

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Elektrotehnika instituut

ATV70LT

Ragnar Johanson

**PÜSIMAGNETITEGA  
SÜNKROONRELUKTANTSMASINA  
MOMENDIKARAKTERISTIKUTE  
MODELLEERIMINE**

Magistritöö

Instituudi direktor ..... prof. Tõnu Lehtla

Juhendaja ..... vanemteadur Ants Kallaste

Lõpetaja ..... Ragnar Johanson

Tallinn 2015

## AUTORIDEKLARATSIOON

Kinnitan, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus. Kõik selle koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud. Varem ei ole selle alusel kutse- ega teaduskraadi ega inseneridiplomit taotletud. Töö on koostatud litsentseeritud tarkvara abil.

Tallinn, 8.06.2015.a.

..... Ragnar Johanson

## REFERAADID

ATV70LT <b>Püsimagnetitega sünkroonreluktantsmasina momendikarakteristikute modelleerimine</b> <b>Ragnar Johanson</b> , üliõpilaskood 132437AAAMM, 2015. – 78 lk.
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL Energeetikateaduskond Elektrotehnika instituut, elektrotehnika aluste õppetool
Töö juhendaja: vanemteadur Ants Kallaste
<b>Võtmesõnad:</b> Püsimagnetitega sünkroonreluktantsmasin, magnetvoo tõkendid, tangensiaalribid, radiaalribid, programmid Matlab ja FEMM, Lõplike elementide meetod (FEA)
<b>Referaat:</b>  Lõputöö eesmärk on uurida püsimagnetitega sünkroonreluktantsmasina teoreetilist tausta, teha uuritavale masinale konstruktsiooni valik ja modelleerida masina erinevaid konstruktsioone tarkvaradega Matlab ja FEMM.  Lõputöö on jaotatud kolmeks osaks, millest esimeses on räägitud masina tööpõhimõttest ehk kuidas tekib reluktantsmoment, toodud välja mõned olemasolevad konstruktsioonid, lühike ülevaade reluktantsmasinate ajaloost, püsimagnetitega sünkroonreluktantsmasina erinevused teistest elektrimasinatest ja masina võimalikud rakendused.  Teises osas põhjendatakse ära masina konstruktsiooni valik, mis hõlmab masina komponentide valikut ja sellele teoreetilist põhjendust.  Kolmandas osas käsitletakse masina modelleerimise olemust, kuidas modelleerimiskatsed läbi viidi ja milliseid tulemusi otsiti. Antakse ülevaade töös kasutatud lõplike elementide meetodist. Analüüsitakse saadud tulemusi, näidates testitud konstruktsioone, välja pilte ja momendi graafikuid koos selgitustega. Modelleerimiskatsete tegemiseks kirjutati Matlab'is programmikood, mis tegi katsete teostamise võimalikuks. Programmikood asub töö lõpus lisa 1.

ATV70LT

**Моделирование характеристик крутящего момента синхронно-реактивного двигателя с постоянными магнитами**

**Ragnar Johanson**, 132437AAАММ, 2015. – 78 lk.

ТАЛЛИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ Энергетический факультет

Электротехнический институт

Кафедра электропривода и электроснабжения

Руководитель работы: Ants Kallaste

**Ключевые слова:**

Синхронно-реактивный двигатель с постоянными магнитами, ограничители магнитного потока, тангенциальные и радиальные потоки, программное обеспечение Matlab и FEMM, метод конечных элементов (FEA)

**Реферат:**

Целью данной работы является изучение теоретических основ работы синхронно-реактивного двигателя с постоянными магнитами, произвести выбор конструкции для исследуемой электромашин и моделирование различных образцов конструкций в программах Matlab и FEMM.

Дипломная работа разделена на три части в первой из которых приводится теоретическое описание принципа работы и принцип образования момента магнитного сопротивления, приведены некоторые имеющиеся конструкции, небольшой обзор истории синхронно-реактивных двигателей, конструкции синхронно-реактивных двигателей, отличия синхронно-реактивных двигателей от других электромашин и возможные применения на практике.

Во второй части обосновывается выбор конкретной конструкции, которая также охватывает выбора компонентов и теоретическое объяснение.

В третьей части затрагивается суть процесса моделирования, как проводилось моделирование и какие результаты ожидалось. Дается небольшой обзор используемого в работе метода конечных элементов. Проводится анализ полученных результатов, демонстрируются испытанные конструкции, а также приложены фотографии и графики с пояснениями. В процессе моделирования в программе MatLab был написан код, который позволил сделать испытания возможными. Программный код приложен в дополнении №1.

ATV70LT

## **Modelling of permanent magnet assisted reluctance machine torque characteristics**

**Ragnar Johanson**, student code 132437AAAMM, 2015. – 78 pages.

TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY \* Faculty of Power Engineering

Department of Electrical Engineering

Chair of Electrical Drives and Electricity Supply

Tutor of the work: senior research fellow Ants Kallaste

**Key words:** Permanent magnet assisted reluctance machine, flux barrier's, tangential rib's, radial rib's, Matlab and FEMM, finite element analysis (FEA)

### **Summary:**

The aim of the thesis is to investigate permanent magnet assisted synchronous reluctance machine theoretical background, to make design build for the machine and test different kind of design structures of the machine using Matlab and FEMM software's.

The thesis is divided into three parts. As far as the first part is concerned, there are described operation principle of the machine, quick overview how reluctance torque emerges, pointed out some available design builds, brief overview about history and some available applications for permanent magnet assisted reluctance machines.

When it comes to the second part, there are talked about design construction of the machine what author made and theoretical reasons why different kind of components are used in the machine.

On the question of third part, there are described the principle of modelling the machine and what kind of results we were looking for. Brief overview about finite element analyses (FEA). Finally explanations about obtained results with machine construction visuals, field pictures and torque graphs. Moreover, program code was required to make those modelling tests. Therefore the author made program code in Matlab which is located at the very end of the thesis.

# SISUKORD

Magistritöö ülesanne .....	7
1. Eessõna .....	8
2. Sissejuhatus .....	9
3. Reluktantsmasinate teoreetiline taust .....	11
3.1. Masina tööpõhimõte ja võimalikud konstruktsioonid .....	11
3.2. Reluktantsmasina areng .....	15
3.3. Püsimagnetitega reluktantsmasina erinevused teistest masinatest .....	17
3.4. Püsimagnetitega reluktantsmasina erinevaid rakendusi .....	20
4. Püsimagnetitega reluktantsmasina konstruktsiooni valik .....	22
4.1. Staatori valik .....	22
4.2. Rootori valik .....	25
4.3. Magnetvoo tõkendite valik .....	26
4.4. Püsimagnetite valik .....	28
5. Masina modelleerimine .....	30
5.1. Modelleerimise idee ja olemus .....	30
5.2. Fea- meetodi tutvustamine .....	35
5.3. Modelleerimise katsed ja tulemused .....	38
5.4. Modelleerimiste kokkuvõte .....	61
6. Kokkuvõte .....	64
Kasutatud kirjandus .....	66
Lisa 1. Modelleerimiskatsete läbiviimiseks koostatud programmikood .....	68

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Elektrotehnika instituut

KOOSKÕLASTATUD

Prof. T. Lehtla.....

..... 2015

**MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE**

Ragnar Johanson, üliõpilaskood 132437AAAM32

Magistritöö teema: Püsimagnetitega sünkroonreluktantsmasina modelleerimine

Ülesanne: Uurida teoreetilist tausta püsimagnetitega sünkroonreluktantsmasina kohta, teha masinale konstruktsiooni valik, modelleerida masinat tarkvaradega Matlab Simulink ja FEMM.

Lähteandmed:

1. Teadusartiklid (IEEE)
2. Õpikud ja raamatud elektrimasinate kohta
3. Juhendaja nägemused ja soovid
4. Erinevate elektrimasinate tehnilised dokumendid

Lahendamisele kuuluvate probleemide loetelu:

1. Teoreetilises taustas uurida masina tööpõhimõtet ja konstruktsioone, tuua välja erinevused teistest masinatest ja erinevad rakendused, kus masinat kasutatakse.
2. Masina konstruktsiooni valiku juures valida välja sobiv staator, rootor. Seal juures ka magnetvoo tõkendite valik, püsimagnetite valik ja paigutus.
3. Masina modelleerimise osas lahti kirjutada, mida modelleeritakse ja mis tulemusi otsitakse. Kirjeldada lahti mida tähendab lõplike elementide meetod. Esitada modelleerimise tulemused, kus on välja pildid, muutused ja momendi kõverad.
4. Võimalusel ka masina katsetamine.

Magistritöö esitada eesti keeles kahes eksemplaris koos eesti- ja kahe võõrkeelse referaadiga hiljemalt 08.06.2015.

Juhendaja:

Ülesande vastu võtnud:

Vanemteadur A. Kallaste .....

Üliõpilane R. Johanson .....

# 1. EESSÕNA

Käesolev magistritöö hõlmab püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasina momendikarakteristikute modelleerimist ja viidi läbi Tallinna Tehnikaülikoolis. Antud teema valik tehti tänu autori lõputöö juhendajale Ants Kallaste'le. Magistritöö teema pakkus huvi, sest hõlmas reluktantsmasina teooriat ja tundmaõppimist, püsिमagnetite kasutust, staatori ja rootori valikut, modelleerimist programmiga FEMM ja programmeerimisoskust. Teema on huvitav ka sellepärast, et püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasinad on arenev valdkond ja kogub üha enam populaarsust. Ühtlasi tahan tänada enda lõputöö juhendajat Ants Kallaste't, kes aitas mind lõputöö koostamisel vajalike nõuannete ja soovitusetega. Lisaks tahan tänada kõiki inimesi, kes toetasid mind selle viie ülikoolis veedetud aasta jooksul.



## 2. SISSEJUHATUS

Käesolev lõputöö on koostatud Tallinna Tehnikaülikoolis elektrotehnika instituudis ja hõlmab püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasina uurimist ja modelleerimist. Uurimus keskendub reluktantsmasina momendikarakteristikute uurimisele erinevate rootori kujude korral, kus pööratakse tähelepanu magnetvoo tõkendite kujule, ribide laiuse mõjule ja püsिमagnetite valikule. Teema valiku aitas teha lõputöö juhendaja Ants Kallaste. Kuna reluktantsmasinad pakkusid huvi, siis sai teema heaks kiidetud. Lisaks tegi antud magistritöö huvitavaks modelleerimiskatsete läbiviimine ja võimalus puutuda kokku programmeerimisega. Reluktantsmasinate momendigraafikute modelleerimiseks koostati programmikood.

Valitud magistritöö on aktuaalne, sest aina rohkem suureneb huvi muuta rakendused ökonoomsemaks ja keskkonnasõbralikumaks. Mida aeg edasi, seda paremaid tulemusi on hakatud reluktantsmasinatega saavutama ning kokkuvõttes omavad nad häid karakteristikuid, väiksemat materjalikulu ja head kasutegurit võrreldes traditsiooniliste elektrimasinatega. On eeldatav, et nad muutuvad tulevikus aina rohkem populaarsemaks, sest püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasinad ei sisalda suurt kogust magneteid ning püsिमagnetite hinnad on muutunud ajaga odavamaks.

Magistritöö eesmärk oli uurida teoreetilist tausta püsिमagnetitega reluktantsmasina kohta, teha masinale konstruktsiooni valik, modelleerida masinat tarkvaradega Matlab ja FEMM. Modelleerimiseks teostati katsed, mille tulemusena tekkisid momendinurgatunnusjoongraafikud, kus erinevate koormusnurkade juures on kajastatud momendid. Selliste katsete läbiviimiseks keerati masina staatorit 190 elektrilist kraadi sammuga 0,5 kraadi ja iga koormusnurga juures arvutati moment programmi FEMM abil. Koostatud programmikood tegi katsed automaatseks ja andis võimaluse katsete teostamiseks. Modelleerimiskatsete eesmärk oli uurida, kuidas magnetvoo tõkendite kuju, ribide laius ja püsिमagnetid mõjutavad masina momenti.

Uurimisobjekti põhikomponentideks olid staator ja rootor. Masina konstruktsiooni valik tehti tuginedes kirjandusele ja juhendaja nägemustele. Staatorina võeti kasutusele tavalise asünkroonmootori staator. Rotor tehti nelja pooluseline, kasutades kolme magnetvoo tõkendit ja kahte magnetit ühe pooluse kohta.

Töö sisuline osa on jaotatud kolmeks. Neist esimeses, peatükis 3, on selgitatud teoreetilist tausta reluktantsmasinatest, kus on lahti seletatud reluktantsmomendi olemus ehk masina tööpõhimõte, mõned olemasolevad konstruktsioonid, lühike ülevaade reluktantsmasinate ajaloo, püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasina erinevused teistest elektrimasinatest ja masina võimalikud rakendused.

Peatükis 4 selgitatakse masina konstruktsiooni valikut. Põhjendatakse ära masina komponentide valikud nagu staator ja rootor. Lisaks veel teooria nende valikute tegemiseks. Näidatakse ära ka magnetvoo tõkendite valik ja valitud püsिमagnetite põhiaandmed.

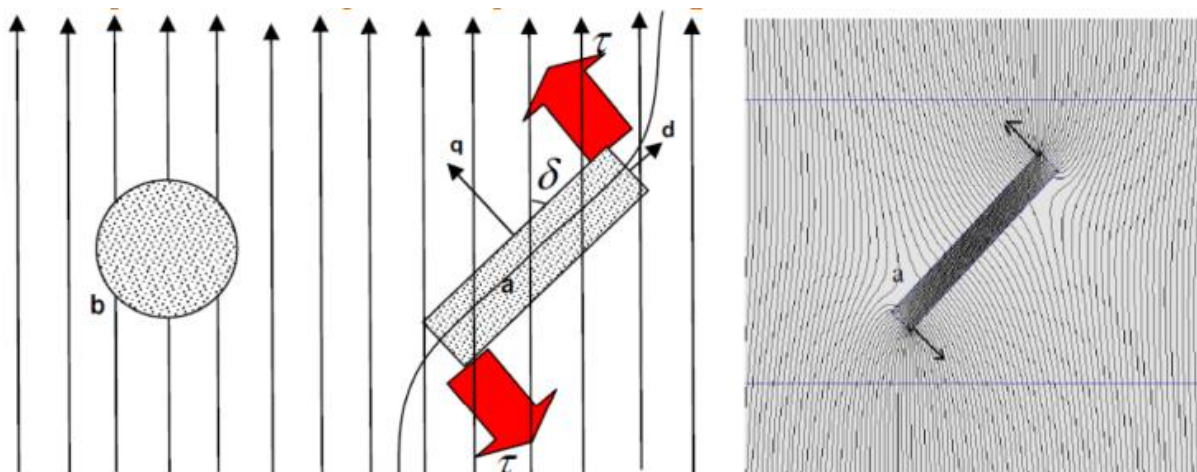
Viimases peatükis käsitletakse masina modelleerimist. Kirjutatakse lahti, mida modelleeriti ja milliseid tulemusi otsiti. Antakse ülevaade sellest, kuidas modelleerimiskatsed läbi viidi ja mida kujutab endast lõplike elementide meetod. Seejärel on kajastatud saadud modelleerimistulemused koos välja piltidega, momendi kõveratega, sageduspektrite ja selgitustega. Lõpuks on tehtud modelleerimistulemuste põhjal järeldus sellest, kuidas rootoris magnetvoo tõkendite, ribide ja magnetite muutmine mõjutab reluktantsmasinat.

### 3. RELUKTANTSMASINATE TEOREETILINE TAUST

#### 3.1. Masina tööpõhimõtte ja võimalikud konstruktsioonid

Püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasinad saavad põhilise liikumapaneva jõu reluktantsmomendist. Alloleval joonisel 3.1 on magnetväli, mille sisse on paigutatud kaks rauast kujundit a ja b. Esimeseks kujundiks on kera ja teiseks on ristküliku kujuline piklikum detail. Rauast kera läbib magnetvoog, kuid liikumapanevat jõudu ei teki. Teine kujund (a) hakkab pöörama ennast d- teljega magnetvälja jõujoonte liikumise suunda, kuni saab nendega paralleelseks. [1]

Joonisel 3.1 on kujutatud punaste nooltega jõud, kuhu suunas hakkab kujund pöörama. Seda jõudu, mis paneb kujundi a pöörama nimetatakse reluktantsmomendiks ja see tekib sellepärast, et kujundil a on d ja q- telje magnetilised takistused erinevad. Kõrval on ka pilt, kus on kahemõõtmelisena kujutatud magnetvälja, mis läbib sarnast kujundit ja lisaks nooltega näidatud liikumissuund. [1]



Joonis 3.1. Reluktantsmomendi selgitav joonis

Püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasin koosneb staatorist ja rootorist. Staatorina kasutatakse traditsioonilise kolmefaasilise elektrimasina staatorit. Rotor koosneb magnetvoogu juhtivast materjalist ja püsिमagnetitest. Rotoris mängib tähtsat rolli ka õhk, sest kasutatakse magnetvoo tõkendeid rootoris, mis tekitavad erineva magnetilise takistuse q ja d- telje sihis. Mida suurem on erinevus nende telgede magnetilisel läbitavusel, seda suurem

reluktantsmoment tekib. Rootorisse saab paigutada püsिमagnetid, mille tulemusena tekib püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasin, millel lisandub lisaks reluktantsmomendile ka püsिमagnetite poolt arendatav moment [2]. Need summeeruvad kokku ning tulemusena saavutatakse masinal suurem keskmine moment, parem võimsustegur ja suurem efektiivsus. [3]

Püsिमagnetitega abistatud sünkroonreluktantsmasina momendist moodustab põhilise osa reluktantsmoment ja sellele lisaks veel ka magnetite poolt moodustatud moment. Põhiidee püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasina disainis on saavutada võimalikult suur d ja q- telje induktiivsuste erinevus ja seda saab teha võttes kasutusele rootoris optimaalne arv püsिमagnetid ja magnetvoo tõkendeid. [4] Järgnevalt on esitatud ka sellise masina väändemomendi arvutusvalem [5]:

$$M = \frac{3p}{2} (\psi_{pm} i_q + \psi_d i_d - \psi_{qs} i_d) = \frac{3p}{2} [\psi_{pm} i_q + i_q i_d (L_d - L_q)], \quad (3.1)$$

kus  $p$  – pooluste arv,

$i_q$  ja  $i_d$  – vastavalt masina telgedel olevad voolud,

$\psi_{pm}$  – püsिमagnetite poolt moodustatud magnetväli (magnetvoog),

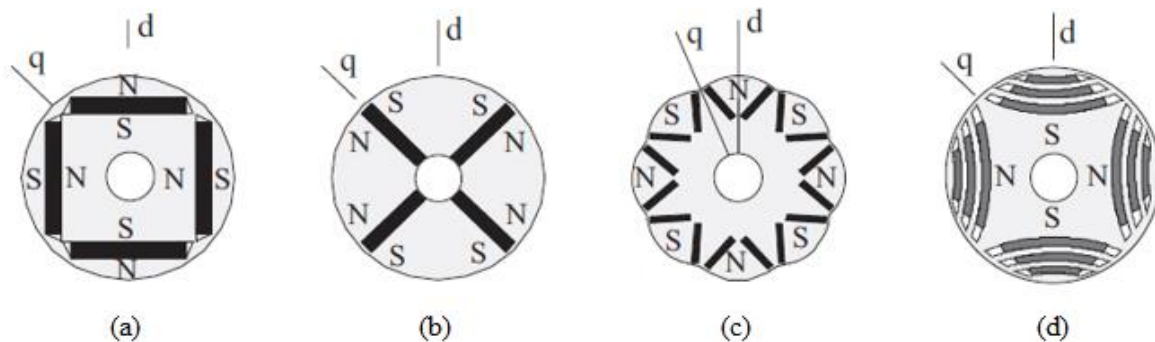
$\psi_d$  ja  $\psi_q$  – d ja q- telgedel olev magnetvoog.

$L_d$  ja  $L_q$  – d ja q- telgede induktiivsused

Eelnevast valemist 3.1 järeldub, et väändemoment sõltub palju d ja q- telje induktiivsuste erinevusest ja ka lisamagnetvoost, mida tekitavad magnetid. [5]

Püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasina disainis omab kõige suuremat tähelepanu rootor. Rootori konstrutsioon mõjutab väga palju masina karakteristikuid. Järgnevalt vaatame erinevaid rootori disaine, kus on kasutusel magnetvoo tõkendid ja püsिमagnetid, et saada parem ülevaade masina tööpõhimõttest. Oma olemuselt on püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasina rootori konstrutsioon sarnane väljapoolustega (*salient pole*) sünkroonmasinale, kus kasutatakse samuti magnetilist takistust erinevalt ära. Sellest tulenevalt vaatame ainult neid konstrutsioone, kus magnetid on asetatud rootori sisse. Väljapoolustega rootori puhul on d ja q- telje induktiivsuste suhe erinev. Kui magnetid on asetatud rootori sisse, siis on mingi osa magnetvoost tekitatud nende poolt, ehk nad on abistavad püsिमagnetid, mille abil parandatakse masina efektiivsust. Magnetid on kaitstud sellel juhul ka mahaaniliste vigastuste eest. [6]

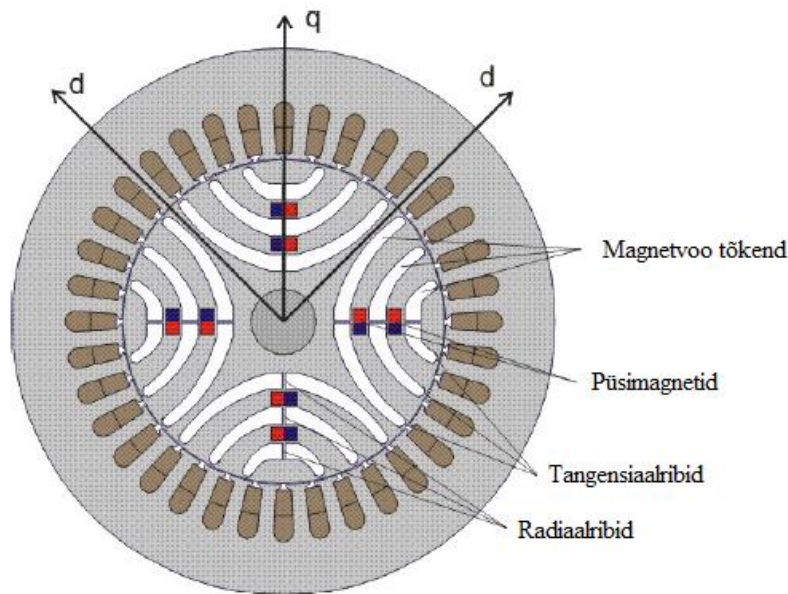
Järgmisel joonisel 3.2 on kujutatud neli erinevat rootori konstruktsiooni, kus magnetid on asetatud rootori sisse. Tähelepanu tuleb pöörata, et rootoril on *direct* ja *quadrant* teljed, mida lühemalt nimetatakse d ja q- telgedeks. Põhimõtte on tekitada d- telje suunas väike magnetiline takistus ja q- telje suunas võimalikult suur magnetiline takistus. Teisisõnu peab magnetvoog liikuma ainult d- telje suunas ja mitte q- telje sihis. Joonisel 3.2 olevatel rootoritel on näidatud q ja d- telgede ja magnetite suunad. Rootoritel a) ja b) on pooluse kohta kasutusel 1 magnet ja konstruktsioonis c) on ühe pooluse kohta kasutusele võetud 2 magnetit. Magnetitega saab suurendada õhupilu magnetvoo tihedust. Viimases rootori puhul on tegemist lamineeritud rootoriga, kus on kasutatud magnetvoo tõkendeid. Lisaks on magnetvoo tõkenditesse asetatud ka püsिमagnetid. Viimase konstruktsiooniga rootoreid on välja töötatud erinevaid ja antud töös on just neile rohkem tähelepanu pööratud. Sellepärast vaatame neid lähemalt. [6]



