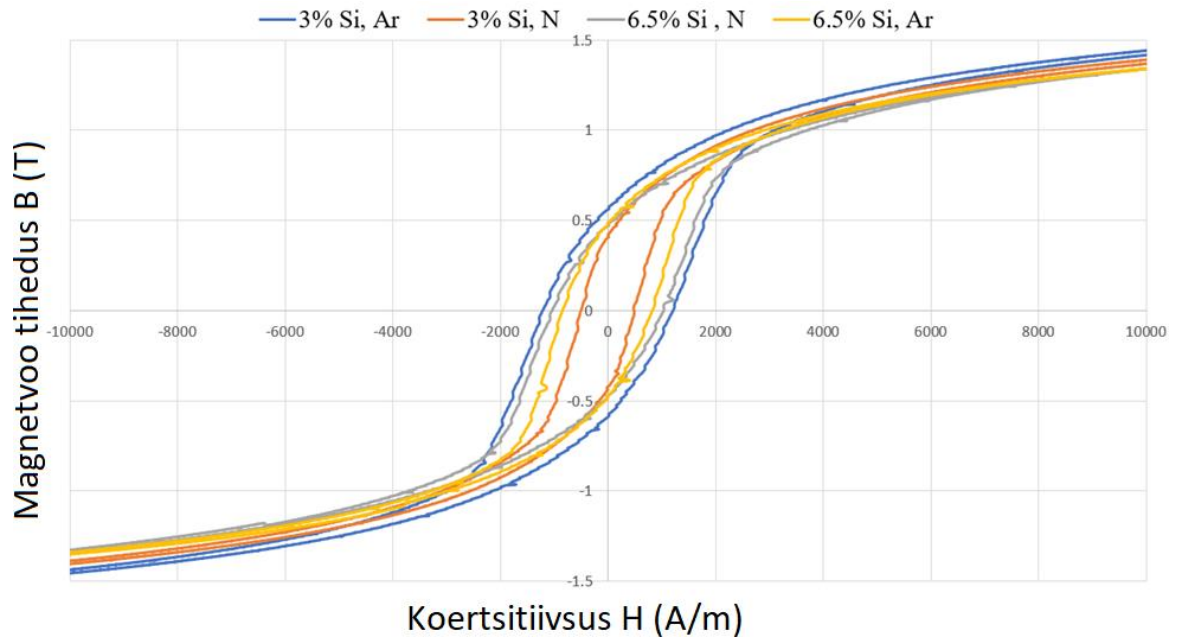
Enne siduri väljajuhtide printimist uuriti prinditavat materjali ja toodi välja peamised materjali parameetrid. Prinditavaks metalliks kasutati Fe3Si materjali ehk kolmeprotsendilist silikoonterast. Põhilised põhjused, mis võivad vähendada magnetilist juhtivust prinditud metallis, tulenevad sisemistest defektidest ja stressist. Prinditava raua kvaliteet tõuseb kui kasutada eelsoojendust prinditava alusel.

Joonisel 4.3.1 on näidatud läbilõige kolmeprotsendilisest silikoonterasest, mida on suurendatud optilise mikroskoobiga 12.5 korda. Näidismaterjal on prinditud argooni keskkonnas. Materjali sees on näha tühimikke, mis mõjuvad väljajuhi juhtivusele halvasti ja seetõttu vähendavad momenti.

Joonisel 4.3.2 on näidatud demagneetimiskõver kahe erineva prinditava materjali kohta, kahes erinevas gaasikeskkonnas. Üks materjal on kolmeprotsendilise silikooni sisaldusega ja teine 6,5 protsendilise silikooni sisaldusega. Mõlemaid materjale prooviti printida argooni ja lämmastiku keskkonnas. Madalaim koertsitiivjõud oli kolmeprotsendilisel silikoonterasel prinditud lämmastiku keskkonnas ja kõrgeim kolmeprotsendilisel prinditud argooni keskkonnas. Kõige paremad magnetilised omadused on kolmeprotsendilisel silikoonterasel prinditud argooni keskkonnas ja sellepärast on valitud ka see materjal prototüübi valmistamiseks.