Joonis 3.2. Mõned püsिमagnetitega abistatud sünkroonmasina võimalikud rootori konstruktsioonid

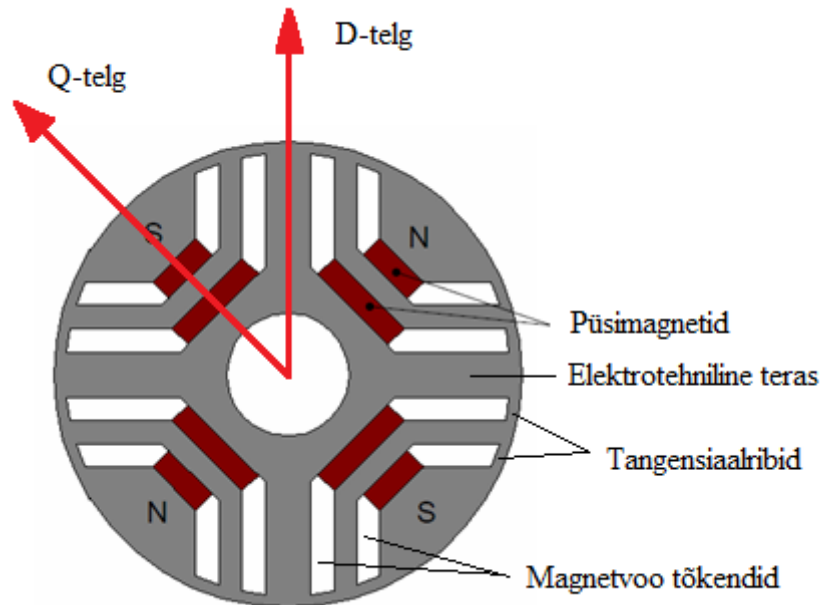
Selline rootor joonisel 3.2 (d) koosneb elektrotehnilisest terasest, magnetitest ning ka magnetvoo tõkenditest, mille materjalina on kasutatud õhku. Eelnevalt nimetatud rootori komponendid on näidatud järgnevatel joonistel 3.3 ja 3.4. Põhimõtte on selles, et elektrotehniline teras juhib magnetvoogu hästi ja õhk halvasti ning seda teadmist kasutades saab magnetvoo panna liikuma ainult meie vajalikus suunas. Näiteks magnetvoo tõkenditega saab takistada magnetvoo liikumist q- telje suunas. [6]

Kui eelmisel joonisel konstruksioonis d) liigub magnetvoog läbi magnetvoo tõkendite, siis on olemas ka disaine, kus magnetid on pandud rootori magnetjuhtidesse. Nii suurendavad püsिमagnetid magnetvoo tugevust d- teljes. Sellise konstruksiooni näide on esitatud järgmisel joonisel 3.3. [5]



Joonis 3.3. Püsımagnetitega abistatud sünkroonreluktantsmasina läbilõige koos selgitustega

Lisaks eelnevale konstruksioonile, kus püsımagnetid asetsevad magnetvoogu juhtivas materjalis, võivad nad asetseda ka magnetvoo tõkendis. Magnetite polaarsus on valitud nii, et suureneks d- telje magnetväli ja q- telje magnetvälja takistatakse ehk neutraliseeritakse. Sellise konstruksiooni näide on joonisel 3.4, kus kasutatakse sirge kujuga magnetvoo tõkendeid [7].



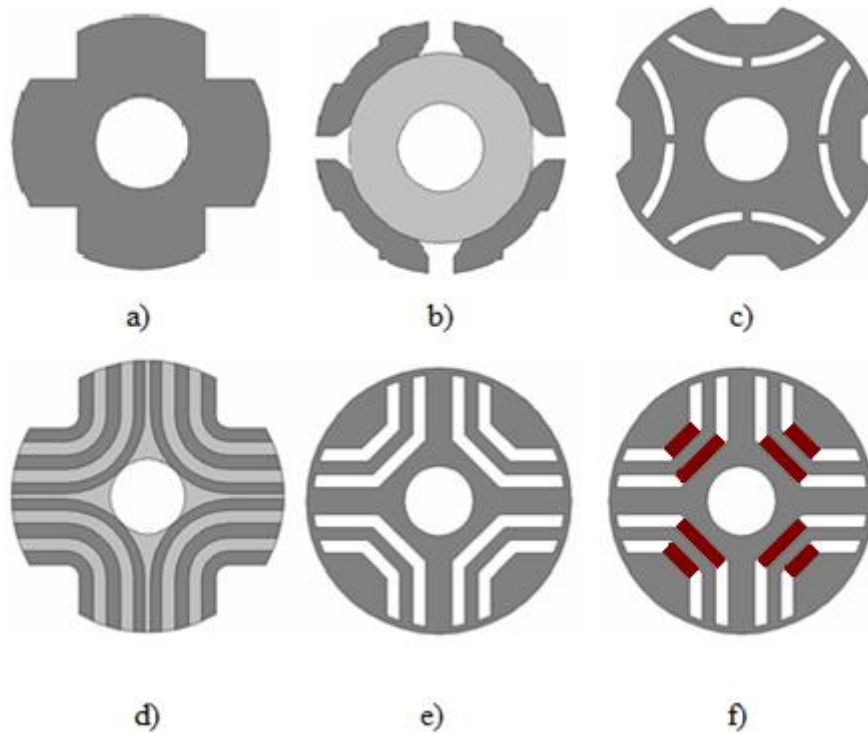
Joonis 3.4. Sirgete magnetvoo tõkenditega sünkroonreluktantsmasina rootori konstruktsioon

Magnetvoo tõkendite kasutamisega tekivad rootoris väikese läbimõõduga ribad. Kuna q- telje magnetiline takistus koosneb tavaliselt õhupilust, ribadest ja magnetvoo tõkendite magnetilisest takistusest, siis omavad ka reluktantsmasina ribad suurt rolli. Masinal on vaja saavutada võimalikult väike q- telje induktiivsus, ehk siis peavad ribad olema nii õhukesed kui võimalik. Eristatakse kahte sorti ribisid: esimesed on rootori raadiuse suunalised radiaalribid ja teised tangentsiaalribid. Ribide asukohad on näidatud kahel eelneval joonisel 3.3 ja 3.4 [7]. Uurimustes on selgunud, et ribad peavad olema nii õhukesed kui võimalik, sest siis tekib neis küllastus mille tagajärjel magnetvoo läbitavus on nendes masina osades takistatud [5]. Ribide disaini teeb keeruliseks masina mehaaniline pool, sest rootori konstruktsioon peab pööreldes säilitama enda jäikuse ja ei tohi puruneda. See asjaolu seab ribide miinimum paksuse puhul piirid [7].

### 3.2. Reluktantsmasina areng

Reluktantsmomenti ehk põhimõtet kasutada q ja d- telje puhul erinevat magnetilist takistust on tuntud juba üle 170 aasta. Esimene reluktantsmasin oli sarnane kahe kihilisele sünkroonreluktantsmasinale, mida praegu nimetatakse lülitusrežiimis reluktantsmasinaks (*switched reluctance machine, SRM*). [7]

Sünkroonreluktantsmasin on sarnane traditsioonilise väljapoolustega (*salient pole*) sünkroonmootorile, kuid tal pole mähist rootoril, selle tõttu on ainult rootor konstrueeritud nii, et tekib  $q$  ja  $d$ - telje komponentide erinevus (*salient ratio*). Järgneval joonisel 3.5 on näha erinevaid reluktantsmasinate rootori konstruktsioone, millest lõpuks arenes välja püsimagnetitega versioon. [7]



Joonis 3.5 Reluktantsmasinate erinevate rootorikonstruktsioonide arengu näited

Esimene kõige algsem disain oli lihtne väljapoolustega rootor, ehk rootori  $q$  ja  $d$ - telje komponendi suhe oli erinev. See tagati nii, et  $q$  ja  $d$ - telje õhupilu paksus oli erinev ning tekkis erinev magnetiline takistus. Kõige lihtsam on seda tekitada kasutades kahe pooluselist rootorit. Joonisel 3.5 on esitatud 4 pooluseline rootor a). Selle rootori puudus on, et  $q$  ja  $d$ - telje komponentide suhe pole selle konstruktsiooni puhul piisavalt suur ja ka masina jõudlus selle tõttu kannatas. [7]

Teise generatsiooni disain on joonisel 3.5 tähistatud b). Kujutatud on 4 pooluselist rootorit. Selle disaini puhul võeti kasutusele segmendipõhine konstruktsioon. See disain oli parem, sest eelnevad konstruktsioonid olid suure raadiusega, ehk masina parameetrid läksid suureks. See rootor võimaldas juba kasutada samasuurt raami, kui oli asünkroonmootoril. [7]



Järgmisena võeti kasutusele kahe magnetvoo tõkendiga rootor (joonisel tähistatud c), mis tähendas, et kaks magnetvoo tõkendit oli kasutatud ühe pooluse kohta. Tänu magnetvoo tõkenditele oli sellel rootoril palju suurem  $d$  ja  $q$ - telje induktiivsuste suhe. [7]

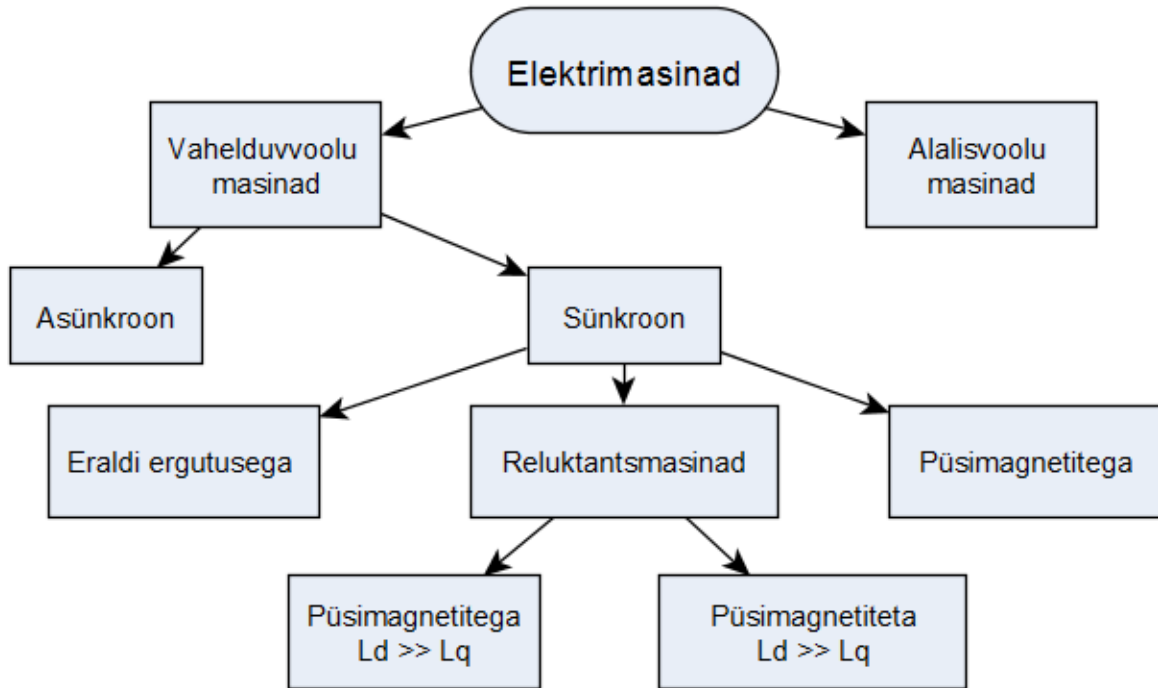
Aksiaalsuunas lamineeritud disain võeti kasutusele järgmisena. Selles disainis on rootor konstrueeritud aksiaalselt lamineeritud teraslehtedest, mis on painutatud U või V kujuliselt ja siis laotud radiaalsuunas üksteise otsa. Selline rootor on joonisel 3.5 osas d). [7]

Põikisihis lamineeritud disain- Joonisel 3.5 e) osas on näide 4 pooluselise põikisihis lamineeritud rootorist, kus on 2 magnetvoo tõkendit ühel poolusel. Mehaaniline tugevus on tagatud peenikeste ribidega mida käsitlesime eelnevalt. Rootori konstruktsioon on lihtne ja odav. Võrreldes aksiaalsuunas lamineeritud disainiga, siis on sellel rohkem magnetvoo lekkimist, seega ka moment ja võimsustegur väiksemad. Head omadused on, et rootorit on lihtsam masstootmises toota ning magnetvoo tõkendite ehitusega mängides saab mõjutada õhupilu harmooniliselt. [7]

Viimane disain on püsिमagnetitega reluktantsmasin, kus rootori magnetvoo tõkenditele on paigaldatud püsिमagnetid. Jooniselt 3.5 f) osa on näha 4 pooluseline põikisihis lamineeritud rootor. Selle põhimõte on juba eelnevalt lahti kirjutatud, kuid seisneb selles, et püsिमagnetite polaarsus on valitud nii, et nad neutraliseerivad  $q$ - telje magnetvoogu, selle tõttu saavutatakse suurem  $q$  ja  $d$  komponentide erinevus ja suurem moment. [7]

### **3.3. Püsिमagnetitega reluktantsmasina erinevused teistest masinatest**

Elektrimootorid jagunevad vahelduvvoolu ja alalisvoolu masinateks. Vahelduvvoolu masinad omakorda sünkroon- ja asünkroonmasinateks, millest sünkroonmasinad moodustavad terve eraldi perekonna. Põhilised sünkroonmasinate alaliigid on: eraldi ergutusega sünkroonmasinad, sünkroonreluktantsmasinad ja püsिमagnetitega sünkroonmasinad. Järgmisel joonisel 3.6 on näidatud, kuhu jagunevad reluktantsmasinad. [6]



Joonis 3.6. Reluktantsmasinate jagunemisskeem

Püsomagnetitega sünkroonreluktantsmasin on saamas aina populaarsemaks, sest tal on rootoril jäik struktuur, madal maksumus ja energiatarve, head karakteristikud ning võimalus kasutada teda muutuva kiirusega rakenduste puhul annab võimaluse asendada neid praegu kasutusel olevate masinate asemel, sest erinevad muundurtehnoloogiad võimaldavad seda [5]. Järgnevalt on ära toodud mõned püsomagnetitega sünkroonreluktantsmasina positiivsed ja negatiivsed küljed teiste elektrimasinate ees.

#### Eelised teiste masinate ees:

- Püsimateid kasutatakse vähem, kui teistes püsimatega masinates (näiteks püsimatega sünkroonmasin), millest tuleneb rahaline kokkuhoid, sest püsimateitel on kõrge hind. [4]
- Masina lihtne konstruktsioon, odavam hind, väiksem tootmiskulu võrreldes püsimate sünkroonmasinaga, sest mäteriteid ja vaske kulub vähem. [5]
- Rootoril puudub mähis, sellepärast masinal kõrgem kasutegur, väiksemad kaod ja ka parem temperatuuri taluvus kui asünkroonmootoril. [5]
- Reluktantsmasinat eelistatakse asünkroonmootorile, sest viimasel on väiksem moment ja halvem ülekoormatavus. [8]

- Magnetvoo lekkimine suhteliselt väike. [8]
- Võrreldes teiste masinatega kulub vähem materjali, sellepärast on püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasin kergem, kui paljud teised elektrimasinad. Kui võrrelda teda tavalise asünkroonmootoriga, siis püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasina rootor võib-olla kuni 43 % kergem. [9]
- Teda saab kasutada muutuva kiirusega rakendustes, mis annab suure kasutusvõimaluse erinevates valdkondades ja rakendustes. [10]
- Püsिमagnetitega saab viia rootori ribad küllastusse, mille tulemusena saab suurema reluktantsmomendi ja paremad karakteristikud. Lisaks saab püsिमagnetitega suurendada masina võimsustegurit. [10]
- Mootori hooldamine on lihtsam, sest rootoris pole mähiseid. Väiksemad hoolduskulud. [5]

#### **Puudused teiste masinate ees:**

- Tavaliselt masina metallosades suur magnetvoo tihedus. Selle tõttu materjal läheb küllastusse ja masina metallosad hakkavad soojenema. Teisest küljest mõnedes masina osades on küllastus vajalik, näiteks ribad. [5]
- Temperatuuritundlikum võrreldes tavalise reluktantsmasinaga, kus pole püsिमagneteid. Liiga suure temperatuuri juures püsिमagnetid kaotavad oma magnetilised omadused. [12]
- Suur probleem on momendi pulseerumine, mis tähendab, et momendis esineb suuri kõikumisi. Selle kõikumise peamiseks põhjustajaks on kleepumismoment (*cogging torque*). [10] [11]
- Mõned masina rootori konstruktsioonid tagavad head karakteristikud, kuid nende tootmine on keeruline ja võib osutada kulukaks. Näiteks esineb kumeraid väljalõikeid, mida on raske stantsida. [15]

Järeldusena selgub, et reluktantsmasinal on tugev potentsiaal tulevikus, sest tal on palju eeliseid teiste masinate ees. Kõige suuremad eelised on suurem keskmine moment, väiksem maksumus, väiksem energiatarve ja materjali kulu ning lihtne ja robustne konstruktsioon. Kõige suuremaks puuduseks on momendi pulseerumine erinevate koormusnurkade korral ja mõnede konstruktsioonide raske valmistamine.

### 3.4. Püsimagnetitega reluktantsmasina erinevaid rakendusi

Püsimagnetitega sünkroonreluktantsmasinatel on palju erinevaid rakendusi, sest neid saab kasutada erineva kiirusega rakenduste jaoks. Lisaks on neil väiksem materjali kulu, suurem keskmine moment ja madalam maksumus, kui tavalistel asünkroonmasinatel, mis on praegu laialdaselt kasutusel [12]. Tänu püsimagnetite hinna langemisele ja arengule ning muundurtehnoloogia arengule on püsimagnetitega sünkroonreluktantsmasinaid võimalik hakata asendama just tavaliste asünkroonmootoritega.

Järgnevalt väljatoodud uurimuses testiti erinevaid masinaid kahe erineva koormuse juures. Rakendusteks olid ventilaatorikoormus ja konstantse kiirusega koormus. Staatorina kasutati asünkroonmasina staatorit. Erinevate masinate puhul katsetati, kui suurt voolu on vaja rakendada, et saavutada sarnast nimimoment. Vajalikuks nimimomendiks oli 30 Nm. Testimisel oli ka 3 püsimagnetitega sünkroonreluktantsmasinat, milles oli kasutatud erinevaid magneteid. Esimeses olid NdFeB magnetid, teises asendati ferriitmagnetitega (ferriidid 1) ja kolmandas (ferriidid 2) suurendati ferriitmagnetite kogust. Tulemused on esitatud järgmises tabelis 3.1. [12]

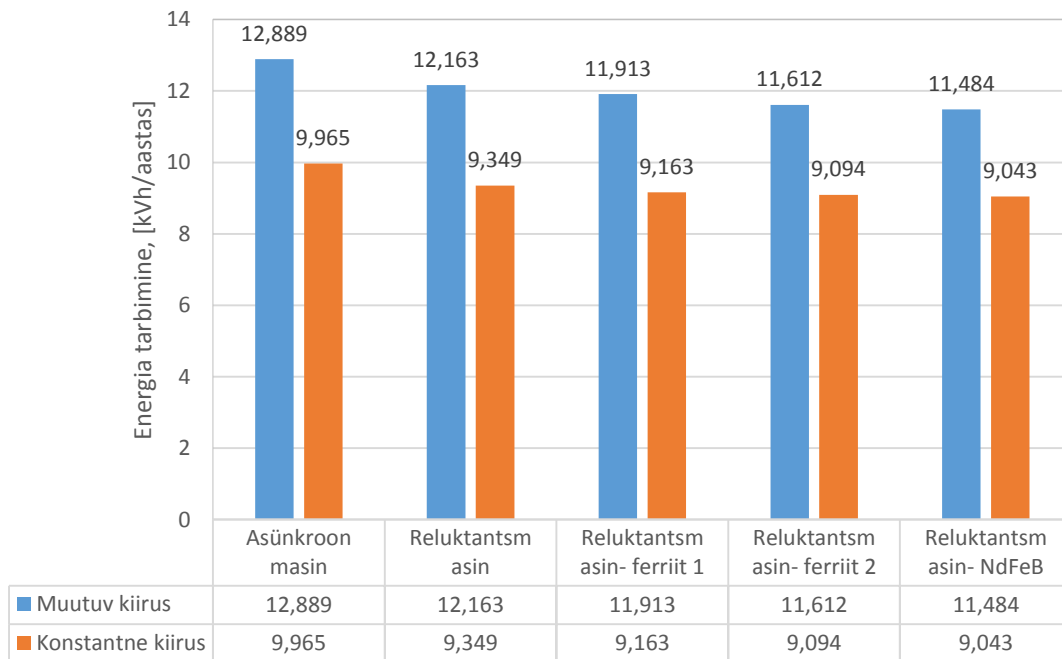
Tabel 3.1. Nimimomendi saavutamiseks vajalik voolu suurus erinevate masinate korral

Vajalik voolu suurus nimimomendi saavutamiseks	
Masina tüüp	Vajalik vool, [A]
NdFeB	16,5
Ferriidid 1	20
Ferriidid 2	18,8
Ilma magnetiteta	21,5
Traditsiooniline asünkroonmasin	21

Tulemustest järeldub, et NdFeB magnetitega sünkroonreluktantsmasin tarbis kõige vähem voolu ja püsimagnetiteta sünkroonreluktantsmasin tarbis kõige rohkem. Selgub, et mida paremad magnetid kasutusele võtta, seda väiksemat vajalikku voolu saab kasutada. Ilma magnetiteta sünkroonreluktantsmasin on antud tulemuste põhjal sarnane traditsioonilisele asünkroonmasinale. Sellepärast on magnetite kasutamine vajalik, et asendada sünkroonreluktantsmasinaid asünkroonmootoritele. [12]

Lisaks arutati katsetulemuste põhjal välja ka ligikaudne masinate aastane energiatarve kilovatt-tundides. Seda nii muutuva kiirusega rakenduse puhul, kui ka konstantse kiirusega rakenduse puhul. Tulemustena selgus (joonis 3.7), et asünkroonmasin tarbib kõige rohkem ja NdFeB magnetitega sünkroonreluktantsmasin tarbib kõige vähem elektrienergiat. [12]

Masinate aastane ligikaudne elektrienergia tarbimine



Joonis 3.7. Erinevate masinate aastane ligikaudne elektrienergia tarbimine konstantse ja muutuva kiirusega koormuse juures

Eelneva uurimuse põhjal võib väita, et püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasin sobib asendama tavalist asünkroonmasinat ja seda nii muutuva, kui ka konstantse kiirusega koormuste juures [12]. Rakenduste näitena võib neid kasutada näiteks pumpade ja ventilaatorite käitamiseks või sõidukite mootoritena [8].

## 4. PÜSIMAGNETITEGA RELUKTANTSMASINA KONSTRUKTSIOONI VALIK

### 4.1. Staatori valik

Staatori valiku tegemiseks peab paika panema masinale tähtsaimad andmed, mis on toodud tabelis 4.1. Mootori põhilised elektrilised parameetrid on nimivõimsus 6,23 kW, nimipinge 400 V, nimivool 9 A ja töösagedus 50 Hz. Nende andmete põhjal otsustati staatori valik. Staatori valikul lähtuti teadmistest, et püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasinal võib kasutada tavalise asünkroonmootori staatorit [7, 13]. Staatoril valiti uurete arvuks 36 uuret, mähiste samm 7 ja igas mähises keerdude arv 20.

Tabel 4.1. Tabel tähtsamatest staatori parameetritest

Parameeter	Suurus
Staatori sisemine raadius, mm	62,5
Staatori välimine raadius, mm	105
Uurete arv	36
Kihtide arv	2
Mähiste keerdude arv	20
Mähiste samm	7
Uurdeid ühe faasi jaoks	3
Mähiste vool, A	9
Pinge, V	400
Võimsus, kW	6,23
Sagedus, Hz	50
Faaside arv	3

Staatoril on uurded jagatud pindalalt kaheks võrdseks osaks, ehk tegemist on kahe kihilise staatoriga. Masinal on 3 faasi, mis on staatoril mähitud vastavalt järgmisele joonisele 4.1 nii, et moodustub 6 poolusega staator. Joonisel on pooluse kohta uurdeid 9 ja mähise samm on 7 uuret. Järgnevalt on arvutatud välja mitmes uurdes peab olema järjest sama faas, seda on tehtud valemiga 4.1 [1]:

$$n_s = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{36}{4 \cdot 3} = 3 \quad (4.1)$$

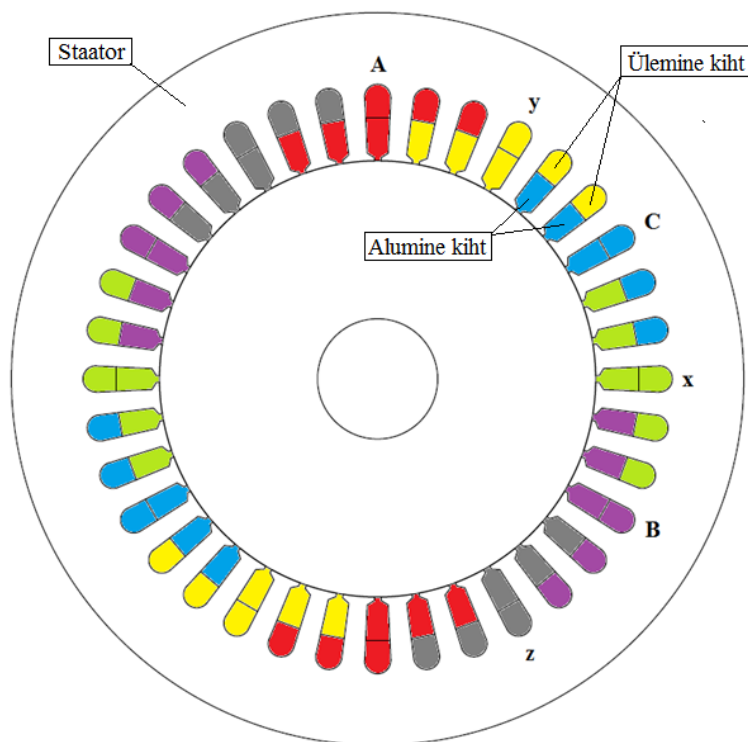
, kus  $n_s$  – on uurete arv, milles peab järjest olema sama faas,

$Q$  – on staatori uurete arv,

$p$  – on pooluspaaride arv,

$m$  – on staatori faaside arv.

Tulemusena peab kolmes järjestikus uurdes olema sama faas. Järgnevatel joonistel 4.1 ja 4.2 on samad faasid tähistatud erinevate värvidega.



Joonis 4.1. Kasutusele võetud staatori läbilõige ja mähiste informatsioon

Staator on kahe kihiline, ehk uurded on jagatud pindalalt kaheks võrdseks osaks, millest ülemised osad moodutavad ülemise kihi ja alumised alumise kihi (joonis 4.1). Mõlemas kihis on mähised ka nihutatud. Selline osaline uurete mähkimine on iseloomulik püsिमagnetitega sünkroonmasinatele [13]. Sellega saab vähendada harmooniliste mõju õhupilu magnetvoole ja näiteks, kui mootor töötab generaatorina, siis saab kahekihilise staatoriga ühtlasema siinuspinge kuju [13]. Järgnevalt on joonisel 4.2 uuesti toodud tabelina välja ülemise ja alumise kihi mähiste mähkimise informatsioon. Esitatud on ainult pool staatorit ehk 18 uuret.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ülemine kiht	A	A	A	z	z	z	B	B	B	x	x	x	C	C	C	y	y	y
Alumine kiht	A	z	z	z	B	B	B	x	x	x	C	C	C	y	y	y	A	A

Joonis 4.2. Kasutatud staatori mähkimise informatsioon

Kolmefaasilise masina faasil on ka faasinihkenurk ja kuue pooluselises staatoris on mähiste voolud järgmised:

$$I_A = I_m * \sin(\omega t)$$

$$I_B = I_m * \sin(\omega t + 120^\circ)$$

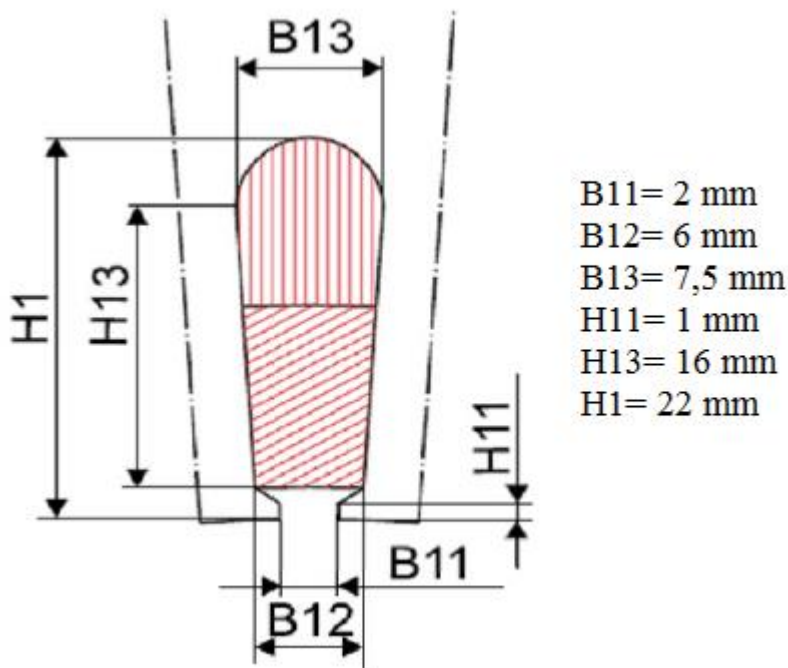
$$I_C = I_m * \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$I_x = -I_A$$

$$I_y = -I_B$$

$$I_z = -I_C$$

Järgnevalt on toodud ära staatoris kasutatud uurete mõõtmed. Joonisel 4.3 on kujutatud üksikut uuret, mis on jagatud kaheks võrdse pindalaga osaks ja kõrval on toodud tema mõõtmed millimeetrites.



Joonis 4.3. Staatori ühe uurede läbilõige ja mõõtmed



## 4.2. Rootori valik

Kõige olulisem on püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasinal rootori konstruktsiooni valik. Lähtuti sellisest rootori konstruktsioonist, mida on võimalik erinevat moodi muuta, et teha katseid ja analüüse. Selle tulemus võimaldab rootori magnetvoo tõkendite kuju ja asendi muutmist ning ribide muutmist. Lisaks veel ka rootoris erinevate magnetite katsetamise võimalust. Rootori konstruktsiooni põhimaterjaliks valiti teras ja võlli materjaliks roostevaba teras.

Rootori konstruktsioonis valiti pooluste arv. Kuna pooluste arvu suurenedes väheneb magnetvoo lekkimine ja kleepumismoment (*cogging torque*) ning suureneb masina efektiivsus, siis valiti kirjandusele tuginedes rootori pooluste arvuks 4 [14].

Olemasolevatele uurimustele tuginedes selgus, et ei tasu pooluste arvu liiga suureks ajada, sest siis hakkab vähenema reluktantsmoment. Uurimustes on selgunud, et kui pooluste arv on suurem kui 4, siis reluktantsmoment hakkab vähenema. See on halb, sest töös on suur osatähtsus reluktantsmomendil. [8]

Kasutatud rootori konstruktsiooni põhiparameetrid on esitatud järgmises tabelis 4.2

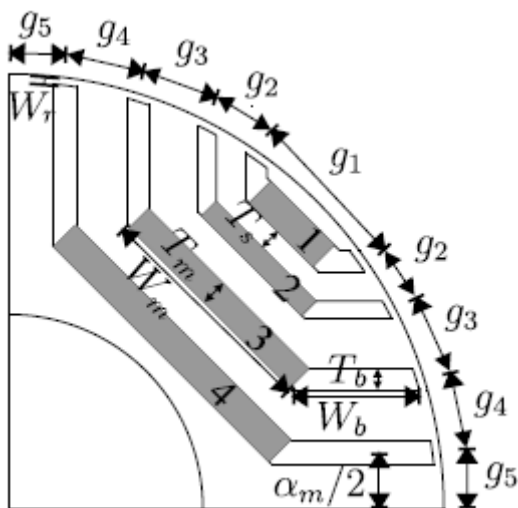
Tabel 4.2. Rootori põhiparameetrid

Parameeter	Suurus
Rootori sisemine raadius, mm	12,5
Rootori välimine raadius, mm	62
Pooluste arv	4
Magnetvoo tõkendite arv pooluse kohta	3
Radiaalribide arv pooluse kohta	5
Tangensiaalribide arv pooluse kohta	6
Püsिमagnetite arv pooluse kohta	1 või 2
Püsिमagnetite kõrgus, mm	6
Püsिमagnetite laius, mm	10

### 4.3. Magnetvoo tõkendite valik

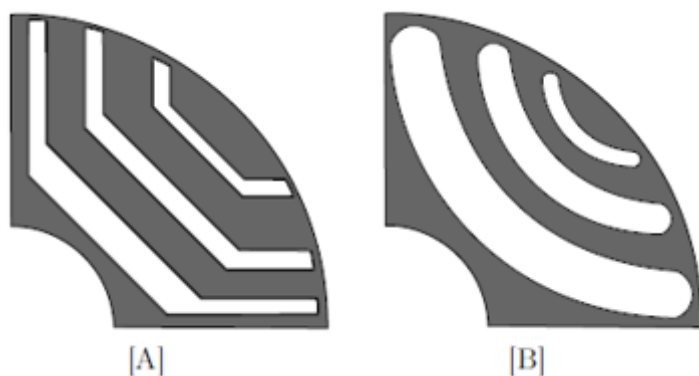
Püsimagnetitega sünkroonreluktantsmasinal on magnetvoo tõkendite tähtsus suur, sest on vaja saavutada võimalikult suur  $q$  ja  $d$ - telgede komponentide suhe. Magnetvoo tõkendite erinevate disainidega saab seda mõjutada. [5]

Esimese aspektina tuleb mängu magnetvoo tõkendite arv. On uuritud, et masina keskmine moment ei suurene silmämärgatavalt enam peale neljanda või viienda magnetvoo tõkendi kasutuselevõttu [8]. Seda asjaolu arvestades valiti antud töös rootori konstruktsioonis magnetvoo tõkendite arvuks pooluse kohta kolm. Oluline on magnetvoo tõkendite paksus ja paiknemine. Katseid viidi läbi tarkvarades Matlab ja FEMM, kus Matlabi programmikood tehti nii, et oleks võimalik muuta masina magnetvoo tõkendi parameetreid, mis on näidatud järgneval joonisel 4.4 [8]. Tähtsamad parameetrid tõkenditel on  $T_m$ - paksus  $d$ - telje suunas,  $T_s$ - raua segmendi paksus  $d$ - telje suunas,  $W_m$ - magnetvoo tõkendi pikkus  $d$ - teljega ristsihis,  $W_b$ -  $q$ - teljega paralleelne pikkus,  $T_b$ - magnetvoo tõkendi paksus mööda  $q$ - telge. Magnetvoo tõkendi lõpunurk on tähistatud  $\alpha_m$  [8].



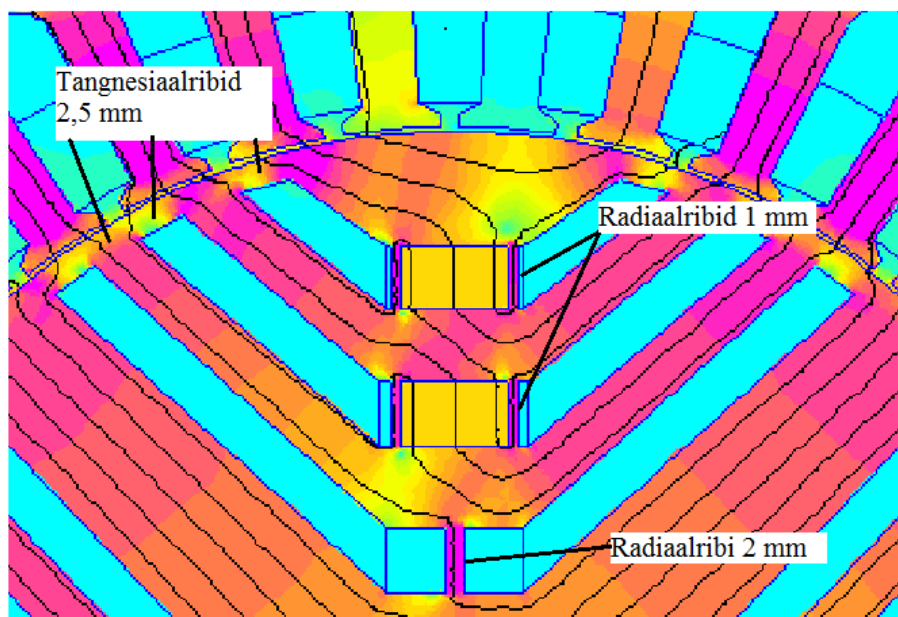
Joonis 4.4. Magnetvoo tõkendite põhilised muudetavad pikkused

Tõkendi pikkuse ja laiuse parameetritele lisaks on olemas ka sirged (A) või kumerad (B) tõkendid nagu joonisel 4.5 näidatud [15]. Antud uurimus oli põhiliselt suunatud sirgete magnetvoo tõkendite uurimisele. Võrdluseks viidi läbi üks katse ka kumerate tõkenditega.



Joonis 4.5. Näide sirgetest ja kumeratest magnetvoo tõkenditest

Tänu magnetvoo tõkendile tekivad rootoris ribad, mille paksus mõjutab samuti masina momenti ja selle pulseerimist [5]. Valitud konstruktsioonis on kasutusel 5 radiaalribi ja 6 tangensiaalribi pooluse kohta. Tangensiaalribide arv oleneb magnetvoo tõkendite arvust ja radiaalribide arv suureneb, sest kasutusel on ka kaks magnetit. Magnetite äärtesse on lisatud radiaalribid, et tagada magnetite parem paikenemine ja turvalisus rootoris. Järgnevalt on joonisel 4.6 näidatud ka pilt ühest konstruktsioonist, kus on näidatud rootori erinevad ribad ja nende laiused.

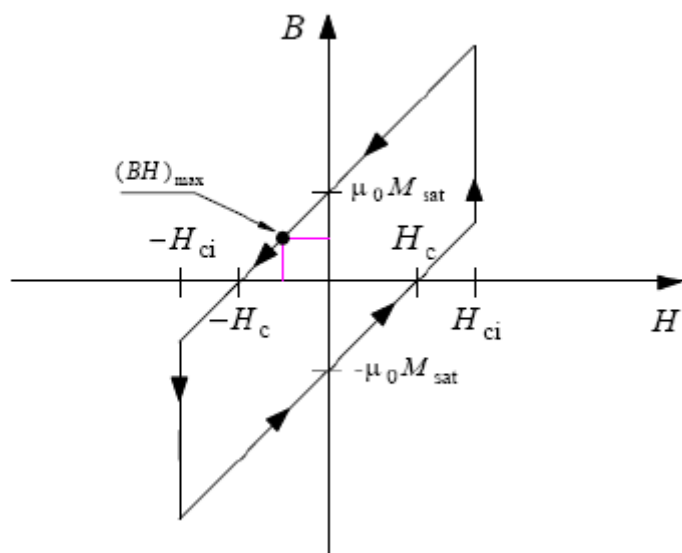


Joonis 4.6. Näide rootori konstruktsioonist, koos ribide informatsiooniga

#### 4.4. Püsिमagnetite valik

Püsिमagnetite valik on tänapäeval suur. Põhilised püsिमagnetite valikukriteeriumid on hind, magnetmaterjali liik ja magnetilised omadused. Magnetmaterjalide valiku eelduseks töös kasutatavale masinale on, et nad oleksid erinevat tüüpi ja ka erineva tugevusega. Valituks osutunud püsिमagnetid koosnevad haruldastest muldmetall magnetmaterjalidest. Ferriite antud masinas kasutusele ei võetud, sest kirjandusele tuginedes tundusid SmCo ja NdFeB püsिमagnetid parema lahendusena [12]. Püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasinas katsetati järgnevaid püsिमagneteid: SMCo 24, SmCo 27, NdFeB 32 ja NdFeB 52. Kasutatud magnetitele tähtsaimad omadused on välja toodud tabelis 4.3.

Püsिमagnetite kirjeldamiseks ja võrdlemiseks kasutatakse hüstereesisilmust, kus on kujutatud magnetväljatiheduse ja magnetväljatugevuse seos. Illustreeriv näide sellisest B-H graafikust on joonisel 4.7. Suurt rolli mängib sõltuvus magneetuvuse ja välise temperatuuri vahel, sellepärat selliseid järske astmelisi muutusi reaalses elus ei teki ja hüstereesisilmuse kuju on sujuv. [16]



Joonis 4.7. Illustreeriv hüstereesisilmus püsिमagneti jaoks koos tähtsamate suurustega

Järgnevalt on esitatud põhilised püsomagnetitega seonduvad suurused [16]:

- **Jääkmagnetvootihedus-**  $B_r$  on see magnetvootiheduse väärtus, mis magnetil jääb püsima peale välise välja eemaldamist.
- **Koertsitiivjõud-**  $H_c$  on üks olulisemaid parameetreid püsomagnetitel. See on magnetvälja tugevuse väärtus, juhul kui magnetvootiheduse väärtus  $B$  langeb nulli ehk näitab, kui suurt välist väljatugevust on vaja rakendada, et magnetiseeritud magneti vootihedus viia nulli tagasi. Sõltub temperatuurist.
- **Magnetiline läbitavus-**  $\mu$  on magnetvootiheduse ja magnetväljatugevuse suhe.  $\mu = B/H$ .

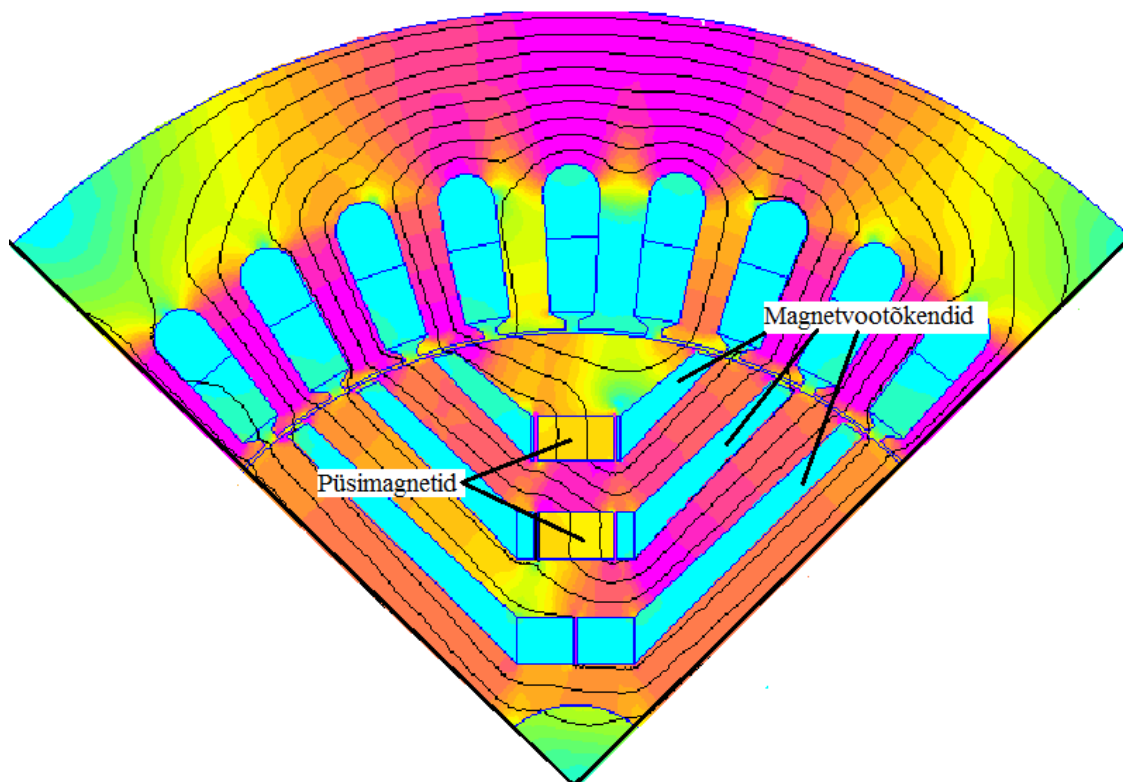
Tabel 4.3. Kasutatud püsomagnetite olulisemad parameetrid

Parameeter	Tähis	Ühik	NdFeB 32	NdFeB 52	SmCo 24	SmCo 27
Elektrijuhtivus	$\sigma$	MS/m	0,694	0,667	1,176	1,176
Magnetiline läbitavus	$\mu$	H/m	1,045	1,050	1,110	1,103
Koertsitiivjõud	$H_c$	kA/m	883,31	891,30	724,00	772,00
Jääkvootihdus	$B_r$	T	1,11	1,12	0,91	0,97

## 5. MASINA MODELLEERIMINE

### 5.1. Modelleerimise idee ja olemus

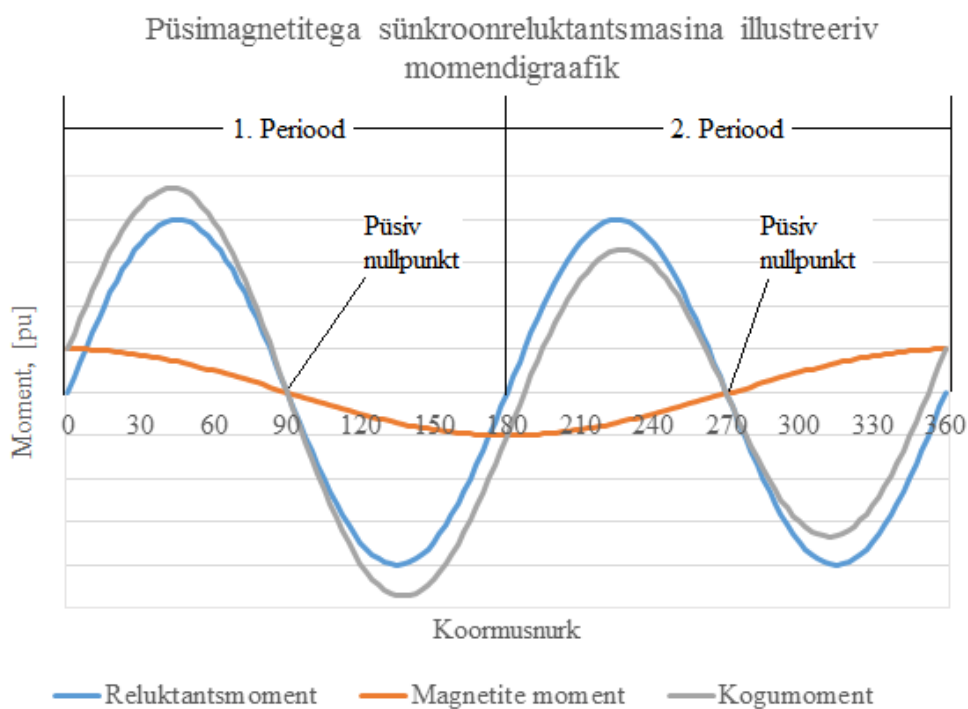
Püsimagnetitega sünkroonreluktantsmasina modelleerimise eesmärk oli katsetada erinevaid rootori konstruktsioone ja mõista, kuidas erinevad muutused rootori disainis mõjutavad masina momenti. Antud töös oli kõige enam uurimise all maksimaalne moment ja ka momendi pulseerumine (*torque ripple*). Reluktantsmasinate puhul mängib suurt rolli momendi pulseerumine, sest neile on iseloomulik juba varem mainitud kleepumismoment (*cogging torque*). Modelleerimiskatsete käigus oli peamise uurimise all magnetvoo tõkendite laiuse, ribide laiuse ja magnetite mõju masina momendile. Enne modelleerimiskatsete alustamist pandi paika rootori konstruktsioonis kindlad reeglid, et pärast katsetulemusi võrrelda, analüüsida ja kindel olla, et tulemused on usaldusväärsed. Näiteks kõikide katsete puhul paiknevad püsimagnetid alati iga rootori pooluse juures täpselt samas kohas ja on mõõtmetelt samasuured. Masina staator jäi kõikide katsete puhul alati samaks. Järgnevalt on joonisel 5.1 toodud ära üks katsetusel olnud rootorikonstruktsiooni ühe pooluse väljalõige, kus on näidatud magnetite asukoht ja magnetvoo tõkendid.