Joonis 4.3.1 Läbilõige kolme protsendilisest silikoonterasest



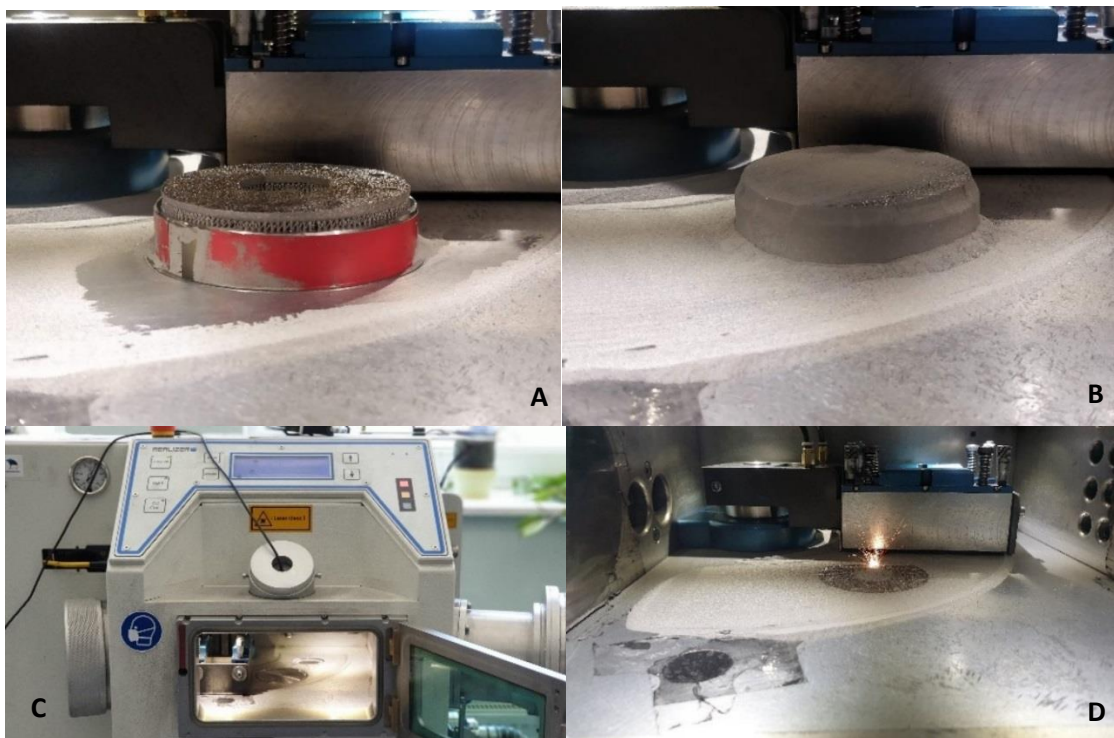
Joonis 4.3.2 Prinditava materjali demagneetimiskõver nelja kvadrandidiga erinevate silikooni sisaldustega rauas ja erinevas keskkonnas

## 4.4 Metalli 3D printimisprotsess

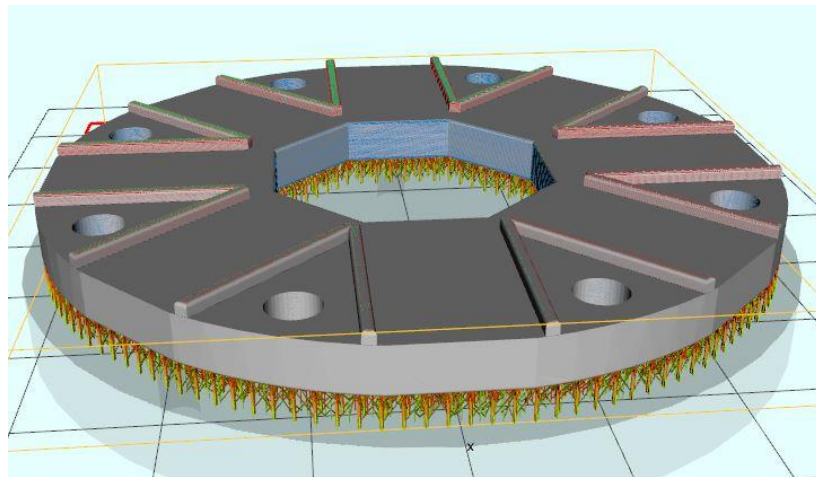
Projekteerimise üheksandas etapis toodeti prototüübile toetusrõngad koos raudplokkide ja magnetite toetavate äärtega. Reluktantssiduri toetusrõngaste tegemiseks kasutati SLM (*Selective laser melting*) meetodit ehk selektiivset lasersulatamist. Printer realizer SLM 50 võimaldab printida maksimaalselt 70 mm diameetriga ja 75 mm kõrgusega detaali.

Printeri maksimaalne laservõimsus on 120W. Printer töötab järgmiselt: peenike metallpuru sõelutakse ja kallatakse metallanumasse, kust printer teatud aja jooksul pumpab materjali printerisse. Printeri sees keskel on ringikujuline alusplaat, mille peale prinditakse detail. See liigub iga kihi printimisel ühe printimiskihi võrra allapoole. Pühkija (joonis 4.4.1 pilt C), liigutab materjali laseri ette. Laser sulatab pulbri detaili kuju järgi ära ja pühkija toob peale uue kihi materjali. Pühkija all on kaks kummitihendit: esimese kõrgus on 0.1 mm ja tagumise kõrgus on 0.2 mm, et materjal jaotuks ühtlaselt laiali. Detaili printimiskvaliteeti mõjutavad paljud parameetrid. Kõige rohkem mõjutab kvaliteeti laseri energiatihedus, mis sõltub laseri sulatamise kiirusest ja võimsusest. Projekteeritava prototüübi valmistamiseks kasutatavat materjali prinditakse argoonilises keskkonnas. Tulemused näitavad, et eelsoojendatud printeriga prinditud detaili parameetrid on märgatavalt paremad. Prototüübi printimisel on valitud printimiskihi paksuseks 35 mikromeetrit. Laseri võimsuseks 72W ja skaneerimiskiiruseks 1 meeter sekundis. Detaili skaneeritakse 2 korda sama võimsuse ja kiirusega. Printimisalust eelsoojendati 200 kraadini.

Joonisel 4.4.1 on näidatud detail peale printimist A ja B pildidel, kus valmib prototüübi magnetitega poole toetusrõngas, printeri printimisruum pildil C ja printeri töörežiim pildil D. Kahjuks esimene ja teine printimine ei õnnestunud, sest detail hakkas ühest äärest rohkem kasvama kui teisest ja pühkija jäi kinni. Pildi peal oleva prinditud detaili paksus on 2 mm. Joonisel 4.4.2 on ära toodud prinditav 3D mudel. Alumine kiht on võrestik, et detaili oleks pärast printimist lihtsam eemaldada printimisalusest.



Joonis 4.4.1 Prototüübi esimene printimine



4.4.2 Prinditav mudel

Joonisel 4.4.3 on toodud ebaõnnestunud printimine. Printimisprotsessi jälgimisel oli näha, et ühel pool toetusrõngast tekib skaneeriva kiire ette sulamata pulberist vall, mis takistab materjali edasist homogeenset sulamist. Printimise jätkumisel viga suureneb, kuni arenevad ebatasasused. Printimise õnnestumiseks tuleb printimisparameetreid optimeerida täismaterjalist alade printimiseks. Praegused printimisparameetrid ei toimi täismaterjalist alade printimisel. Teine võimalus on muuta väljajuhi topoloogiat, näiteks printida materjal õhulisemalt, mis aga nõuab väljajuhi suuremat paksust, et materjal ei küllastuks.



Joonis 4.4.3 Prototüübi teine prinditud tulemus

## 4.5 Kokkupanek

Projekteerimise eelviimases etapis pärast prototüübi toetusrõngaste printimist tuleb detailid kokku panna, et saaks sidurit testida. Kokkupandud sidur koosneb kahest toetusrõngast, kahest plastitoest, 16 poldist ja mutrist, 32 seibist ja magnetitest. Rauast toetusrõngaste kinnituseks kasutati M4 tüüp polte, et kinnitada see plastiktoe külge, mis omakorda kinnitati mootori ja veetava võlli külge.

3D mudeliga uuriti magnetiseeruvast materjalist poltide mõju ja selgus, et selliste poltide kasutus vähendab momenti 0.21 Nm võrra. Seetõttu kasutati materjali, mis ei magneetu. Kõige paremad materjalid selle jaoks on näiteks alumiinium, vask, plastik või osa roostevabadest terastest. Antud töös kasutati AISI 316 tüüpi roostevaba terasest polte ja mutreid, mis on mittemagnetiline materjal.

Plastikust prinditud toed on samasuguse kujuga nagu rauast toetusrõngad. Nende paksus on 5 mm, võlli kinnitustoru suurus on 11,1 mm ja võlli diameeter on 11 mm. Kinnitustoru suurus valiti selline, et plastikust prinditud ühendusülid püsiks võlli otsas ilma muude kinnitusvahenditeta. Magnetid liimiti toetusrõnga külge loctite AA 326 magnetliimiga. Liimimispinnad pidid olema puhtad, et liim paremini haakuks. Enne liimimist tehti kindlaks magneti poolused ja märgiti ära, et ei satuks sama poolusega magnetid kõrvuti. Magnetid põhja- ja lõunapoolus määrati gauss meetriga, mis mõõdab magnetvälju. Kõigepealt liimiti päripoolusega magnetid rõnga külge ja siis kinnitati teised vastaspoolusega magnetid. See väldib olukorda, kus magnet tõmbab ennast naabermagnet külge. Kokkupandud siduri pooli ei tohi hooga kokku lasta, kuna see lõhub magneti struktuuri ja võib põhjustada magnetite purunemise.