Joonis 5.1. Katsetusel olnud rootorikonstruktsiooni ühe pooluse väljalõige

Katsete läbiviimiseks tuli arvutada momenti erinevate koormusnurkade korral. Seda saab teha keerates staatorit või rootorit teatud elektrilise sammu võrra ning siis iga asendi korral välja arvutada masina moment. Antud töös keerati staatorit sammuga 0,5 elektrilist kraadi.

Katsetulemused kajastati graafikutena, kus y- teljel on moment ja x- teljel masina koormusnurk. Tulemuste kajastamiseks ja võrdlemiseks näidati graafikutele mõlemat perioodi, sest nagu eelnevalt mainitud, koosneb püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasina summaarne moment magnetite poolt tekitatud momendist, kui ka reluktantsist tulenevast momendist. Katsetatud masina illustreeriv graafik on järgmisel joonisel 5.2. Graafik on koostatud nii, et ta oleks võimalikult ligilähedane püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasinale. Jooniselt on näha, et suure osa momendist moodustab reluktantsmoment ja väikese osa lisab juurde magnetite poolt tekitatud moment. Kui need kokku liita, siis on tulemuseks summaarne moment. Selgub, et esimese ja teise perioodi graafiku kujud erinevad tänu magnetite tekitatud momendile. Sellest tulenevalt viidi modelleerimiskatsed läbi sellises vahemikus, et mõlemast perioodist on kajastatud üks kõver. Sellepärast viidi modelleerimiskatsed läbi koormusnurkade juures vahemikus 90 kuni 270 kraadi, sest sinna vahemikku jäävad mõlemad perioodid ja nullpunktide nihkumist nende koormusnurkade juures ei tekkinud.



Joonis 5.2. Püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasina illustreeriv momendinurgatunnusjoone graafik

Järgnevalt käsitletakse, kuidas antud töös modelleerimised läbi viidi. Modelleerimiskatsete läbiviimiseks kasutati programme Matlab ja FEMM. FEMM sobib kahedimensiooniliste elektromagnetiliste probleemide lahendamiseks [17]. Ta võimaldab lahendada nii lineaarseid kui ka mittelineaarseid magnetostaatilisi probleeme, magnetilisi probleeme ajaharmonilistega, lineaarseid elektrostaatilisi probleeme, lisaks ka temperatuuri ja soojuse jaotumise probleeme [17]. Antud töös on kasutatud magnetiliste probleemide lahendamist ja FEMM-is teostatakse see Maxwell'i valemitega.

Programm FEMM hõlmab kasulikku liidest nimega ActiveX. See võimaldab luua andmevahetuse mõne teise tarkvaraga. FEMM käitub vastaval juhul ActiveX automaatse serverina ja teised programmid saavad ühendada ennast FEMM-i. Selle liidesega saab teha FEMM-is tegevusi ning käivitada analüüse kasutades programmikoodi. Programmikood võib olla kasutusel erinevates programmides, näiteks VB, VC++, Matlab. [17] Antud töös kasutati Matlabi.

Programmis FEMM on kasutusel ka Lua konsool, kus kasutatakse spetsiaalset Lua programmeerimiskeelt. Kui kasutusel on ActiveX ehk FEMM-i antakse käsklusi läbi temaga ühenduses oleva programmi, siis need käsklused kogutakse ja tõlgendatakse FEMM-is läbi Lua konsooli. [17]

Testimiseks kasutatav programmikood võimaldab saata käsklusi FEMM-i ja saada sealt ka tagasisidet. Matlabi ühildamiseks FEMM-i on vaja kasutada lisaks spetsiaalset tööriista, mida kutsutakse OctaveFEMM. Selle abil antakse Matlabi koodis olevatele käskudele Lua keele funktsionaalsus, et saaks kasutada erinevaid Matlabi käsklusi [17].

Täpsemalt on OctaveFEMM Matlabis kasutatav tööriist, mis võimaldab kasutada lõplike elementide meetodit läbi Matlabi funktsioonide. Kui OctaveFEMM käivitub, siis alustatakse uut probleemset protsessi ja käivitatakse programm FEMM. OctaveFEMMi käsukoodid on väga sarnased FEMM-is eksisteeriva Lua programmeerimiskoodis olevate käsklustega. Põhilised erinevused on, et Matlab põhineb rohkem maatriksitel. [18]



Enne masina modelleerimist lõplike elementide meetodil FEMM-is pidi lähtuma erinevatest etappidest, mis hõlmasid endas [18]:

- Masina joonistamine või olemasoleva faili importimine FEMM-i. Antud töös joonistati masina konstruktsioonid programmikoodis käskude abil.
- Peale masina valmimist tuleb valida materjalid, mida hakatakse kasutama. Näiteks erinevad metallid, püsimagnetid, õhk.
- Kui materjalid teada, siis tuleb omistada igale masinaosale vastavalt vajaminev materjal.
- Väga oluline on valida ka masinale ääritingimused, mis piiravad ära masina konstruktsioonis oleva ala, kus modelleerimisprotsess hakkab toimuma.
- Masinale peab määrama erinevad parameetrid. Näiteks voolu suurus mähistes, mähiste keerdude arv, pinge ja uurete arv.

Kõik eelnevad modelleerimisetapid viidi läbi programmikoodi abil, mis asub lisa 1 ja on järgnevalt lahti seletatud.

### **Programmikoodi selgitus**

Programmikoodis defineeriti erinevad muutujad, mida kasutati erinevates valemites ja mille tulemustest moodustati matrikseid. Matlabi programmis kutsutakse esile programm FEMM, kus kasutati erinevaid masina parameetrid, mis olid kõikide katsete korral samasugused. Need olid näiteks pooluste arv, voolu efektiivväärtus, masina staatori pööramise maksimum nurk elektrilistes kraadides ja staatori keeramise samm.

Seejärel lisandusid programmikoodi mitmed tsüklid. Kõige suurem neist hõlmab endas masina erinevate koormusnurkade juures momendi arvutamist ja konstruktsiooni joonestamist. Iga järgneva momendiväärtuse arvutamise juures keeratakse staatorit vastavalt etteantud elektrilise kraadi võrra. Iga koormusnurga korral joonistatakse terve masina konstruktsioon FEMM-is uuesti ja tehakse uus dokument ehk magnetiline probleem ja pannakse paika üldised parameetrid nagu sagedus, pikkusühik ja arvutustäpsus. Üldises tsüklis defineeritakse masinale veel uusi parameetreid ja tehakse teisendusi kraadidest radiaanidesse. Defineeritakse voolud erinevatele faasidele ja antakse mähiste keerdude arv.

Masina erinevatele osadele tuli valida materjalid. Programm FEMM sisaldab palju erinevaid materjale ja need defineeriti programmikoodis. Lisaks defineeriti ka vooluahelad. Programmikoodis on erinevaid tsükleid, kus joonistatakse masina rootor. Kõige parem lahendus neljapooluselise rootori joonistamisel oli teha seda nii, et Matlab-is käskude abil joonistati valmis rootori ühe pooluse magnetvoo tõkendid ja magnetid, ning siis paljundatud neid kolm korda käsuga *copyrotate*. Lõpptulemusena tekib 4 pooluseline rootor, kus on ühe pooluse kohta kolm magnetvoo tõkendit ja kaks magnetit välimistes tõkendites.

Järgnevalt omistatakse rootori erinevatele osadele materjalid. Esiteks antakse püsिमagnetitele materjal ja magnetvoo tõkenditele antakse materjaliks õhk. Joonistatakse rootorile välimine ring ja sisemine ring ehk tekitatakse masinale võll ja määratakse materjalid. Õhupilu materjaliks määratakse õhk.

Järgnevalt algab masinale staatori joonistamine. Joonistatakse staatori välimine ja sisemine ringjoon, määratakse staatorile materjal ja ääritingimused. Lõpuks joonistatakse staatorile uurded ja määratakse igas uurdes materjal. Sellega lõpeb masina konstruktsiooni joonistamine FEMM-i.

Enne analüüsi käivitamist salvestati masina konstruktsioon käsuga *mi\_saveas*. Seejärel tehakse konstruktsioon lõplikeks väikesteks alamobjektideks ja käivitatakse analüüs. Analüüsi lõppedes valitakse välja rootori kõik detailid mille materjaliks pole õhk ning *mo\_blockintegral (22)* käsuga arvutatakse välja masina moment vastava koormusnurga juures.

Koodi täitmine on lõppenud, kui masina staator on pöördunud vastavalt etteantud elektrilise kraadi võrra. Lõpptulemusena väljastatakse sarnane graafik nagu joonisel 5.2, kus kuvatakse saadud momendid iga elektrilise kraadi korral, ehk koormusnurga juures. Keskmise test 190 elektrilise kraadi pööramise korral sammuga 0,5 kraadi kestis tavaliselt 8 kuni 12 tundi, olenevalt rootori konstruktsioonist. Kood sisaldab palju kasulike kommentaare, ja on tehtud inglise keeles.

## 5.2. FEA- meetodi tutvustamine

Eelnevalt selgus, et tänapäeva elektrimasinate konstruktsioonid on läinud väga keeruliseks. Lisaks on tekkinud palju erinevaid materjale, mille karakteristikud on mittelineaarsed. Oluline on saavutada täpsed tulemused masinate analüüsil, näiteks elektri- ja magnetväljade arvutustulemused. Sellest tulenevalt kasutatakse erinevaid meetodeid. Analüütilised meetodid on ennast ammendunud, sest nende abil on raske sama häid tulemusi saavutada, kui numbriliste meetoditega [19]. Enamikel juhtudel on numbrilised meetodid efektiivsemad.

Antud uurimuses kasutatud lõplike elementide meetod (FEA) on numbriline meetod. See meetod võimaldab lahendada väljadega seotud probleeme ja ka käsitleda materjale, mille karakteristikud on mittelineaarsed [19]. FEA meetod põhineb sellel, et kogu uuritav objekt jaotatakse paljudeks väikesteks lihtsateks kujunditeks, kus välja arvutamine toimub omakorda neis kõigis eraldi [19]. Antud meetod sobib erinevate vektorprobleemide lahendamiseks [19]. Käsitledes erinevaid väljade jaotusi ja elektromagnetväljade arvutusi, annab FEA analüüs palju võimalusi. FEA meetodiga saab leida väga täpseid lokaalseid analüüse ja leida magnetvälja suurus ja küllastust [19].

FEA meetodil esineb ka puudusi. Numbrilise meetodiga on lõpptulemus alati ligikaudne [19]. Kui meetod ei ole õigesti töösse rakendatud, siis on tulemused ebakorrektsed [19]. Tavaliselt võtab tulemuste arvutamine kaua aega ning kui masina konstruktsioonis on ilmnunud vigu, siis läheb väga palju aega raisku.

### Lõplike elementide meetodi tööpõhimõte

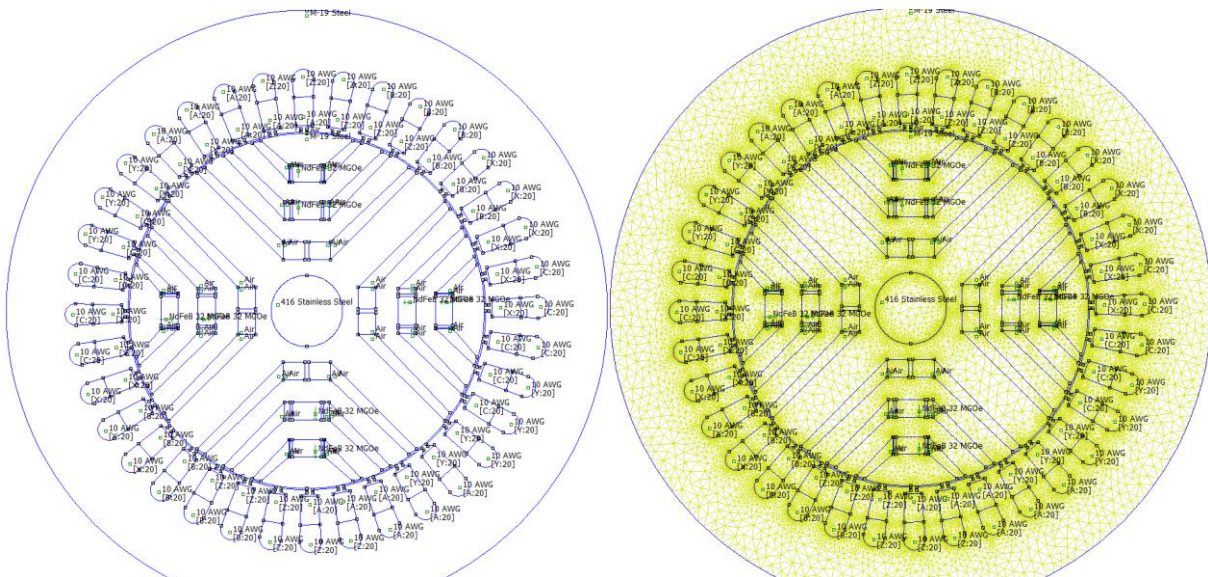
Lõplike elementide meetod põhineb sellel, et uuritavast domeenist (objektist) tehakse alamdomeenid ning viimastest omakorda lõplik arv väikeseid alamkujundeid. Ehk terve uuritav objekt jaotatakse lõplikuks arvuks väikesteks osakesteks (kujunditeks). [19]

Lõplike elementide meetodi põhilised etapid [19]:

- Domeeni jaotamine- Uuritav domeen (objekt) jagatakse alamdomeenideks, neid iseloomustatakse kui domeene, millel on väiksemad mõõtmed.

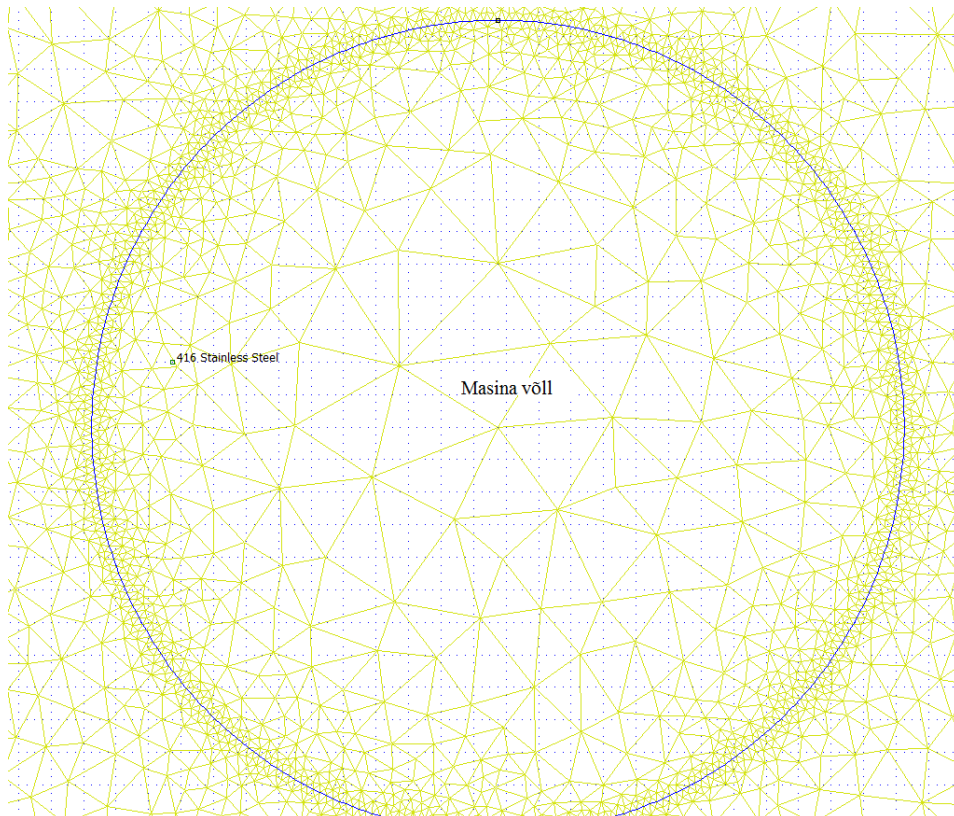
- Valitakse interpoleerimise funktsioon- Tänu sellele, et alamdomeenid on väikeste mõõtmetega, siis on need funktsioonid väga lihtsad.
- Süsteemi formuleerimine ja probleemi lahendamine- Kogu valemite süsteemi rakendamine, väljade kirjeldus ja ettekujutus, see saavutatakse kasutades Galerikini või Rayleigh-ritz meetodit ja Maxwelli valemeid.
- Probleemi lahenduse tulemused- Kuvatakse saavutatud tulemused, mis tekkisid arvutuste tulemusena.

Eelmistest etappidest lähemalt rääkides, tehakse esimeses etapis domeenide jaotus. Näiteks uuritav objekt D jaotatakse lõplikuks arvuks alamobjektideks  $N_m$  ( $m= 1, 2, 3, \dots, N_m$ ). Jaotumine tehakse nii, et otsitavad tulemused oleksid kõige täpsemad. Täpsus oleneb suures osas arvuti jõudlusest, sest kasutaja saab valida, kui paljudeks alamobjektideks objekt jaotatakse. Mida rohkem objekte tehakse, seda pikemaks kulub arvutusteks minev aeg. [19] Järgnevalt on näidatud joonisel 5.3, kuidas üks püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasin on jagatud lõplikeks alamobjektideks, vasakul on algne masin joonistatuna programmis FEMM ja paremal on sama masina erinevad osad jaotatud lõplikeks väikesteks kolmnurkseteks alamobjektideks.



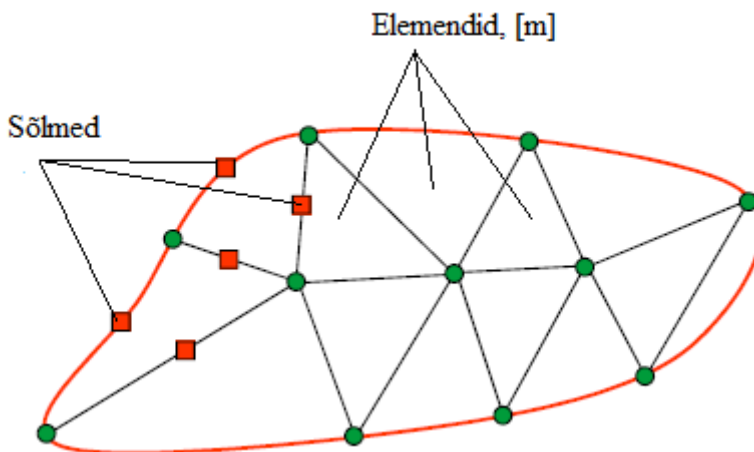
Joonis 5.3. Näide masina lõplikeks elementideks jaotamisest programmis FEMM

Järgmisel joonisel 5.4. on näha täpsemalt lõplikeks elementideks jaotumist. Esitatud on masina völli, mis on jaotatud lõplikeks väikesteks kolmnurkadeks programmis FEMM.



Joonis 5.4. Masina völli jaotamine lõplikeks elementideks programmiga FEMM

Domeenide elementideks jaotamise võimalusi on erinevaid, sest esineb FEA meetodit nii 2D kui 3D mudelites. Antud töös kasutatav FEMM võimaldab ainult 2D käsitlemist nagu eelmistel joonistel näha. Kahedimensioonilistes probleemides jaotatakse objekt pinnaobjektideks, mis võivad olla erinevad hulknurgad. Tavaliselt enamlevinuimad on kolmnurgad või ristkülikud. Järgnevalt on joonisel 5.5 näidatud kuidas objekt jaotatakse lõplikeks kolmnurkadeks. Iga kolmnurk on element, mis koosneb omavahel seotud olevatest külgedest, mida nimetatakse sõlmedeks. [19]



Joonis 5.5. Näide objekti jaotamisest lõplikeks kolmnurkadeks koos selgitustega

Teises etapis valitakse interpoleerimisfunktsioon, et hinnata tundmatut funktsiooni igas m-lemendis. Valitakse polünoomide arv ja tekib olukord, kus otsitav lahendus avaldub igas m-lemendis valemiga 5.1 [19]:

$$\Phi_m * (x, y, z, t) = \sum_{j=1}^n \Phi_{mj} v_{mj}(x, y, z, t), \quad (5.1)$$

kus  $n$  – elemendi sõlmede arv,

$\Phi_{mj}$  –  $\Phi$  väärtus m-nda elemendi j-ndas sõlmes

$v_{mj}$  – interpolatsioonifunktsioon m-nda elemendi j-ndas sõlmes.

Kolmandas etapis on vaja lahendada probleem ehk leida sõlmede väärtused, sest kui need on teada, siis saab kogu ülejäänud süsteemi lihtsalt välja arvutada. Selleks tuleb väärtused  $\Phi_{mj}$  arvutada igas elemendis kõikides sõlmedes. [19]

Tekkinud elementide ja sõlmede abil koostatakse maatriksid ja lõpptulemusena nende maatriksite jääk võrdub nulliga nagu järgmises valemis 5.2 näha. Tekib järgnev maatriks, kus  $SS$  on maatriks, mis põhineb interpoleerimis funktsioonidel,  $\Phi$  on tulba vektor tundmatutest sõlmede väärtustest.  $T$  on maatriks, milles on teadaolevad funktsioonid ja mille elemendid põhinevad erinevatest teadaolevatest funktsioonidest. Kokkuvõttes koosneb järgnev valem mitmetest  $N_n$  valemitest, millest igal on omakorda  $\Phi_j$  tundmatut. [19]

$$[SS][\Phi] - [T] = 0, \quad (5.2)$$

kus  $[SS]$  – on interpoleerimisfunktsioonide maatriks,

$[\Phi]$  – on sõlmede maatriks, mille väärtusi otsitakse,

$[T]$  – maatriks, mis koosneb teadaolevatest funktsioonidest.