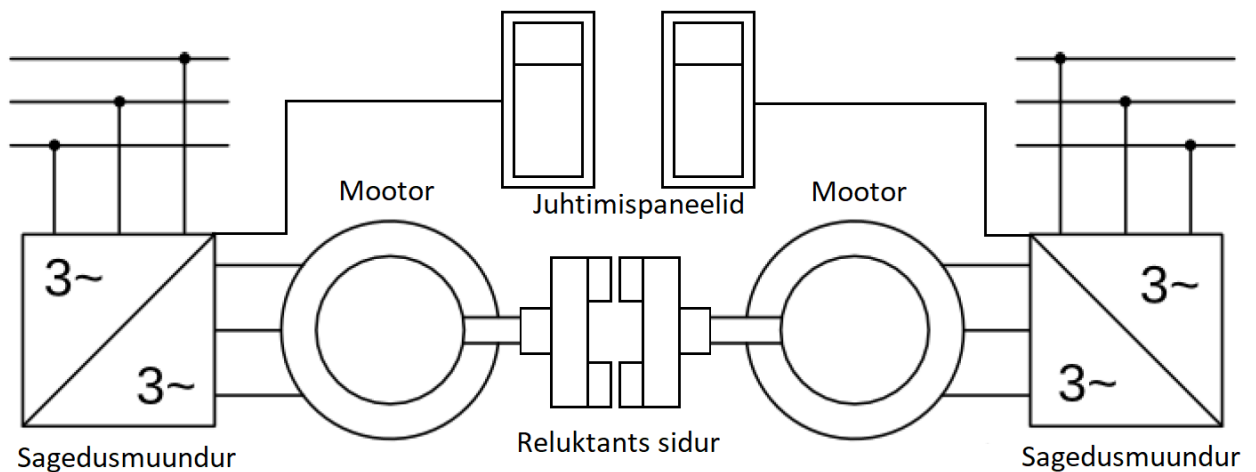
## 4.6 Testimine

Projekteerimise viimane etapp on ainult teoreetiline, sest kahjuks printimine ebaõnnestus kaks korda ja printer oli teiste tööde jaoks ära planeeritud ja ei võimaldanud prototüüpi tähtajaks valmis saada. Testimiseks tuleb soetada kaks, peatükis 4.3 kirjeldatud, mootorit. Teine võimalus on soetada üks mootor ja teine valida välja laborist, millel on sama pöörlemiskiirus. Valitud mootori pöörlemiskiirus on 1000 pööret minutis. Üks mootor peab olema fikseeritud ja teist peab saama liigutada, et testida momenti erinevate õhupilu laiuste korral. Mootorite juhtimiseks kasutatakse kahte sagedusmuundurit. Testimisel töötab üks mootor nimiparameetritega ja teine pannakse samas suunas ja nimikiirusest väiksema kiirusega tööle. Mootori kiirust vähendades saab suurendada siduri pöördemomenti.



Sagedusmuunduri kontrollierist on võimalik kontrollida kiirust, mõõta võlli mõjuvat momenti ja saadud momenti võrrelda 2D ja 3D FEM analüüsi momendiga. Siduri pooled ühendatakse võlli külge. Peale seda saab testitava õhupilu kauguse paika sättida.

Prototüübi testimisel viiakse kõigepealt läbi tühijooksukatse, et vaadata, kuidas sidur käitub suurtel pöörlemiskiirustel. Kõigi katsete alguses pannakse mõlemad mootorid tööle. Kui nimikiirus on saavutatud, lülitatakse üks mootor välja ja jälgitakse siduri käitumist. Kindlasti tuleb enne testimist kasutada kaitseprille ja kaitsekatet siduri peal, et testimise ajal testijad viga ei saaks. Peale seda viiakse läbi koormuskatse, kus testitakse maksimaalset momenti ja uuritakse siduri käitumist maksimaalsel momendi ületusel. Koormuse testimiseks vähendatakse ühe mootori pöörlemiskiirust. Mida suurem on kiiruste erinevus, seda suurem pöörlemismoment tekib. Momenti peab uurima ka erinevatel kiirustel, et analüüsida kiiruse mõju siduri momendile. Viimasena testitakse äkilist momendi tõusu mõju katseobjektile. Selle testiga uuritakse, kui hästi kaitseb sidur mootorit. Joonisel 4.6.1 on toodud siduri testimisel kasutatav põhimõtteskeem.



Joonis 4.6.1 Reluktantssiduri katsetamise põhimõtteskeem. Skeemil näidatud juhtimispaneelid on sagedusmuunduri juhtimiseks.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva töö eesmärgiks oli uurida magnetiliste sidurite rakendusvaldkondi ja projekteerida prototüüp. Töös keskenduti püsिमagnetsidurite uurimisele ja projekteerimisele. Esimeses peatükis toodi ära püsिमagnetsidurite süsteemide põhiline jagunemine, milleks on sünkroon-, asünkroon- ja reluktantssidurid. Selliste sidurite puhul on võimalik kaks siduri poolt eraldada ja nende vahele paigaldada mittemagneetuv materjal. Sellisest mittemagneetuvast materjalist saab ehitada veetavale poolele suletud keskkonna ja seda tehes säilitatakse ka jõuülekanne. Põhilised töös ära mainitud rakendusvaldkonnad on pumbad, mida kasutatakse meditsiinis, ja ventilatsioonisüsteemides. See muudab mootori hoolduse lihtsamaks ja süsteemid töökindlamaks.