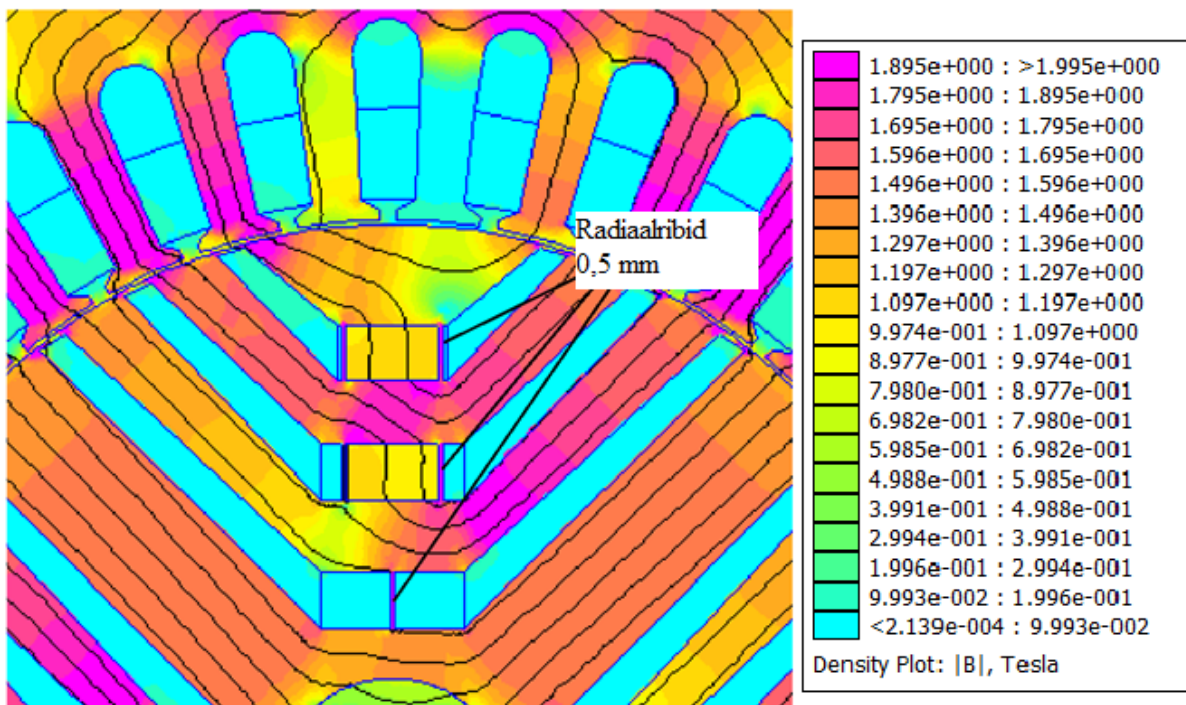
Selle süsteemi lahenduse tulemusena saame sõlmede väärtused  $\Phi_i$  ja eksisteerivad sobilikud algoritmid, mille põhjal saab lahendada terve masina süsteemi erinevad väärtused nagu jõud, moment, välja tugevused, kaod. [19]

### 5.3. Modelleerimise katsed ja tulemused

Järgnevalt on esitatud erinevate modelleerimiskatsete tulemused koos masina konstruktsiooni piltidega ja saadud momendi- nurgatunnusjoone graafikutega. Kõikides katsetes on staator

muutumatu ja ainult rootori konstruktsioonis viidi läbi muutusi, kusjuures rootoris on püsिमagnetite asukoht alati sama ja ka nende mõõtmed on sama suured. Püsिमagnetitena on enamasti katsete puhul kasutatud NdFeB 32 magneteid, juhul kui pole mainitud teisiti. Katsed on tehtud selliste koormusnurkade juures nii, et mõlemast perioodist jäi graafikule üks kumer ehk poolperiood.

Esimesed kaks katset keskendusid ribide laiuse uurimisele. Radiaalribide testimiseks tehti kolm katset, mille korral radiaalribide paksused olid 0,5 mm; 1 mm; ja 2 mm. Kõige kitsamate radiaalribidega rootori testitud konstruktsioon on esitatud järgneval joonisel 5.6, kus on näidatud radiaalribide asukohad ja legend magnetvoo tiheduste väärtustest.



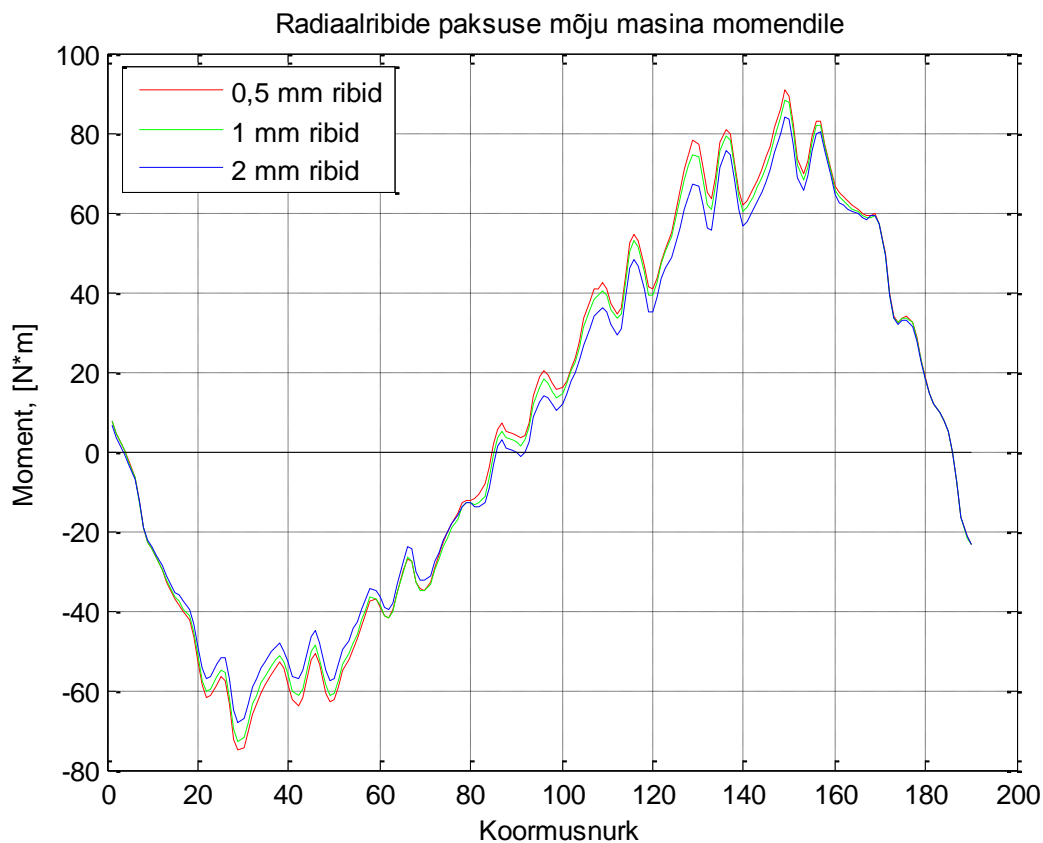
Joonis 5.6. 0,5 mm paksuste radiaalribidega testitud rootori konstruktsiooni pilt

Katsete tulemused on esitatud joonisel 5.7. Joonisel on kajastatud mõlemast perioodist kaks kumerat nagu illustratiivsel joonisel 5.2. Momente arvutati 190 erineva koormusnurga juures, et saada paremat ülevaadet graafiku nullpunktide kohta, mida on siis kerge jooniselt tuvastada.

Katsetulemused näitasid, et radiaalribid mõjutavad masina momenti, sest mida kitsamad on ribid, seda suurem maksimaalne moment tekib. Kui võtta arvesse seda, et masina q- telje magnetilise takistuse üheks mõjutajaks on radiaalribid, siis mida laiemad on radiaalribid, seda

paremini saavad magnetvoo jõujooned liikuda q- telje suunas ja seda väiksemaks läheb q ja d- telgede komponentide suhe, ehk reluktantsmoment väheneb. Kui radiaalribid on kitsamad, siis nad lähevad ka paremini küllastusse, ehk magnetiline takistus suureneb ning vähem magnetvoogu saab liikuda radiaalsuunas neist läbi.

Radiaalribide katsete graafikult on näha, et teisel perioodil on suurem maskimaalne moment kui esimesel. See kinnitab ka katseliselt, et magnetid mõjuvad ühes perioodi summaarsele momendile positiivselt ja teises negatiivselt. Lisaks võib tulemustest näha, et mida õhemad on radiaalribid, seda kiiremini hakkab moment suurenema, näiteks teise perioodi alguses.



Joonis 5.7. Radiaalribide modelleerimiskatse momendi- nurgatunnusjoone graafik

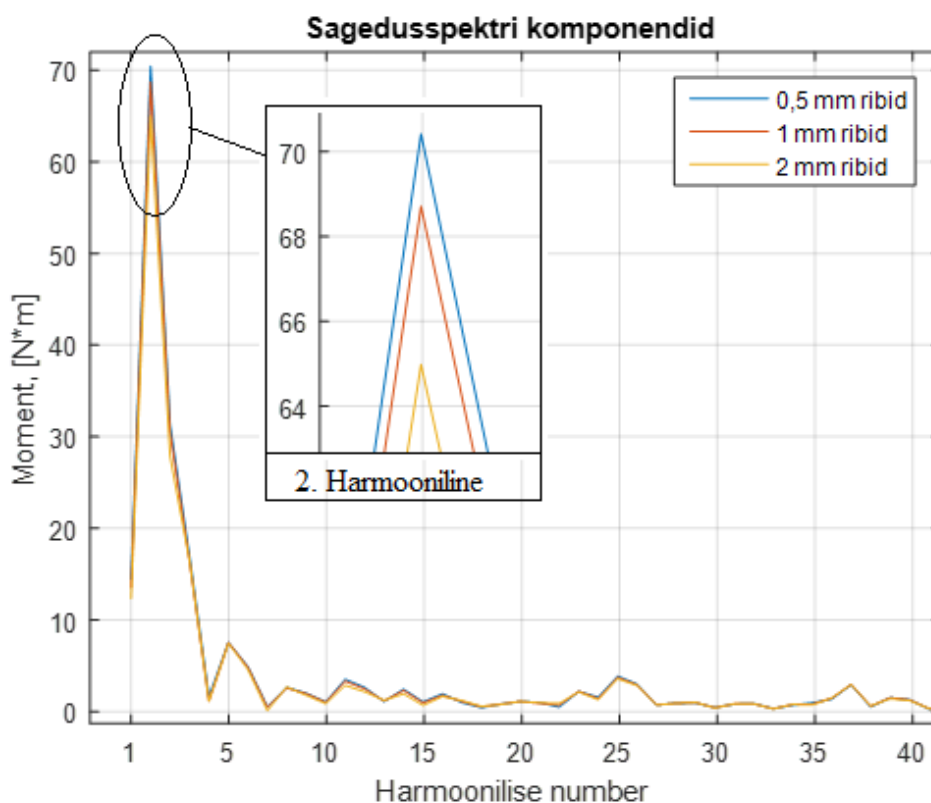
Alljärgnevas tabelis 5.1 on näidatud kõigi kolme katse korral saadud maksimaalsed momendid ja võrdlus protsentides. Võrdlus on tehtud katse suhtes, kus radiaalribid olid 0,5 mm paksud. Kui radiaalribide paksus suureneb, siis masina moment väheneb vastavalt 2,77 % 1 mm radiaalribide korral ja 7,29 % kui kasutusel on 2 mm ribid.



Tabel 5.1. Radiaalribide testimisel saadud maksimaalsed momendid

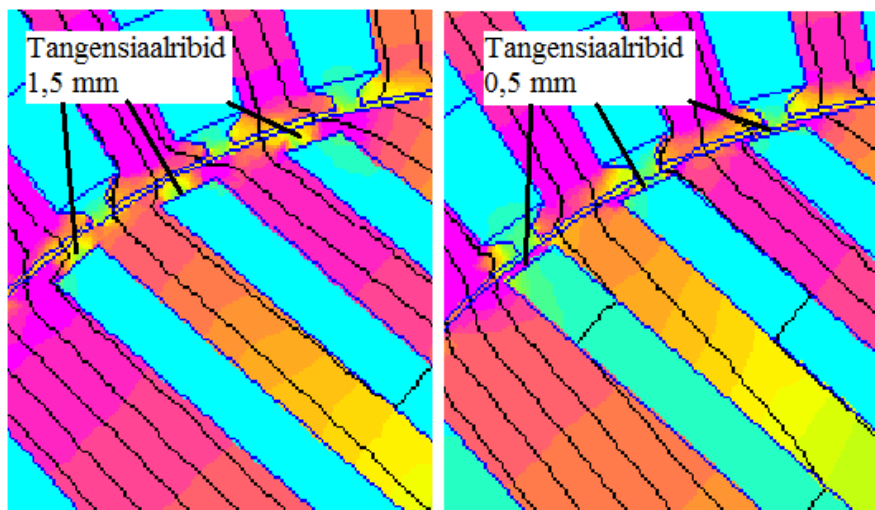
Radiaalribi paksus, [mm]	Maksimaalne moment, [Nm]	Võrdlev protsent, [%]
0,5	90,58	100,00
1	88,07	97,23
2	83,98	92,71

Katsetulemuste paremaks analüüsimiseks tehti saadud katsetulemuste signaalile Fourie'r teisendus. Selline teisendus annab võimaluse näha sagedusspektrit, mis on esitatud järgneval joonisel 5.8. Esitatud on harmoonilised kuni numbrini 40, ehk neljakümnes harmooniline vastab sagedusele 2000 Hz ja esimene harmooniline on 50 Hz. Jooniselt on näha, kui palju momenti mingi harmooniline tekitab, kusjuures esimene harmooniline kujutab magnetite poolt tekitatud momenti ja teine harmooniline on reluktantsmoment. Magnetid tekitavad näiteks 12,36 Nm suuruse momendi 2 mm paksuste radiaalribidega konstruktsioonis. Sagedusspektrist on näha, et kõigi kolme katse puhul ei tekkinud harmoonilistes suuruse kõikumisi. Ainuke erand oli teine harmooniline, mis on suuremalt välja toodud. Antud sagedusspekter tõestab taas, et kui radiaalribisid kitsamaks teha, siis tekib suurem reluktantsmoment ja ka maksimaalne moment suureneb selle arvelt.



Joonis 5.8. Radiaalribi katsete sagedusspektrid

Sarnane katse teostati ka tangentsiaalribide jaoks. Läbi viidi 3 katset, kus tangentsiaalribide paksused olid vastavalt 0,5 mm; 1,5 mm ja 2,5 mm. Tangentsiaalribisid katsetades olid radiaalribid 0,5 mm paksused, sest eelmisest katsest selgus, et siis on kõige suurem moment ja momendi pulseerumist nende paksus ei mõjutanud. Järgneval joonisel 5.9 on näited kahest katsetusel olnud konstruktsioonist, kus tangentsiaalribid olid 0,5 ja 1,5 mm paksusega.



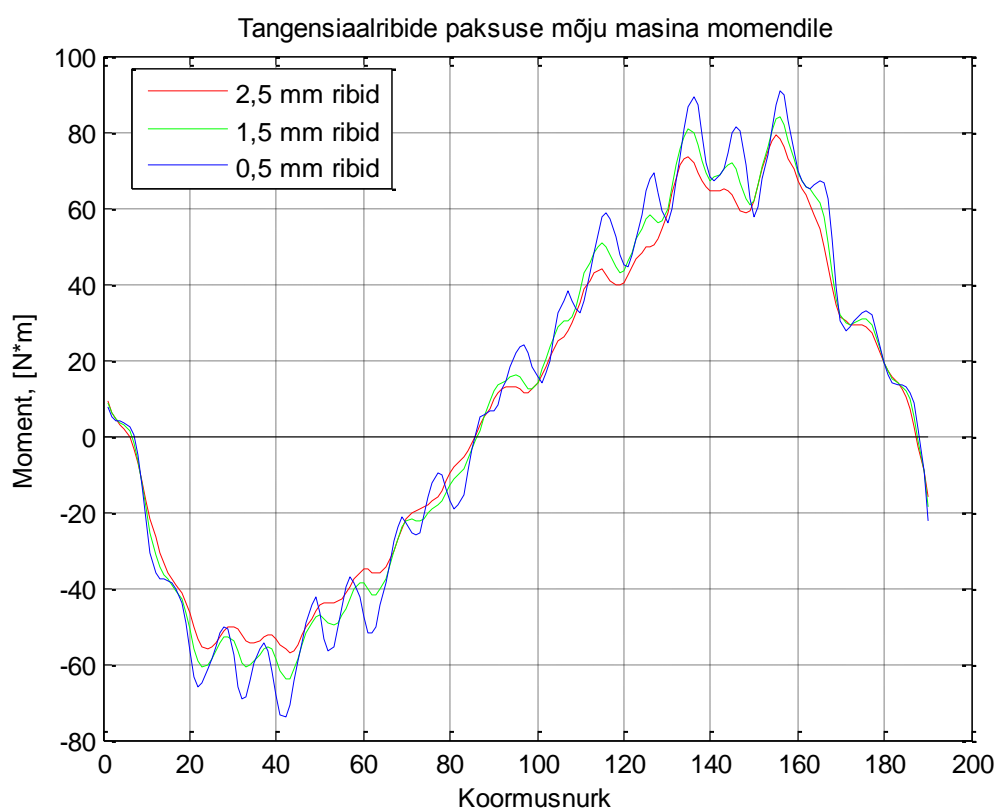
Joonis 5.9. Pildid tangentsiaalribide testimisel olnud kahest konstruktsioonidest

Katsetulemuste graafikult joonisel 5.10 on näha, et tangentsiaalribide laius mõjutab nii masina maksimaalmomenti kui ka momendi pulseerumist. Kui masina tangentsiaalribid teha laiemaks, siis väheneb momendi pulseerumine, kuid selle tagajärjel kaotame maksimaalses momendis. Momendi pulseerumine väheneb, sest kui tangentsiaalribid teha laiemad, siis kleepumismoment ei ole enam nii tugev. Momendis kaotame sellepärast, et tangentsiaalribid mõjutavad q- telje magnetilist läbitavust. Kui tangentsiaalribid on laiemad, siis väheneb radiaalsuunas magnetiline takistus ja reluktantsmoment väheneb. Lisaks ei lähe liiga laiad tangentsiaalribid enam nii lihtsalt küllastusse. Järgnevas tabelis 5.2 on täpsemalt toodud ära katsete tulemused ja maksimaalse momendi erinevused protsentides.

Tabel 5.2. Tangentsiaalribide katsetulemustest saadud momendid

Tangentsiaalribi paksus, [mm]	Maksimaalne moment, [Nm]	Võrdlev protsent, [%]
0,5	90,55	100,00
1,5	83,99	92,76
2,5	79,31	87,59

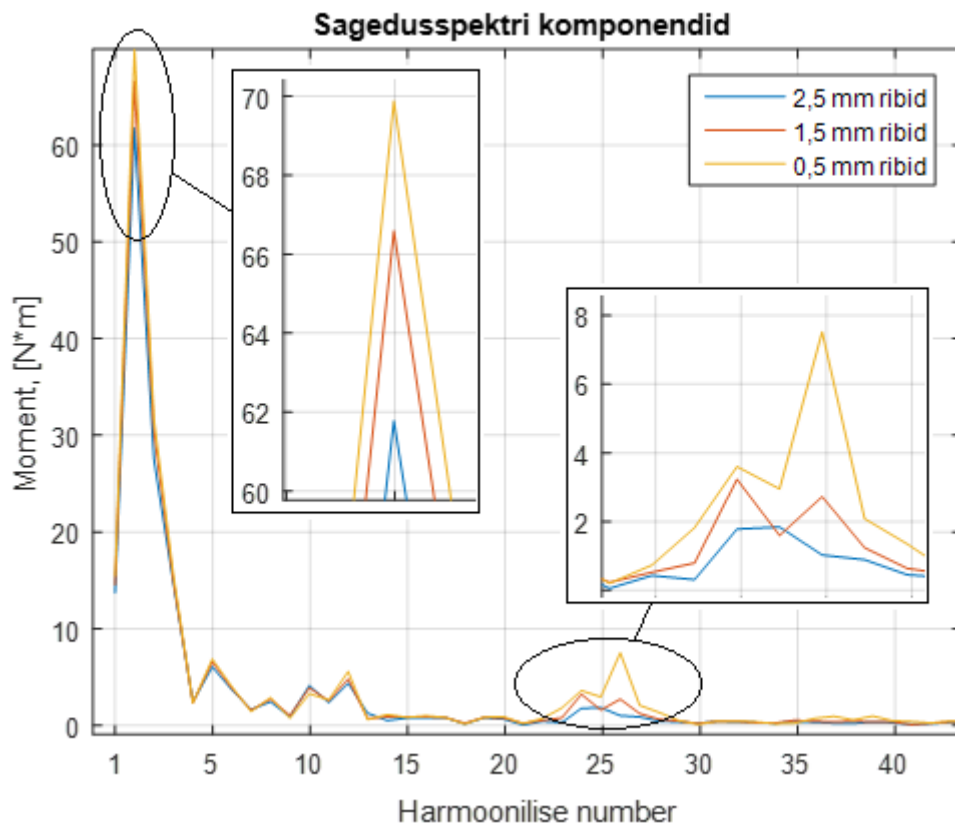
Võrreldes katsetulemusi 0,5 mm paksuste tangensiaalribide katsega, siis 1,5 mm tangensiaalribidega kaotame maksimaalses momendis 7,24 % ja 2,5 mm tangensiaalribidega 12,41 %. Positiivne on asjaolu, et laiemate tõkenditega tekib masinal palju sujuvam moment, ehk momendi pulseerumine väheneb. Selle tõttu on kõige otstarbekam kasutada 1,5 mm laiuseid ribisid ja mitte ainult sujuvama momendi pärast, vaid ka sellepärast, et tangensiaalribid saavad kõige rohkem mehaanilist pinget kui mootor töötab ja nad peavad neile pingetele vastu pidama, et rootori konstruktsioon püsiks koos.