Esimese peatüki lõpus välja toodud püsिमagnetsidurite analüüsist selgus, et nad on paindlikumad nihetele ja nurga all töötamisele kui tavalised sidurid, sest nad ei vaja töötamiseks füüsilist kontakti. Asünkroon-siduri positiivsed küljed on lihtne geomeetria, väike komponentide arv, neid on lihtne valmistada ja nad on head momendi leevendid. Negatiivsed küljed on temperatuuri kasv ja kiiruse langus momendi kasvades. Sünkroonsiduri positiivsed küljed on suur sünkroonkiiruse säilitamise võime, puuduvad kaod, kõige kompaktsem ja võimekaim. Negatiivsed küljed on suur vibratsioon maksimaalse momendi ületusel, kallis ja suur tõmbejõud võlli sihis. Reluktantssiduri positiivsed küljed on odavus, sünkroonkiirus, väikesed kaod ja väike komponentide arv. Negatiivsed küljed on keeruline tootmine, vibratsioon ja keeruline geomeetria.

Väljajuhil peavad olema head magnetilised omadused ja suur magnetvootiheduse taluvus. Kinnitustoed peavad olema mittemagneetuvast materjalist, et tekiks täiuslik aheldusvoog läbi magnetite ja väljajuhi. Töös võrreldi kolme magneti tüüpi Ferrite, SmCo ja neodüümmagneteid. Kõige paremad reluktants- siduri magnetid olid neodüümmagnetid oma suure energiatootlikusega. Nendest magnetitest on võimalik väikeste mõõtude korral kõige rohkem magnetilist jõudu kätte saada. Neodüümmagnetite energiatootlikus jääb vahemikku 43 – 53 mega gauss oersti ehk 342 – 422 kilodžauli kuupmeetri kohta.

Kolmandas peatükis tehti kindlaks kõigepealt lähteandmed ja piirangud disainile. Kõige suuremaks piiranguks oli suurus, sest siduri väljajuhid prinditi metalli 3D printeriga ja selle sai maksimaalselt toota detaile suurusega 70 mm. Projekteerimise teises etapis viidi läbi analüütilised arvutused. Selles etapis arvutati välja ainult summaarne jõud siduri pooluste vahel ja võrreldi kolme magnetmaterjali. Arvutused viidi läbi lihtsustatud mudelit kasutades ja kõiki kadusid ei arvestatud. Kõige paremad magnetid olid neodüümmagnetid ja kõige halvemad ferriit magnetid.

Neodüümmagnetitega saadi summaarseks jõuks 891,1 N kui õhupilu laius oli 1 mm. Sama õhupilu laiuse juures SmCo magnetid andsid jõuks 492,25 N ja ferriit magnetid ainult 65,09 N. Analüütilistes arvutustes ei arvatatud momendi jõudu. Piisas summaarse jõu arvutamisest, et tekiks arusaam, kuidas erinevad magneti parameetrid mõjutavad disaini. Projektis kasutavateks magnetiteks valiti neodüümmagnetid.

Projekteerimise neljandas etapis viidi läbi 2D FEM analüüs projekteeritavale sidurile. See on täpsem, kui analüütilised arvutused. Analüüsiks tehti projekteeritavast sidurist pinnalaotus ja magnetite vahekauguseks võeti 2D mudelis leitud magnetite keskmine vahekaugus. Analüüsis kasutati 3D prinditava metalli magneetumiskõverat ja küllastuspiiri, milleks oli 1,5 T. Analüüsist tuli välja, et kõige parema nihke korral, kus moment oli maksimaalne oli horisontaalselt mõjuv jõud 143,27 N, vertikaalselt mõjuv jõud 511,19 N ja moment 3,196 Nm. Võrreldi arvutuslike ja analüüsiga saadud summaarseid jõude ja saadi erinevuseks 16 %, kui õhupilu laius oli 1 mm. Erinevus suurenes õhupilu suurenedes ja 10 mm õhupilu korral oli jõudude erinevus 70 %. See tulenes sellest, et analüütilises arvutustes ei arvestatud puistevoogu ja loeti aheldusvoogu ideaalseks.

Projekteerimise kuuendas etapis tehti 3D FEM analüüs. See meetod on eelnevast kahest kõige täpsem. Kasutati väljajuhil magneetumiskõverat ja küllastuspiiri. Uuriti erinevate väljajuhtite paksustel momenti: 1 mm väljajuhtide paksuse korral oli moment 0,98 Nm, 6,5 mm raudploki ja 8 mm magnetite väljajuhtide paksuse korral oli moment 2,41 Nm. Prototüübi printimiseks valiti 3 mm raudploki ja 4 mm magnetite väljajuhtide paksuseks, mille moment oli 2,26 Nm. Vastavad momendid leiti 13 kraadise mehaanilise nurga juures, sest selle nurga juures oli moment maksimaalne. 3D FEM analüüsi ja analüütilise arvutuse summaarse jõu erinevus oli 27 % ja 6 mm õhupilu korral 82 %. 2D FEM analüüsi ja 3D FEM analüüsi summaarse jõu erinevus oli 13 % ja 6 mm õhupilu korral 68 %. Suure õhupilu korral on viga nii suur, sest tekib palju puistevoogu toetusrõngaste keskmise ringi ääres olevad magnetiosade vahel tekib aheldusvoog, mis ei läbi vastas poole väljajuhti.

Projekteerimise eelviimases osas tuli prototüüp kokku panna ja seda testida. Kokkupanekuks on soetatud magnetid, magnetliim, kinnitustoe poldid ja mutrid, aga kahjuks prototüüpi täiesti valmis ehitada ei jõutud, kuna kahel korral printimine ebaõnnestus halbade printimisparameetrite pärast ja printeril on pikk kasutusjärjekord, et uuesti proovida. Testimine antud töös on seetõttu ainult teoreetiliseks.

Autori nägemuses on töö ka täiendavaid tulevikuplaane, saab alustatud prototüübi printimist edasi arendada ja prototüübi lõpuni valmis ehitada. Sidurile saab välja töötada ka testimispingi, kus tudengid saavad prototüüpsiduriga labori katseid läbi viia. Üheks tuleviku tööks võib olla veel projekteerija disainitud magnetitega prototüüp, millel on suurem moment sama suuruse juures.



## SUMMARY

The aim of this work was to study the application of magnetic clutches and to design a prototype. Work focused on research and design of permanent magnet clutches. The first chapter outlines the main distribution of permanent magnet clutch systems, which are synchronous, asynchronous and reluctance couplings. In the case of such clutches, it is possible to separate the two clutches and to place a non-magnetic material between them. Such a non-magnetizing material can be used to construct a closed environment for the shaft pull side and in doing so, it will also maintain the transmission. The main applications mentioned in the work are pumps used in medicine and ventilation systems. This makes engine maintenance easier and the systems more reliable.

The analysis of permanent magnet clutches at the end of Chapter one shows that they are more flexible for shifting and working at angles than conventional clutches because they do not require physical contact to work. The positive sides of the asynchronous clutch are simple geometry, a small number of components, easy to make and good torque smoothener. The downside is the increase in temperature and the speed rate decrease as the moment increases. The positive side of the synchronous clutch is the ability to maintain synchronous speed, the loss, the most compact and the most powerful. The drawbacks are high vibration over the maximum torque, expensive and high thrust in the shaft direction. The positive sides of the reluctance clutch are cheapness, synchronous speed, small losses and a small number of components. The downside is complex production, vibration and complex geometry.

The magnetic conductor must have good magnetic properties and high magnetic flux tolerance. Fastening brackets must be made of non-magnetic material to create a perfect linkage flow through the magnets and magnetic conductors. The work compared three types of magnets, Ferrite, SmCo and Neodymium magnets. The best reluctance clutch magnets were neodymium magnets with their high energy. From these magnets it is possible to get the most magnetic force in small sizes. The energy production of neodymium magnets ranges from 43 to 53 mega gauss oersted, or 342 to 422 kilojoules per cubic meter.

In the third chapter evaluated initial data and design restrictions were first identified. The biggest limitation was the size, because the clutch magnetic conductors were printed with a metal 3D printer and could be produced at maximum with 70 mm diameter. In the second stage of the design, analytical calculations were performed. At this stage, only the total force between the coupling poles was calculated and three magnetic materials were compared. The calculations were carried out using a simplified model and not all losses were counted. The best magnets were neodymium magnets and the worst ferrite

magnets. The total force of the neodymium magnets was 891.1 N when the air gap width was 1 mm. At the same air gap width, the SmCo magnets gave a force of 492.25 N and the ferrite magnets only 65.09 N. It was enough to calculate the total force to get an idea of how different magnet parameters affect design. Neodymium magnets were selected as magnets for the project.

In the fourth stage of design a 2D FEM analysis was performed on the design clutch. This is more accurate than analytical calculations. For the analysis, the projected clutch surface area was taken and the distance between the magnets was taken as the average distance between the magnets found in the 2D model. The analysis used a magnetization curve of 3D metal and a saturation limit of 1,5 T. Comparative and analytical total forces were compared and the difference was 16% when the air gap width was 1 mm. The difference increased as the air gap increased, and with a 10 mm air gap the force difference was 70%. This was due to the fact that the strew flow was not taken into account in the analytical calculations and was considered to be the ideal linkage flow.

In the sixth stage of design, 3D FEM analysis was performed. This method is the most accurate of the previous two. The magnetization curve and saturation limit were used on the magnetic conductors. The moments of the thickness of the different magnetic conductors were investigated: at a thickness of 1 mm, there was a moment value 0.98 Nm, with 6.5 mm of iron block and 8 mm of magnet block conductor thickness there was a moment value 2.41 Nm. For printing the prototype, the thickness with the 3 mm iron block and 4 mm magnet block conductors were chosen, with a moment of 2.26 Nm. The corresponding moments were found at a 13 degree mechanical angle, because at this angle the moment was maximum. The difference between the total force of the 3D FEM analysis and the analytical calculation was 27% and with the 6 mm air gap was 82%. The total force difference of 2D FEM analysis and 3D FEM analysis was 13% and with 6 mm air gap was 68%. In the case of a large air gap, the error is higher, because there is a lot of linkage flow that occurs between the magnetic parts at the middle circle of the support ring, which does not pass through the magnetic conductor.