Joonis 5.10. Tangensiaalribide momendi- nurgatunnusjoone graafik

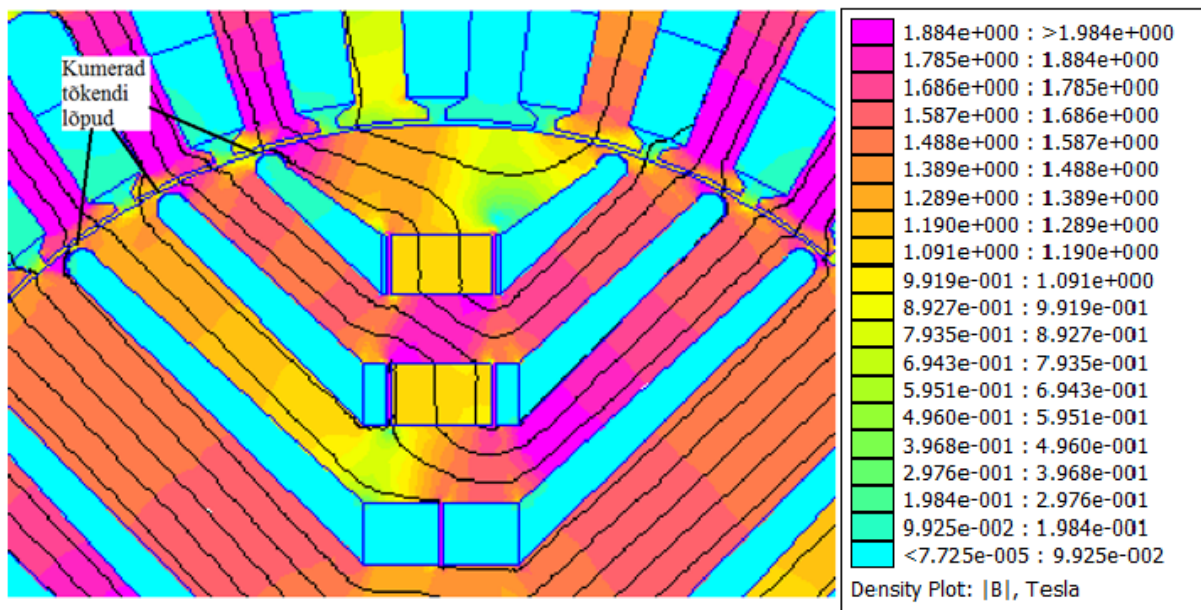
Järgneval graafikul 5.11 on esitatud kõigi tangensiaalribide katsete sagedusspektrid. Ka sagedusspektrist on näha, et kui tangensiaalribid laiemaks teha, siis teise harmoonilise poolt tekitatud moment kahaneb, ehk me kaotame reluktantsmomendis. Lisaks tulevad tangensiaalribide katsetest välja ka erinevused suuremate harmooniliste korral. Näiteks 27. harmoonilise juures on silmmärgatav erinevus. Selle harmoonilise juures, tekib kitsamate tangensiaalribide korral palju suurem moment, ehk selle tõttu hakkab suurenema momendi pulseerumine. Kõik harmoonilised välja arvatud esimesed 2 on tekitatud kleepumismomendi

poolt ja on masina momendile kahjulikud, sest tekitavad momendi pulseerumist. Kui vaadata ka teisi sageduse ülekordseid joonisel 5.11, siis ka nende suurusjärk erineb natuke, kuid silmmärgatav on see 27. harmoonilise juures, ehk sagedus sellel juhul on 1350 Hz.

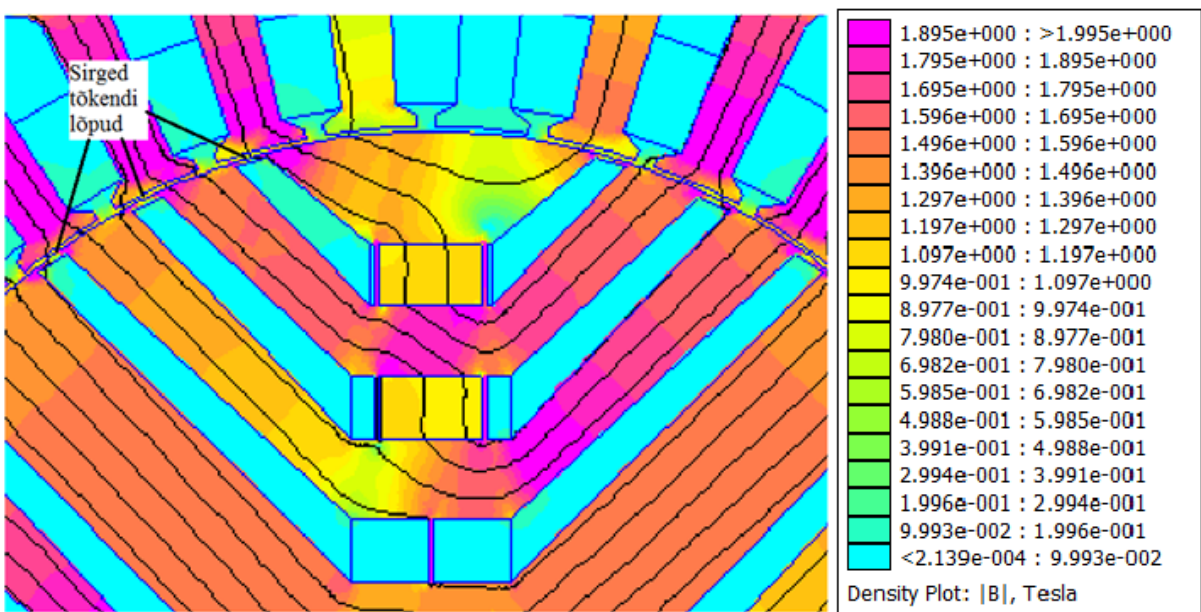


Joonis 5.11. Tangensiaalribi katsete sagedusspektrid

Ühes katses keskenduti magnetvoo tõkendite lõppude uurimisele. Kasutusel olid konstruktsioonid, millel olid samasugused magnetid ja tõkendid olid sama paksusega. Ainuke erinevus oli tõkendite tippudel. Ühel masinal olid tipud kumera kujuga ning teisel sirged nagu allolevatel joonistel 5.12 ja 5.13 näidatud. Ribide paksus oli 0,5 mm mõlema masina puhul.

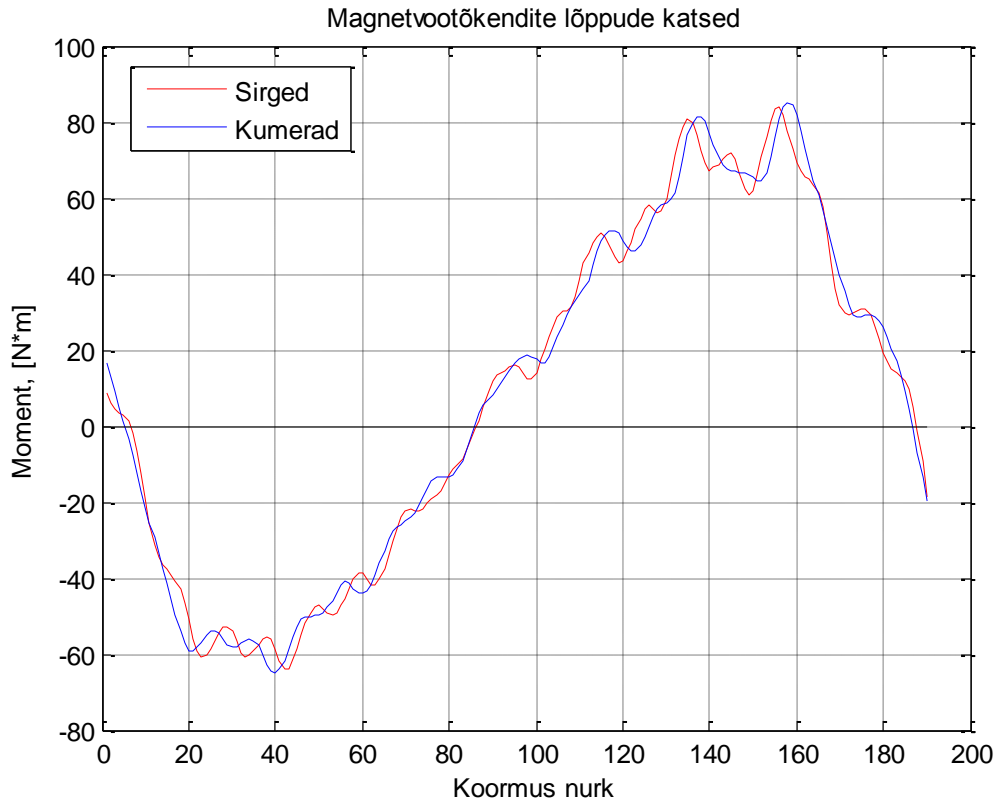


Joonis 5.12. Katsetatud konstruktsioon kumerate magnetvoo tõkendite lõppudega



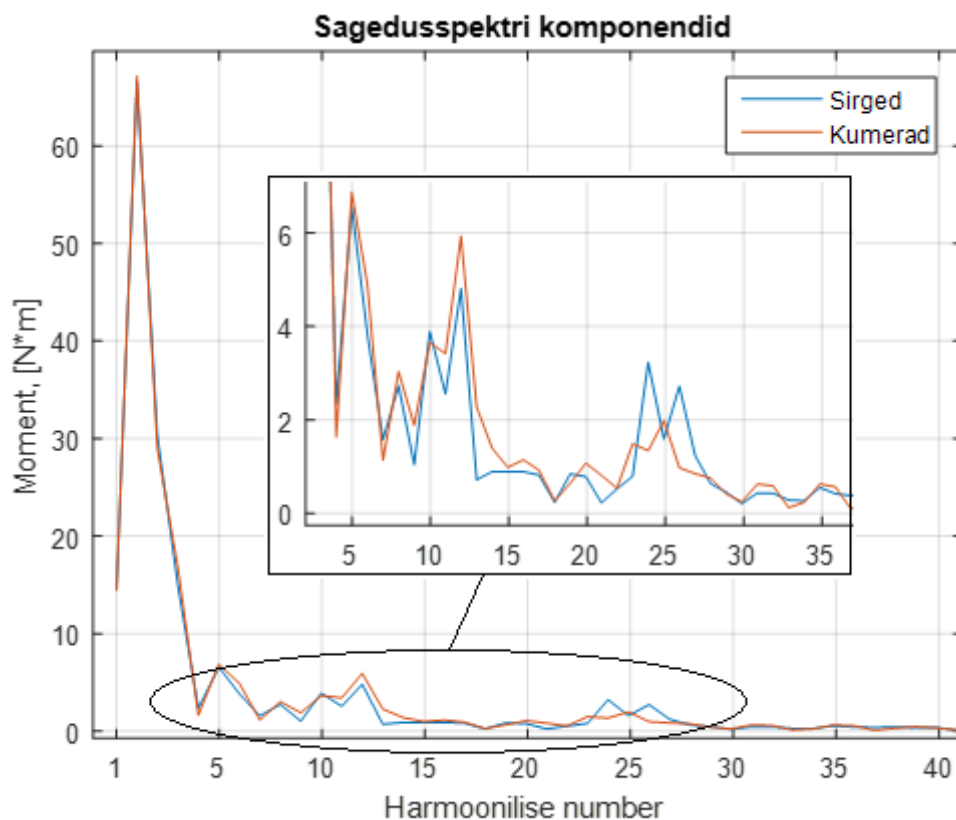
Joonis 5.13. Katsetatud konstruktsioon sirgete magnetvoo tõkendite lõppudega

Katsetulemuste graafik on järgneval joonisel 5.14. Tulemustest järeldub, et magnetvoo lõppude kumeraks muutmine ei mõjutanud suuresti maksimaalset momenti. Nimelt sirgete tõkendite lõppude puhul oli maksimaalne moment 83,99 Nm ja kumerate tõkendite lõppude puhul 85,18 Nm, mis tähendab, et maksimaalsele momendile erilist mõju ei olnud. Vaadates momendi- nurgatunnusjoone graafikuid visuaalselt, siis momendi pulseerumine oli mõlema konstruktsiooni puhul olemas ja silmaga suuri erinevusi ei ole märgata.



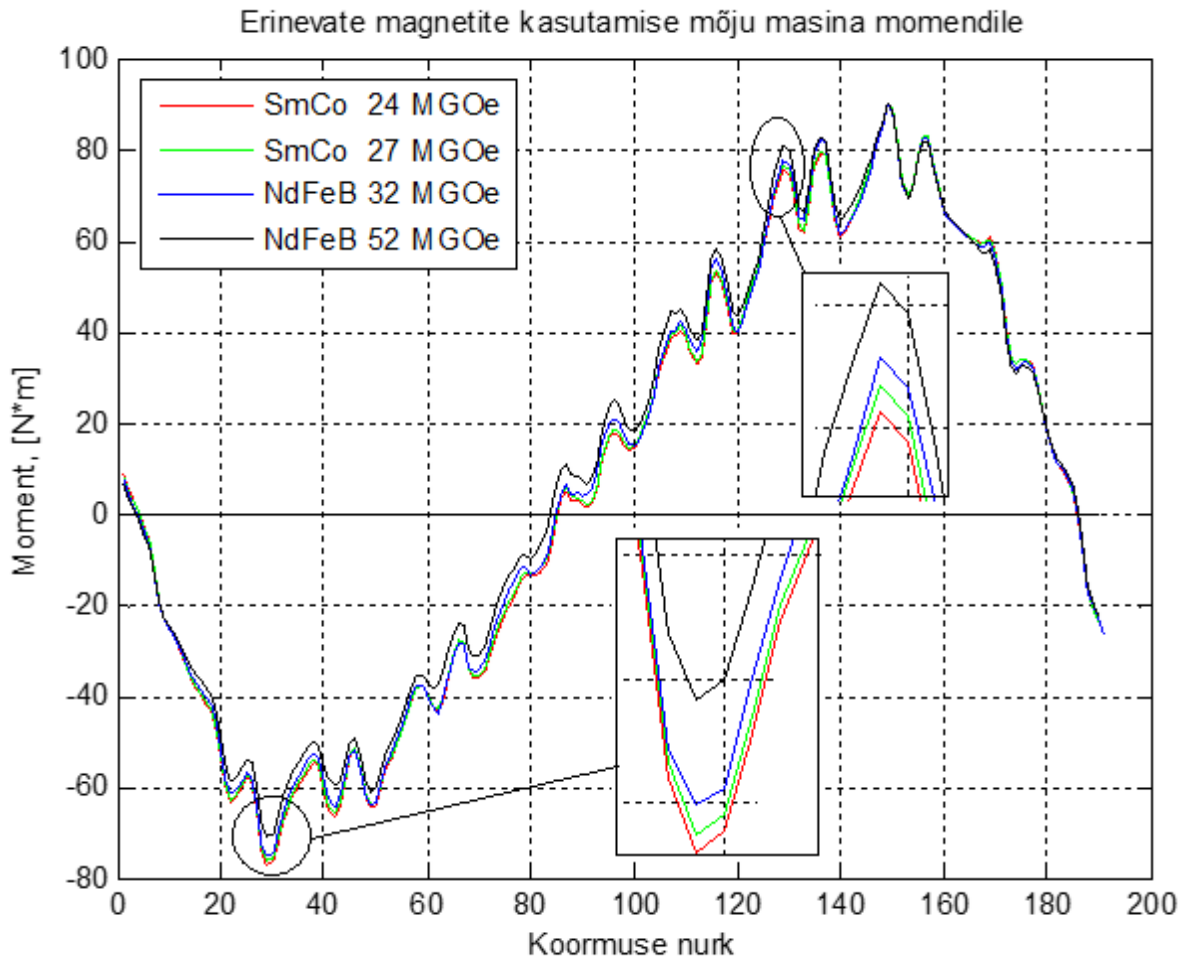
Joonis 5.14. Magnetvoo tõkendite lõppude testimisel saadud momendi- nurgatunnusjoone graafikud

Vaadates sagedusspektri graafikut joonisel 5.15 võib järeldada, et kõrgemate sageduste juures kumerate magnetvoo tõkenditega konstruktsioonis tekkis suurem moment. Jälgides suuremaid harmoonilisi kui 20 on kumerate tõkendilõppudega konstruktsioonis suurem kleepumismomendi mõju, sest domineerivad harmoonilised numbriga 24 ja 27. Sellepärast tasub sirgeid magnetvoo tõkendi lõppe kasutada, sest neid on kergem stantsida ja masina valmistamine on tõstuslikult kergem.



Joonis 5.15. Magnetvoo tõkendite lõppude katsetele vastavad sagedusspektrid

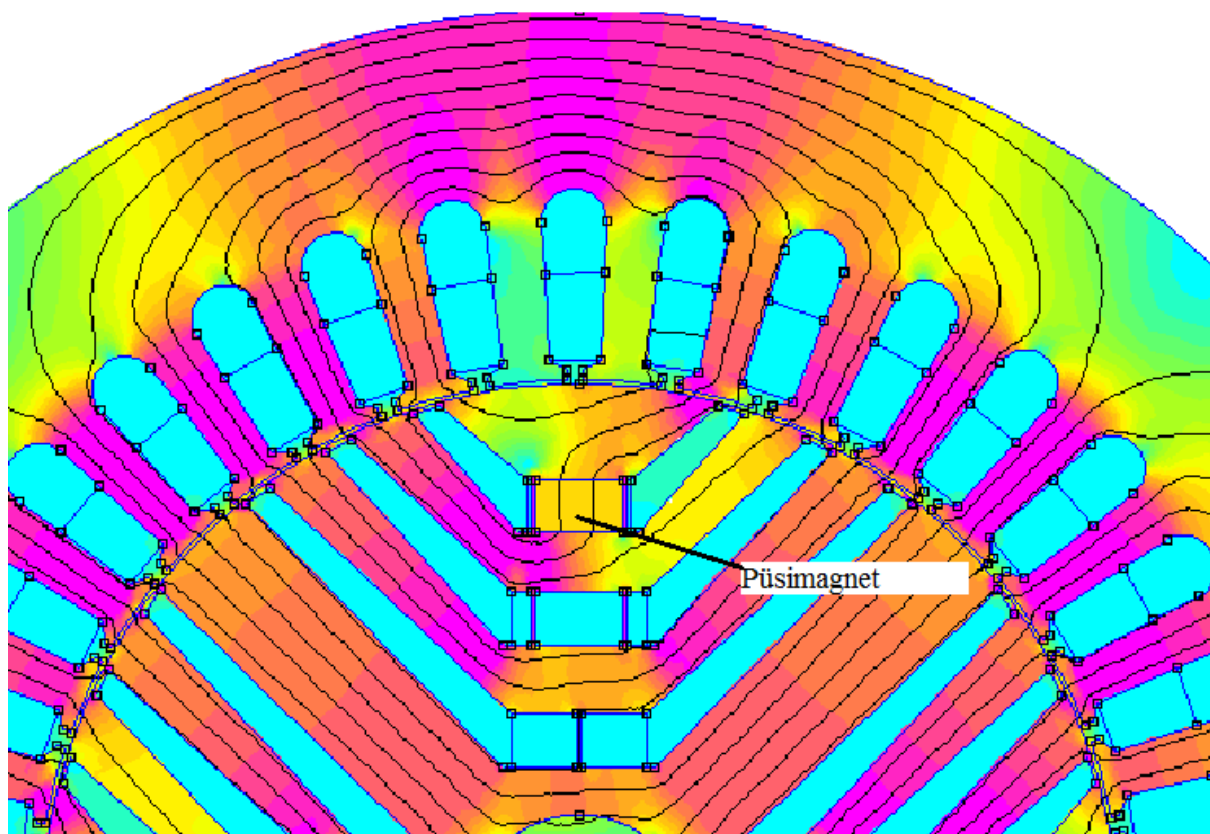
Masina konstruktsioonis omavad magnetid suurt mõju ja tänapäeval on saadaval erinevaid püsिमagnetid. Katsetati erinevaid püsिमagnetid sarnase konstruktsiooni juures. Magnetitena kasutati NdFeB 32 MGOe, NdFeB 52 MGOe, SmCo 27 ja SmCo 24 MGOe magnetid. Tulemused on joonisel 5.16 ja kõverate kuju jälgides järeldub, et püsिमagnetite muutmise momendi pulseerumisele erilist mõju ei avaldanud. Püsिमagnetid mõjusid periooditi masina momendile erinevalt. Näiteks, kui võrrelda NdFeB magnetid, siis esimeses perioodis nõrgemate omadustega magneti puhul tekib suurem moment, kuid teisel perioodil vastupidi väiksem moment. See on nii, sest magnetite mõju teises perioodis on suurem. Täpselt samamoodi käituvad ka kaks SmCo püsिमagnetit, millest üks oli paremate ja teine kehvemate parameetritega. Kui võrrelda NdFeB ja SmCo püsिमagnetid, siis erilist maksimaalse momendi erinevust ei tekkinud.



Joonis 5.16. Erinevat liiki püsिमagnetitega saadud momendi- nurgatunnusjoone graafikud

Uurimisel olevas konstruktsioonis on võimalik muuta ka magnetite arvu pooluse kohta. Sellest tulenevalt viidi läbi katse, kus rootoris pooluse kohta võeti kasutusele ainult üks püsिमagnet ja teine eemaldati. Katsetusel olnud konstruktsioonist on järgnevalt ära toodud ka pilt joonisel 5.17. Konstruktsioonis oli kõikide ribide paksus 0,5 mm ja püsिमagnetitena kasutusel NdFeB 32 püsिमagnetid.



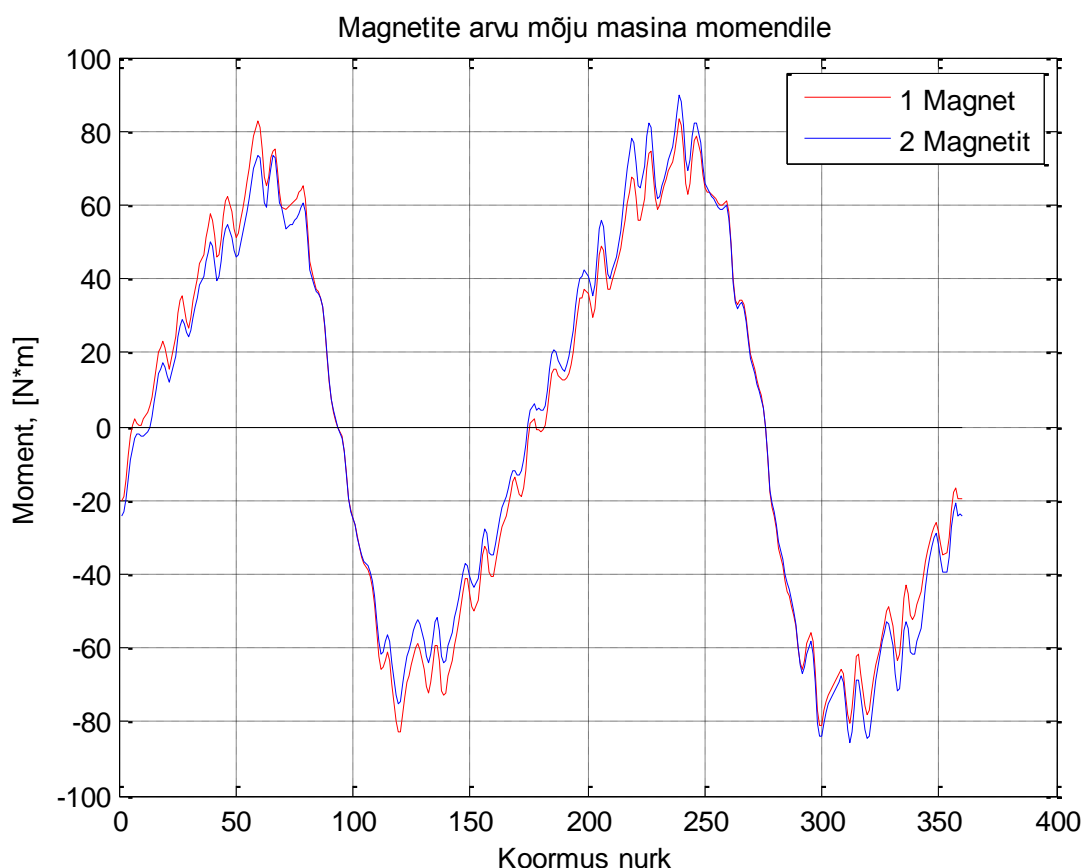


Joonis 5.17. Pilt rootori konstruktsioonist, kus pooluse kohta oli kasutusel ainult üks magnet

Katsetulemuste graafik on joonisel 5.18. Seal on võrreldud kahte konstruktsiooni, kus on kasutusel 1 või 2 magnetit rootori pooluse kohta. Antud graafikul on kujutatud mõlemad perioodid. Tulemused näitavad, et esimesel perioodil tekib ühe magnetiga konstruktsiooni puhul suurem moment ja teisel perioodil tekib kahe magnetiga konstruktsiooni puhul suurem moment. See tuleneb taas sellest, et magnetite mõju summaarsele momendile on positiivne teisel perioodil ja mittepositiivselt esimesel. Antud katses momendi pulseerumisele erilist mõju ei tekkinud, ehk see säilis mõlemas konstruktsioonis. Järgmises tabelis 5.3 on toodud antud katse maksimaalsed saavutatud momendid mõlema katse puhul. Mõlemad perioodid on kajastatud. Konstruktsioonis olid kõik magnetid ühe suurused, seega saab masina maksumust vähendada, ehk kulutused magnetitele on poole väiksemad.

Tabel 5.3. Maksimaalsed momendid konstruktsioonides, kus on erinev arv magneteid kasutusel

	Maksimaalne moment, [Nm]	
	Esimene periood	Teine periood
1 magnet	82,70	83,10
2 magnetit	73,46	89,8

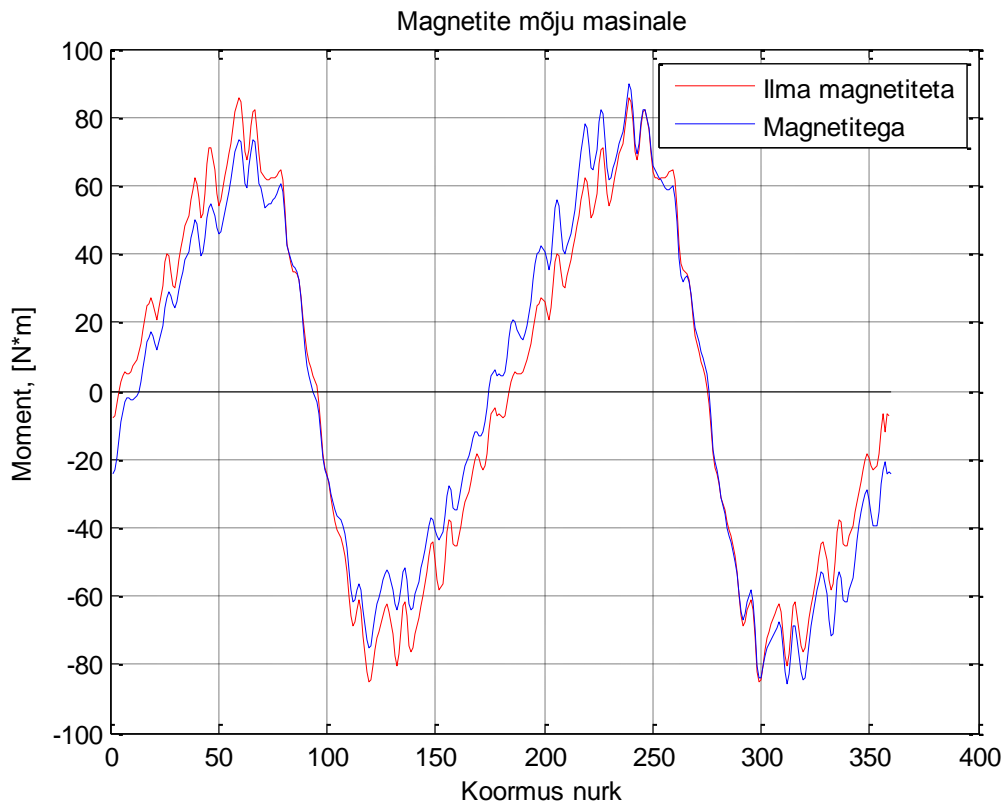


Joonis 5.18. Momendi- nurgatunnusjoon graafikud, kui kasutusel on vastavalt 1 või 2 magnetit ühe rootori pooluse kohta

Püsimagnetitega sünkroonreluktantsmasina moment koosneb nii reluktantsmomendist kui ka magnetite poolt moodustatud momendist. Vaadates illustreerivat püsimagnetitega reluktantsmasina momendigraafikut (joonis 5.2), siis selgub, et magnetid suurendavad ühe perioodi puhul maksimaalset momenti ja kahandavad teisel perioodil. Selle tulemusena tekib summaarsel momendil ka nullpunktide nihkumist graafikul, mille tagajärjel ei ole perioodid enam võrdse pikkusega. Need asjaolud sundisid uurima masinat ka nii, et ühtegi magnetit ei ole lisatud konstruktsiooni. Järgnevas katses on tehtud täpselt samasuguse konstruktsiooni korral kaks katset. Magnetitena olid kasutusel NdFeB 32 ja kõik ribad olid 0,5 mm paksused. Momendi pulseerumine säilis mõlemas katses.

Järgmisel joonisel 5.19 on katsetulemused, millest järeldub, et kui magneteid kasutusel ei ole, siis mõlemas perioodis on maksimaalne moment samas suurusjärgus. Magnetitega masina puhul esimeses perioodis väheneb moment ja teises suureneb. Magnetitega konstruktsiooni

juures nihkuvad ka nullpunktid. Nullpunktide nihkumisel muutub see periood pikemaks, kus magnetid suurendavad maksimaalset momenti ja väiksemaks seal, kus magnetid vähendavad maksimaalset momenti. Momendid ja nullpunktide nihkumise informatsioon on välja toodud järgnevas tabelis 5.4.



Joonis 5.19. Momendi- nurgatunnusjoone graafikud, kui püsimagnetid on kasutusel ja kui on eemaldatud

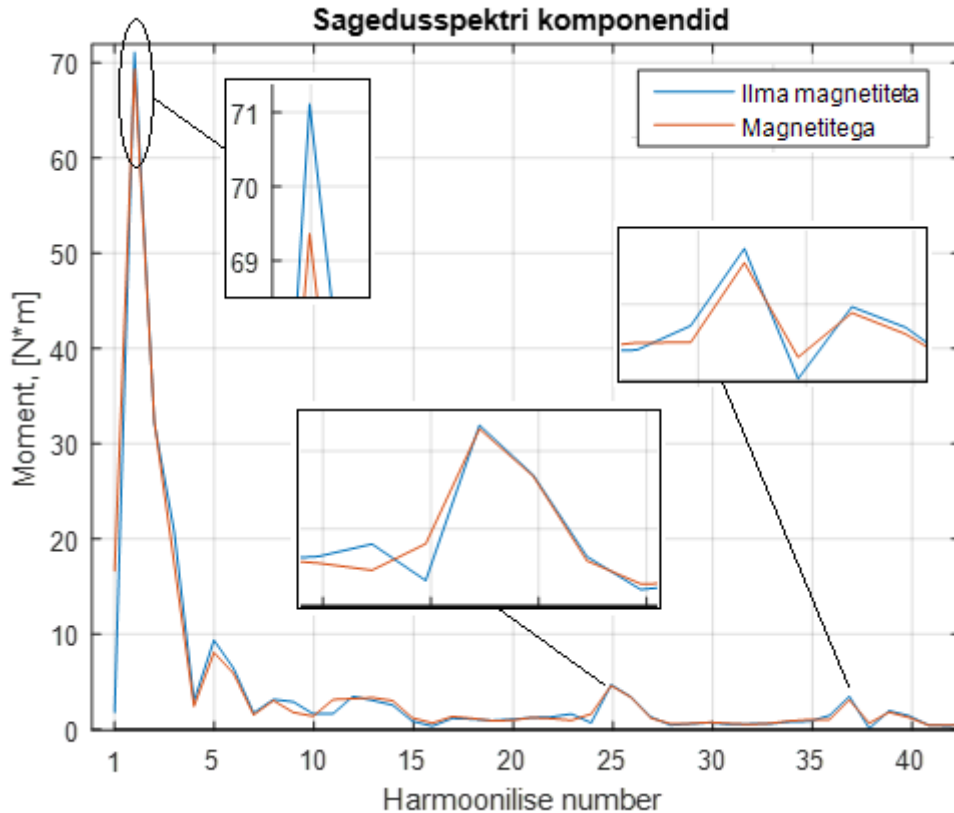
Tabelist 5.4 on näha, et kui NdFeB magnetid on kasutusel, siis esimesel perioodil väheneb maksimaalne moment 16,57 % ja teisel perioodil suureneb 4,71 %. Kui magneteid ei ole rootoris, siis on esimene ja teine periood võrdse laiusega. Lisades NdFeB 32 magnetid, siis nihkuvad nullpunktid nii, et esimene periood muutub kitsamaks ja teine periood laiemaks vastavalt suhtele, mis on järgnevas tabelis 5.4.

Tabel 5.4. Magnetite mõju masina maksimaalsele momendile ja perioodidele

	Maksimaalne moment, [Nm]	
	Esimene periood	Teine periood
Magnetitega	73,46	89,80
Ilma magnetiteta	85,63	85,57
Perioodide pikkuste suhe, [%]		
	Esimene periood	Teine periood
Magnetitega	44,72	55,28
Ilma magnetiteta	Võrdsed	

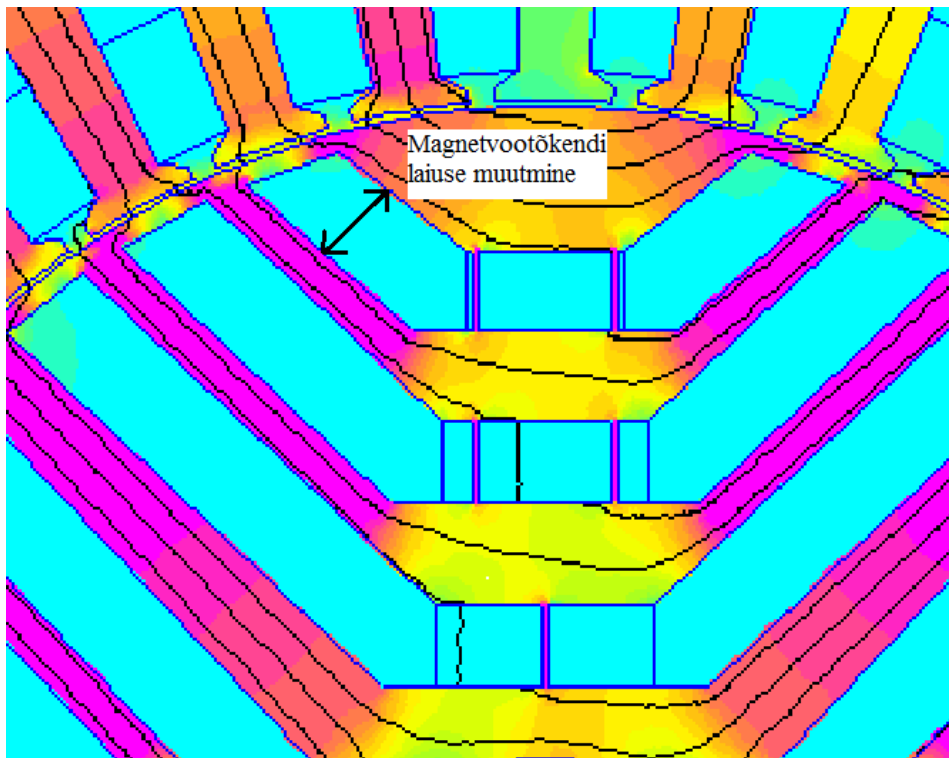
Saadud momendi- nurgatunnusjoone graafikult (joonisel 5.19) on näha, et nullpunktide nihkumine tekitab mõlema konstruktsiooni korral samade koormusnurkade juures erineva momendi. Võrreldes mõlema konstruktsiooni perioode selgub, et kui algab esimene periood, siis ilma magnetiteta konstruktsioonis on kolmeteistkümnenda koormusnurga juures moment 11,14 Nm. Selle koormusnurga juures algab magnetitega konstruktsioonil esimene periood, aga magnetitega masinal on moment alles nullilähedane. Kui vaadata teist perioodi, siis on asi vastupidine. Ilma magnetiteta masinal on teise perioodi alguses (koormusnurga 184 juures) moment null ja samal ajal magnetitega konstruktsioonis on saavutatud juba 15,28 Nm suurune moment. Järelikult tehtud katsete põhjal järeldub, et esimesel perioodil tõuseb moment kiiremini ilma magnetiteta konstruktsiooni juures ning teisel perioodil on vastupidi, ehk magnetitega konstruktsiooni juures tekib kiirem momendi tõus.

Võrreldes magnetitega ja ilma magnetiteta konstruktsioone, siis momendi pulseerumine säilis mõlemal juhul. Järgnevalt on esitatud katsetulemuste sagedusspekter joonisel 5.20, mis on tehtud koormusnurkade korral 85 kuni 275 kraadi, ehk hõlmates mõlema perioodi ühte kumerat. Sagedusspektri esimene harmooniline näitab, et magnetitega konstruktsioonis tekib magnetite poolt lisa moment, mis on 16,63 Nm. Lisaks on näha, et reluktantsmoment ( 2. harmooniline) väheneb, kui võtta kasutusele magnetid. Momendi pulseerumisele magnetid mõju ei avaldanud. Vaadates sagedusspektri graafikut, siis võib näha, et kõik kõrgemad harmoonilised olid suuruselt sarnased.



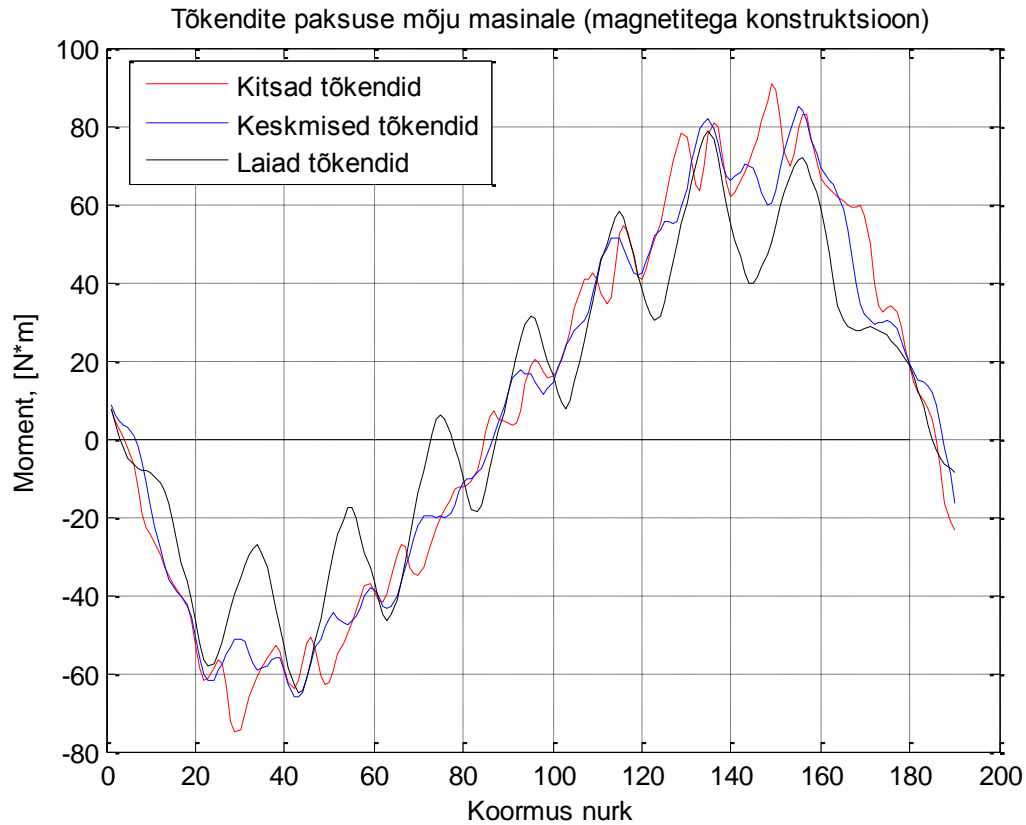
Joonis 5.20. Magnetitega ja ilma magnetitega konstruktsioonide sagedusspektrid

Eelnevatest peatükkidest selgus, et väga palju mõjutab masina momenti magnetvoo tõkendite laius. Järgnevates katsetes testiti konstruktsioone, kus on kasutusel NdFeB püsिमagnetid. Tangentsiaalribid on 1,5 mm paksused ja radiaalribid on 0,5 mm paksused. Magnetvoo tõkendite laiust muudeti ainult tangentsiaalsuunaliselt, nii nagu järgneval joonisel 5.21 näidatud. Joonisel on näidatud pilt ühe katse konstruktsioonist, kus kasutusel olid kõige laiemad magnetvoo tõkendid.



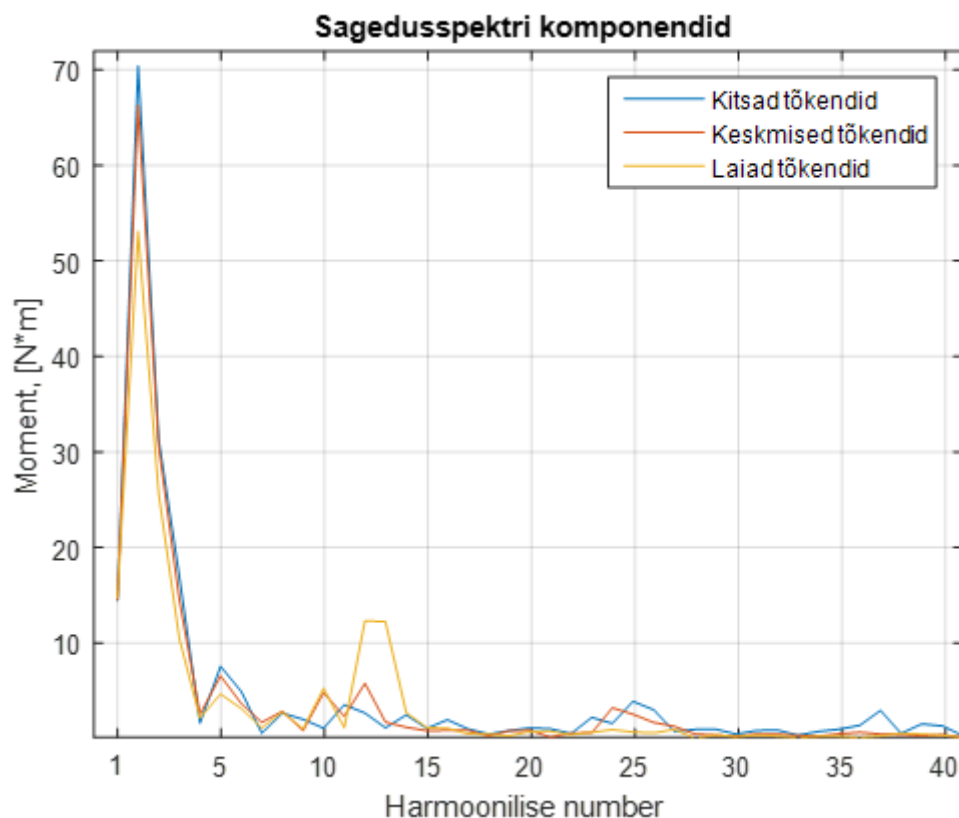
Joonis 5.21. Pilt magnetvoo tõkendite laiuse testimisel olnud konstruktsioonist

Katse tulemused on näidatud järgneval joonisel 5.22. Katsete tulemusest selgub, et kui magnetvoo tõkendid laiemaks teha vastavalt eelmisel joonisel näidatud suunas, siis suureneb momendi pulseerumine. Pulseerumise mõju oli sarnane nii magnetitega kui ilma magnetiteta konstruktsiooni korral. Kui kasutusel on laiad magnetvoo tõkendid, siis on rootori konstruktsioonis magnetvoo läbitavus raskendatud. Masinas saab magnetvoog läbi õhupilu staatorist rootorisse liikuda vaid siis soodsalt, kui vastastikku on magnetvoogu juhtivad materjalid, kuid magnetvoo tõkendid ei juhi magnetvoogu. Lisaks suureneb ka masina kleepumismoment.



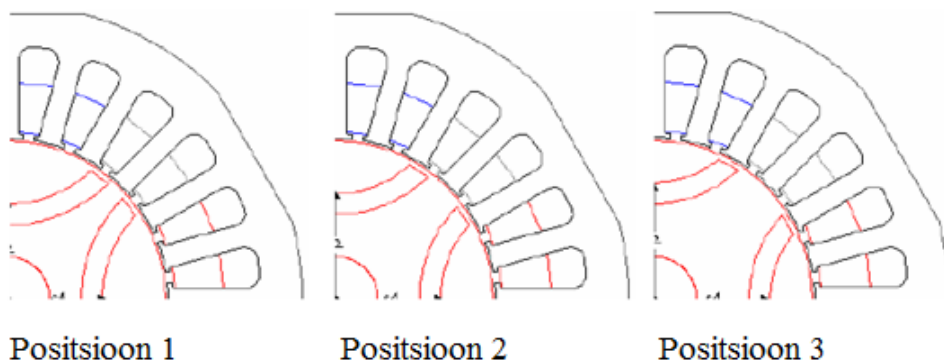
Joonis 5.22. Momendi- nurgatunnusjoone graafikud erineva laiusega magnetvoo tõkendite korral

Järgnevalt on näidatud joonisel 5.23 katsete sagedusspektrid. Esiteks hakkab vähenema reluktantsmoment, kui magnetvoo tõkendeid laiendada tangentsiaalsuunaliselt. Momendi-nurgatunnusjoone graafikult võis juba silmaga näha, et momendi pulseerumine suureneb, kui magnetvoo tõkendid laiemaks muuta. Sagedusspektrist järeldub, et seda põhjustab suure osas 13. harmooniline. Kui magnetvoo tõkendid kitsamaks teha, siis graafikult järeldub, et mängu tulevad rohkem kõrgemad harmoonilised. Näiteks 25.; 37. ja 39. harmoonilised hakkavad mõjutama momendi pulseerumist.