Before the last part of the design, the prototype had to be assembled and tested. Magnets, magnetic adhesives, fastening bolts and nuts have been purchased for assembly, but unfortunately, the prototype was not fully built because two times the printing failed due to poor printing parameters and the printer has a long usage order to try again. Testing in this work is therefore only theoretical. In the author's vision, there are additional plans for the future, the prototype can be further developed and ready for the prototype. The clutch can also be equipped with a test machine where students can perform prototype-based laboratory tests. One future work could be a prototype with designer magnets, which has a larger moment at the same size.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] „Sünkroonsed püsimagnetsidurid“, 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.thyssenkrupp-magnettechnik.com/index.php/synchronkupplungen-erlaeuterungen.html>. [Kasutatud 02.05.2019].
- [2] „Efficient pump system for improved quality of life“, 2019. [Võrgumaterjal].  
<https://www.maxonmotor.com/maxon/view/application/Efficient-pump-system-for-improved-quality-of-life>. [Kasutatud 02.05.2019].
- [3] T. Lubin, S. Mezani, A Rezzoug, Experimental and Theoretical Analysis of Axial Magnetic Coupling under Steady-State and Transient Operation, , University Lorraine, 2013.
- [4] Sang. A. Hong, Jang. Choi, Seok. Jang, Kyng. Jung, Torque Analysis and Experimental Testing of Axial Flux Permanent Magnet Couplings Using Analytical Field Calculations Based on Two Polar Coordinate Systems, Chungnam National University, 2014.
- [5] J. Fontchastagner, T. Lubin, D. Netter, Axial-Field Eddy-Current Coupling: a 3D Test Problem for Numerical Experiments, University of Lorraine, 2017.
- [6] J. Fontchastagner, T. Lubin, S. Mezani, N. Takorabet, Design optimization of an axial – field eddy – current magnetic coupling based on magneto – thermal analytical model, University of Lorraine, 2018.
- [7] T. Lubin, A. Rezzoug, Improved 3D Analytical Model for Axial – Flux Eddy – Current Couplings with Curvature Effects, University Lorraine, 2017.
- [8] I. Fridolin, Elektromagnetväljad ja lained Biomeditsiinitehnikas, lk 23 - 37, Tallinna tehnikaülikool, 2011.
- [9] K. Janson, Elektrimasinad, lk 30 – 37, Tallinn, 2012.
- [10] „Soft and Hard magnetic materials“. [Võrgumaterjal]. Saadaval:  
<https://nptel.ac.in/courses/115103038/module1/lec5/1.html>. [Kasutatud 26.03.2019].
- [11] „Materials and Grades“. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.amazingmagnets.com/t-magnetic-grade-chart.aspx>. [Kasutatud 03.05.2019].
- [12] K. Tuttelberg, Aeglasekäiguliste uurdevaba püsimagnetgeneraatori elektriliste parameetrite analüüs Tallinna tehnikaülikool, 2012.

[13] Y. Yao, Gwo-li, G. Huang, S. J. Wang, Theoretical Computations for The Torque of Magnetic Coupling, National Chung Cheng University, 1995.

[14] „Neodüümmagnet – Plokk 20x10x5mm [N52]“. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://www.amagnet.eu/et/component/virtuemart/?page=shop.product\\_details&flypage=flypage.tpl&product\\_id=140](http://www.amagnet.eu/et/component/virtuemart/?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=140). [Kasutatud 21.03.2019].

[15] „Elektrimootor 0,09kW“. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.alas-kuul.ee/elektrimootor-0-09kw-230-400v-1000-1-min-b3-ip55-f-s1-vem-k21r-63k6-0-09-1000-b3>. [Kasutatud 15.04.2019].

LISAD

## Data sheet

15.04.2019 MADE WITH VEM EKAT V10.9



Manufacturer	Customer
<b>VEM motors Thurm GmbH</b> <b>Äußere Dresdner Str. 35</b>	
<b>08066 ZWICKAU</b> <b>Deutschland</b>	

### Three-phase motors with squirrel cage rotor, standard motors Housing grey cast iron

Type	K21R 63 K6			
Duty type	S1			
Design output	( kW ) 0,09			
Efficiency determination	[ - ] EN 60034-2			
Design frequency	( Hz ) 50			
Design speed	[ rpm ] 895			
Design voltage	( V ) 230/400			
Connection	[ - ] D		Y	
Design current	[ A ] 0,8		0,5	
Relative pull-in current	[ - ] 2,5			
Relative starting torque	[ - ] 2			
Relative pull-up torque	[ - ] 2			
Relative pull-out torque	[ - ] 2,4			
Loading state	[ % ] 100	75	50	25
Power factor	[ - ] 0,56	0,51	0,44	0,35
Efficiency	[ % ] 50,5	45,3	35	23
Th. cl.	155(F)			
Coolant temperature	( °C ) -20°C...+40°C			
Altitude above sea level	( m ) 1000m			
Degree of protection IP	IP55			
Moment of inertia	( kgm <sup>2</sup> ) 0,00024			
Motor weight	( kg ) 4,9			
Bearing, D-side	6201 2Z C3			
Bearing, N-side	6201 2Z C3			
Relubrication interval	( h )			
Grease type	Asonic GLY 32			
Grease amount	( g )			
A-sound pressure level	( dB ) 40			

### Options

Type of mounting	IM B3
Flange	-
Terminal box	Standard
Position of terminal box	on the top
Cable gland	Sealing plug
Position of cable entry	right
Shaft	Standard, 1 shaft end
Bearing	Easy bearing arrangement
Limit values to vibration velocity	Class A
	Balancing with half key
Colour system	01 Moderate (KK C2),RAL 7031 blue-grey
Delivery conditions and/or official regulations:	IEC / EN 60034-1

This document was produced electronically, all specifications are valid only after confirmation of the manufacturer

## Dimensional sheet

15.04.2019 MADE WITH VEM EKAT V10.9



Manufacturer

Customer

**VEM motors Thurm GmbH**  
 Äußere Dresdner Str. 35

**08066 ZWICKAU**  
 Deutschland

Three-phase motors with squirrel cage rotor, standard motors  
 Housing grey cast iron

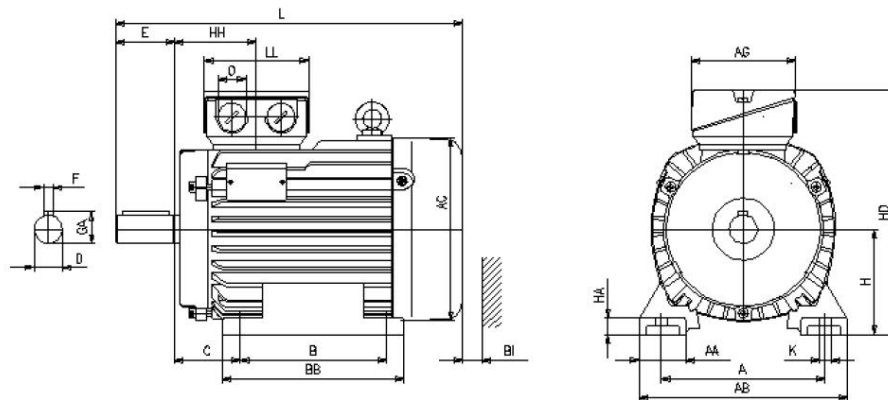
**K21R 63 K6**

### Mounting position



Type of mounting: IM B3  
 Flange: -  
 Position of terminal box: on the top  
 Brake type:  
 Forced-ventilation:

Terminal box: KA 05  
 Cable gland O: 1 x Sealing plug



### Motor

A	AA	AB	AC	AD	B	B'	BA	BA'	BB	C	CA	K	K'
100	28	128	109	-	80	80	-	-	100	40	-	8	8
L	LC	H	HA	HD	HH	BI	Terminal box			AG	LL	BE	AH
179	-	63	10	161	58	14	92	92	-	-	-	-	

### Flange

P	N	LA	M	T	S	Tolerances			
-	-	-	-	-	-	H	N	D	DA
						-0,5	j6	k6	k6

### Shaft-DS

D	E	GA	F	DB
11	23	12,5	4	DIN 332 - DS M4

### Shaft-NS

DA	EA	GC	FA
-	-	-	-

### DB...Centre hole

Delivery conditions and/or official regulations: IEC / EN 60034-1

This document was produced electronically, all specifications are valid only after confirmation of the manufacturer

Lisa 3 Momendi, jõu tabel sõltuuses mehaanilisest nurgast

Mehaaniline nurk (°)	Moment (Nm)	Jõud (N)
0	0,004	551,06
1	0,192	549,66
2	0,291	548,29
3	0,456	547,66
4	0,724	542,68
5	0,964	536,06
6	1,211	527,46
7	1,427	517,27
8	1,632	506,64
9	1,849	495,14
10	2,014	482,72
11	2,119	466,31
11.5	2,171	460,16
12	2,178	449,95
12.1	2,217	448,79
13	2,257	435,29
13.5	2,247	423,70
14	2,223	417,40
15	2,178	398,97
16	2,023	380,27
17	1,889	364,29
18	1,688	350,34
19	1,400	335,80
20	0,943	326,66

21	0,679	320,54
22	0,191	315,76
23	-0,202	315,31
24	-0,614	319,99
25	-0,981	326,30
26	-1,435	336,40
27	-1,719	349,66
28	-1,886	364,80
29	-2,044	378,91
30	-2,175	399,18
31	-2,247	417,67
32	-2,221	432,90
33	-2,163	448,95
34	-2,105	465,98
35	-2,010	483,44
36	-1,834	496,41
37	-1,637	507,81
38	-1,431	517,33
39	-1,215	526,89
40	-0,997	535,75
41	-0,713	543,36
42	-0,492	547,95
43	-0,275	547,81
44	-0,176	549,51
45	0,004	551,06