Joonis 5.23. Magnetvoo tõkendite laiuse katsete sagedusspektrid

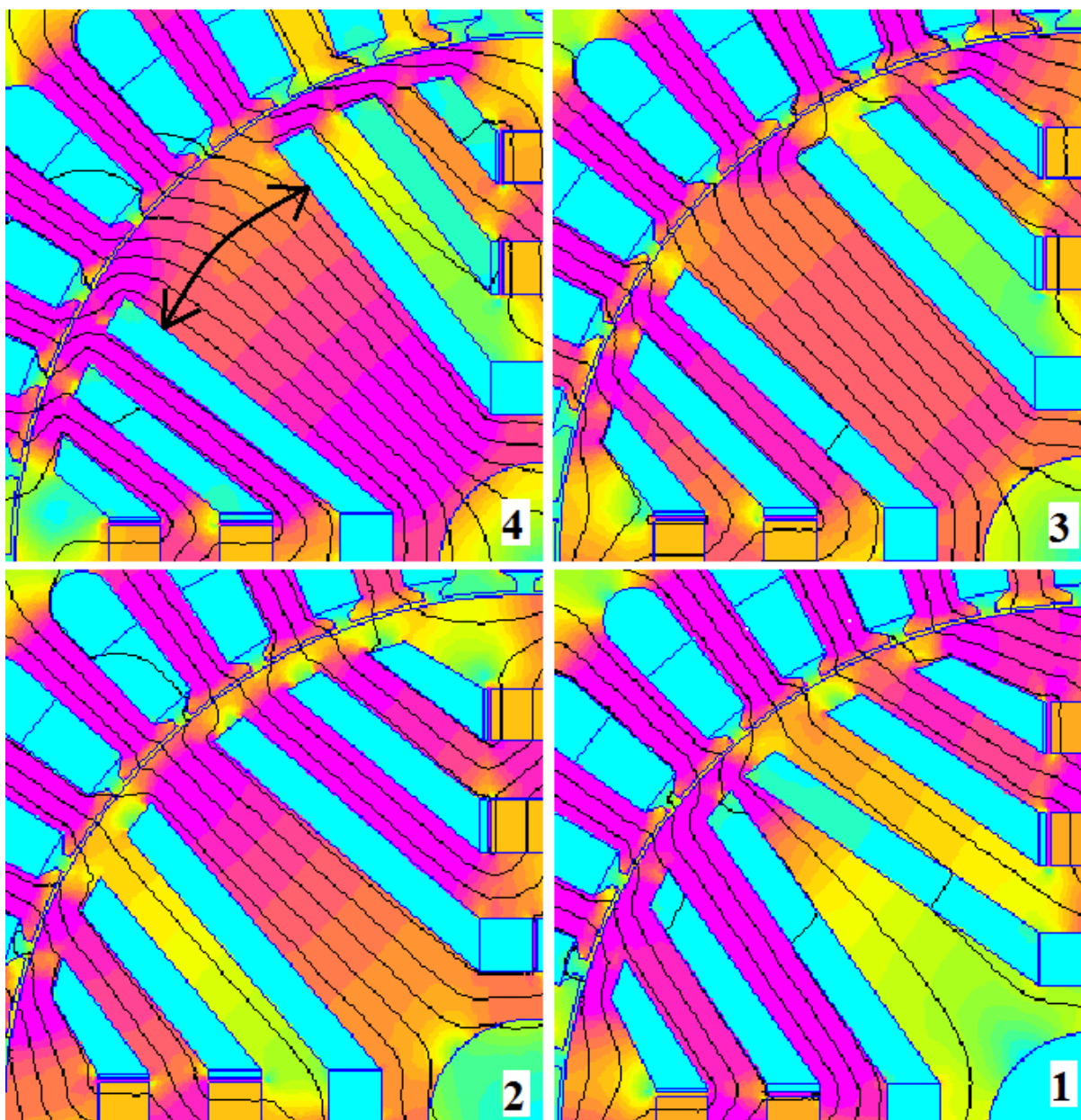
Magnetvoo tõkendite erinev paiknemine masina momendile, seega tehti mõningad katsed. Sama paksusega magnetvoo tõkendeid liigutati sarnaselt järgmisele joonisele 5.24 [7].



Joonis 5.24. Illustratiivne joonis magnetvoo tõkendite paiknemise erinevatest positsioonidest

Läbi viidi neli katset, mille konstruktsioonid on esitatud järgneval joonisel 5.25. Katsete käigus kord lähendati rootori kahe pooluse magnetvoo tõkendite lõppe üksteisele ja siis jälle viidi kaugemale. Katsetulemuste võrdluseks nummerdati katsed, et graafikult tuvastada vastava konstruktsiooni momendikõver.

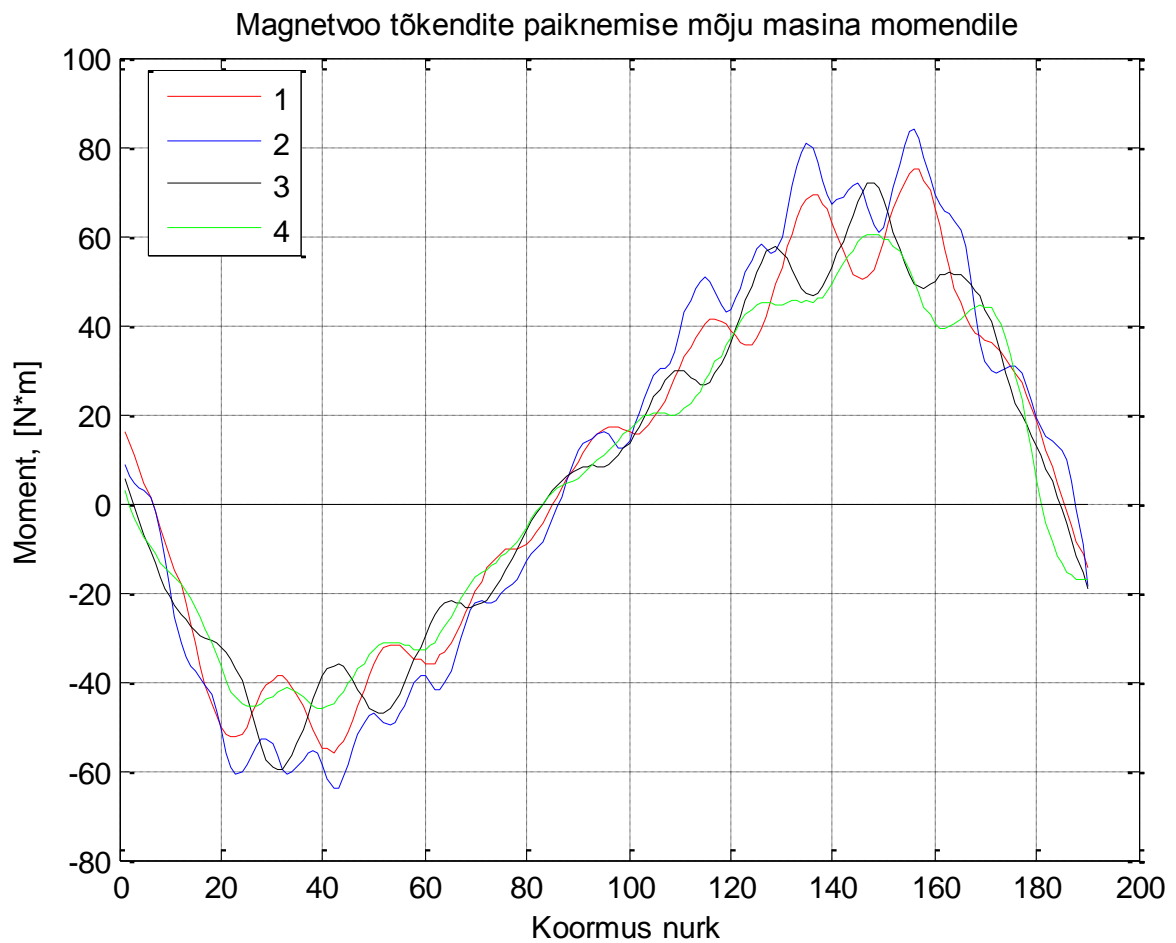




Joonis 5.25. Pildid magnetvoo tõkendite asendi testimisel olnud konstruktsioonidest

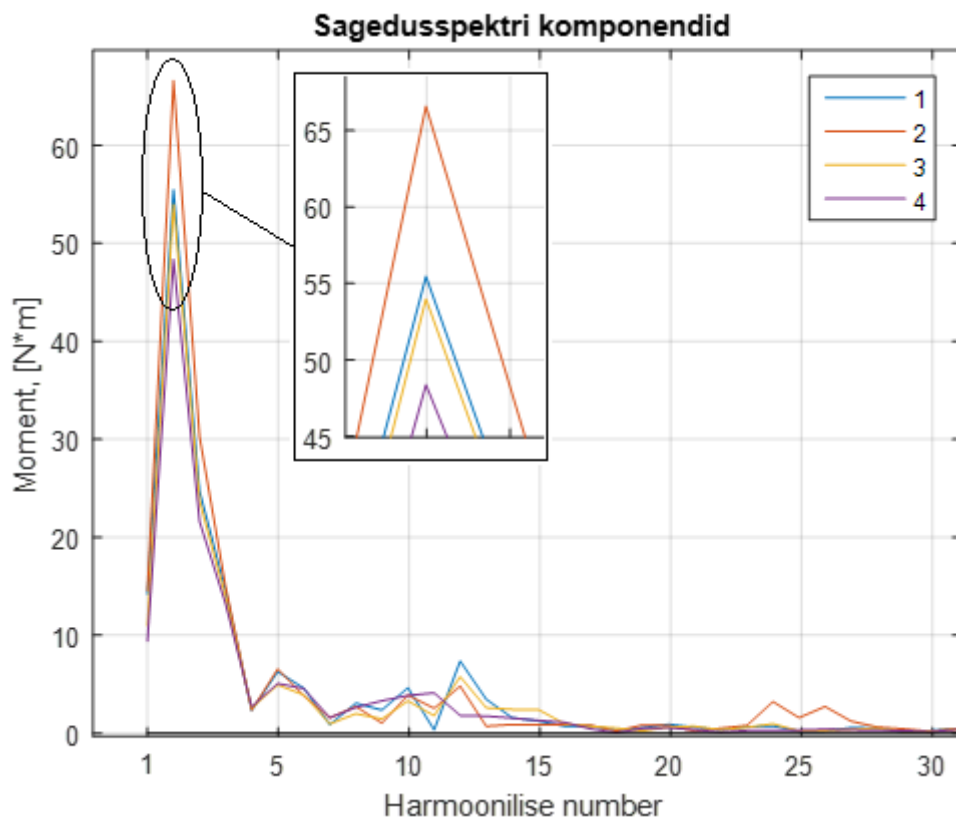
Katsetulemuste graafik on esitatud järgmisel joonisel 5.26. Tulemustest selgub, et konstruktsioon number 2 andis kõige suurema momendi, lisaks muutsid kõik konstruktsioonid momendi pulseerumist erinevalt. Esimese konstruktsiooni juures suurenes momendi pulseerumine, seega võib järeldada, et kui rootori kahe pooluse magnetvoo tõkendid lähestikku on, siis suureneb kleepumismoment. Pöörates tähelepanu neljandale konstruktsioonile, siis võib täheldada, et kui magnetvoo tõkendite lõpud on üksteisest eemal, siis väheneb kleepumismomendi mõju ja pulseerimine väheneb, kuid samal ajal kaotame momendis. Tulles

tagasi joonise 5.24 juurde, siis kõige väiksema momendi pulseerimise saab tõkendi positsioonidega number 2 ja 3 [7].



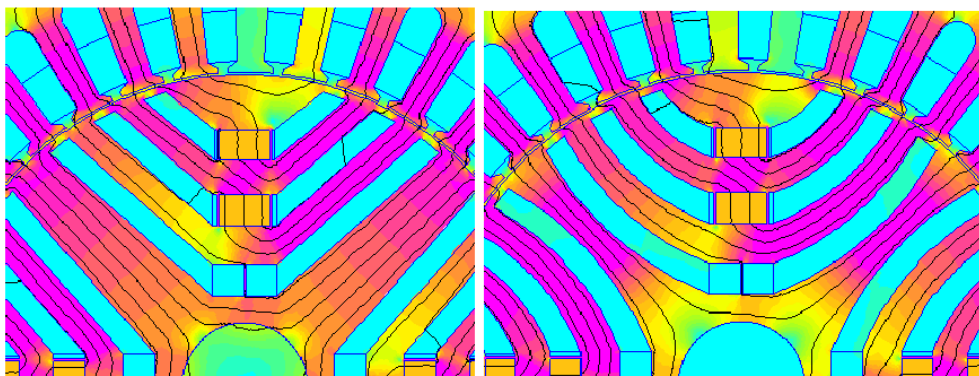
Joonis 5.26. Momendi- nurgatunnusjoone graafikud erinevate magnetvoo tõkendite paiknemise korral (4 erinevat konstruktsiooni)

Järgnevalt on esitatud joonisel 5.27 ka kõigi nelja katse sagedusspekter. Teine harmooniline ehk reluktantsmoment on suurendatult välja toodud. Konstruktsioonis number 2 oli kõige suurem reluktantsmoment, kuid ka kõige suurem 27. harmooniline, mis tekitab momendi pulseerimist. Kolmandas ja neljandas konstruktsioonis oli väiksem magnetite poolt moodustatud moment, mis tähendab, et kui magnetvoo tõkendeid üksteisest laiemale asetada, siis magnetid pole enam nii efektiivsed. Sagedusspektrist järeldub, et neljandas konstruktsioonis on kõrgemate harmooniliste mõju vähenenud. Kõige enam mõjutas pulseerimist harmooniline 13.



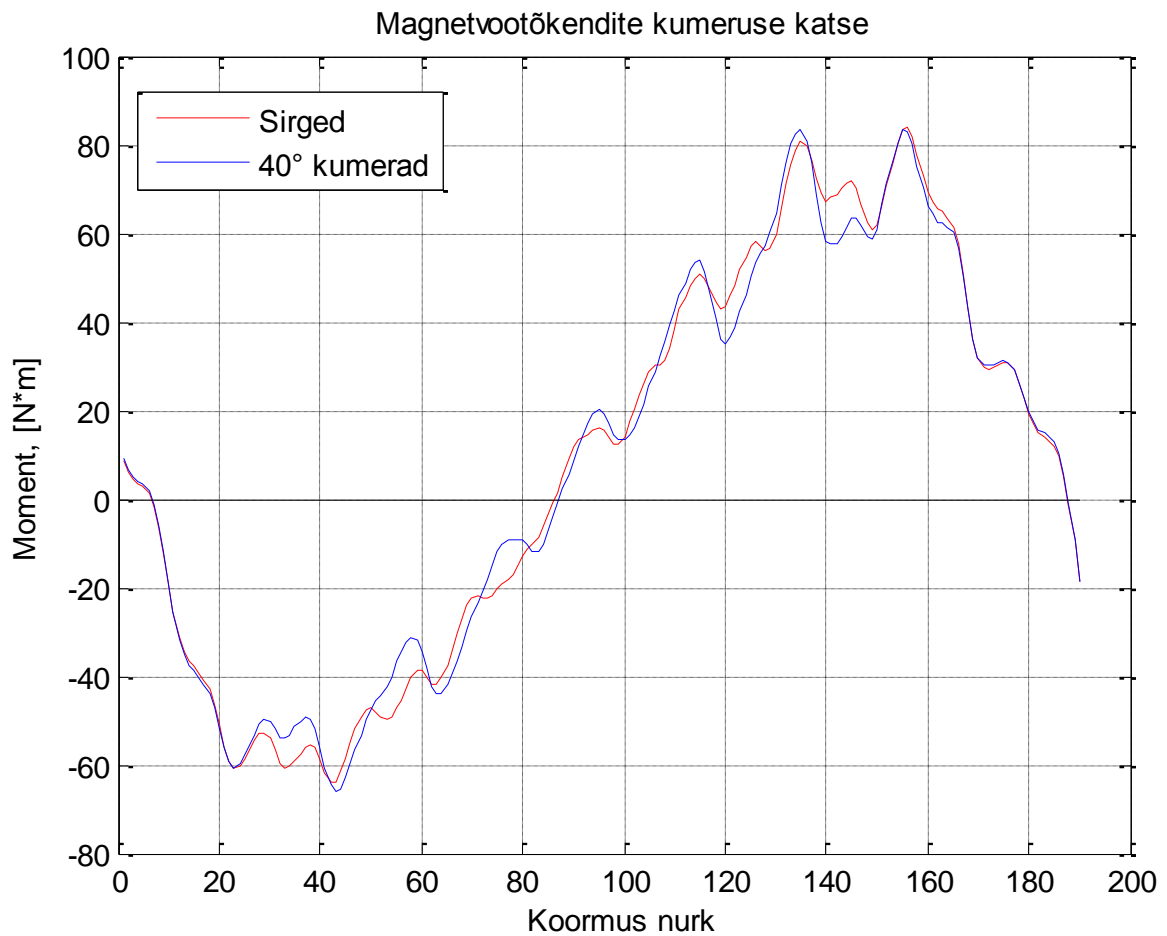
Joonis 5.27. Magnetvoo tõkendi asendi testimisel olnud konstruktsioonide sagedusspektrid

Välja on töötatud konstruktsioone, kus magnetvoo tõkendid on kumerad, mitte sirged. Et teada saada, kuidas mõjutavad kumerad magnetvoo tõkendid masina momenti, viidi läbi katsed. Katsetes olid kõik masina parameetrid samad, erinevus oli selles, et ühes katses olid tõkendid 40 kraadise kumerusega ja teises sirged. Katsetes olnud konstruktsioonidest on järgmisel joonisel 5.28 pildid, kus on näha magnetvoo tõkendite kuju erinevust.



Joonis 5.28. Pildid konstruktsioonidest, kus magnetvoo tõkendite kuju muudeti

Katsetulemused on kajastatud järgmisel joonisel 5.29. Kahe katse põhjal võib järeldada, et magnetvoo tõkendite kumeraks muutmine ei mõjutanud silmmärgatavalt maksimaalset momenti. Momendi pulseerimist vaadates võib järeldada, et kumerate tõkenditega tekkis sarnane momendi pulseerimine. Kui võtta arvesse masina tehases tootmine ja antud katse tulemused, siis võib järeldada, et magnetvoo tõkendid võib sirgeks jätta, sest maksimaalsele momendile erilist mõju ei olnud ja pulseerimine suurenes, mis on halb. Lisaks on ka sirgete tõkendite valmistamine tehases palju lihtsam.



Joonis 5.29. Momendi- nurgatunnusjoone graafikud sirgete ja kumerate magnetvoo tõkenditega konstruktsioonides

## 5.4. Modelleerimiste kokkuvõte

Antud alapeatükis on tehtud modelleerimiskatsetest kokkuvõte. Katsetest on näha, et rootori konstruktsiooni muutmine mõjutab masina momenti. Esiteks uuriti kuidas masina ribad mõjutavad masinat. Radiaalribide katsetest selgus, et maksimaalne moment suureneb, kui radiaalribide laiust vähendada. Radiaalribide laiuse muutmine momendi pulseerimisele mõju ei avaldanud, mida näitas ka katsete sagedusspekter. Moment suurenes kitsamate radiaalribide korral sellepärast, et siis nad lähevad paremini küllastusse, ehk q- telje magnetiline takistus suureneb, mille tagajärjel tekib suurem reluktantsmoment.

Teiseks ribide liigiks on tangensiaalribid. Teostati 3 katset, mis näitasid, et nende paksuse muutmine mõjutab nii maksimaalse momendi suurenemist, kui ka momendi pulseerimist. Tangensiaalribide laiust suurendades saab väiksema momendi pulseerimise, kuid kaotatakse maksimaalses momendis. Reluktantsmoment väheneb, sest q- telje magnetiline takistus väheneb. Selgus, et väheneb kleepumismomendi mõju, kui suurendada tangensiaalribide laiust. Seda tõestab ka sagedusspektri graafik, kus esines suurem erinevus 27. harmoonilise juures. Katsetest järeldus, et kui esialgne tangensiaalribide paksus on 0,5 mm ja seda hakata suurendama 1 mm võrra, siis maksimaalne moment väheneb vastavalt 7,24 % ja 2,5 mm paksuste ribidega on see vähenenud 12,41 %. Järgnevasse tabelisse 5.5 on koondatud ka informatsioon, kuidas ribide muutmine mõjutab masinat.

Tabel 5.5. Ribide mõju masina momendile

Ribide tüüp	Muudatus	Maksimaalne moment	Momendi pulseerimine
Radiaalribid	Laiendades	Väheneb	Säilib
	Kitsendades	Suureneb	Säilib
Tangensiaalribid	Laiendades	Väheneb	Väheneb
	Kitsendades	Suureneb	Suureneb

Töös uuritava konstruktsioonil on kasutusel püsिमagnetid ja ka nende mõju momendile uuriti. Katsetati nelja erinevat püsिमagnetit, millest kaks olid NdFeB ja teised SmCo püsिमagnetid. Järeldus, et kasutades erinevaid magneteid, ei avaldanud see mõju momendi pulseerimisele, sest pulseerimine säilis sarnastes piirides. Lisaks selgus, et püsिमagnetid mõjusid periooditi masina momendile erinevalt, sest püsिमagnetid mõjutavad ühte momendi perioodi positiivselt

ja teist negatiivselt. Katsetest järeldus, esimeses perioodis nõrgemate omadustega magnetite puhul tekib suurem moment, kuid teisel perioodil vastupidi väiksem moment.

Ühes katses testiti konstruktsiooni, kui rootoris oli kasutusel 4 püsomagnetit, ehk pooled magnetid olid eemaldatud. Katse tulemused olid sarnased eelnevalt mainitud katsele, ehk esimesel perioodil tekib ühe magnetiga konstruktsiooni puhul suurem maksimaalne moment ja teisel perioodil tekib kahe magnetiga konstruktsiooni puhul suurem moment.

Tulles magnetite mõju juurde tagasi, testiti masinat juhtudel, kui magnetid olid ühel juhul eemaldatud ning teisel juhul kasutusel. Selgus, et NdFeB 32 magnetid on kasutusel, siis esimesel perioodil väheneb maksimaalne moment 16,57 % ja teisel perioodil suureneb 4,71 %. Sagedusspekter näitas, et püsomagnetid momendi pulseerimisele erilist mõju ei avaldanud, sest kõrgemad harmoonilised jäid samasse suurusjärku. Kui püsimagneteid ei ole kasutusel, siis on mõlemas perioodis maksimaalne moment samas suurusjärgus. Lisaks selgus, et magnetid nihutavad ka momendikõveras nullpunkte. Kui magnetid on eemaldatud, siis on momendikõveras nullpunktid paigutatud nii, et mõlemad perioodid on ühe pikkused. Kui lisada magnetid, siis nihkuvad nullpunktid nii, et üks periood muutub kitsamaks ja teine periood laiemaks. Tehtud katses selgus, et magnetitega konstruktsioonis oli perioodide pikkuste suhe selline, et üks periood moodustas 44,72 % ja teine 55,28 %, kui kaks perioodi kokku arvestatuna on 100 %. Nullpunktide nihkumise tagajärjel tekib momendi- nurgatunnusjoone gaafikus ka erineva kiirusega momendi tõus. Järeldus, et ühel perioodil tõuseb moment kiiremini ilma magnetiteta konstruktsiooni juures ning teisel perioodil on vastupidi, ehk magnetitega konstruktsiooni juures tekib kiirem momendi tõus. Järgmises tabelis 5.6 on esitatud tähtsaimad muutused, mis tekkisid masina rootoris püsिमagnetite kasutuselevõttuga.

Tabel 5.6. Püsिमagnetite mõju masina momendile

Parameeter	Püsिमagnetitega		Ilma püsिमagnetiteta	
	1. Perioodis	2. Perioodis	1. Perioodis	2. Perioodis
Maksimaalne moment	Väheneb	Suureneb	Võrdne	
Momendi pulseerimine	Säilib		Säilib	
Perioodi pikkus	Lüheneb	Pikeneb	Võrdsed	
Momendi tõusukiirus	Aeglustub	Kiireneb	Jääb samaks	

Momendi suureks mõjutajaks on magnetvoo tõkendid. Sellepärast viidi läbi erinevaid katseid, milles esimeses testiti sarnaseid konstruktsioone. Ühel juhul olid tõkendite lõpud kumerad ja teisel sirged. Järeldusena võib väita, et kumeraid tõkendi lõppe pole otstarbekas kasutada, sest maksimaalsele momendile silmmärgatavat mõju ei tekkinud, ning ka momendi pulseerimine jäi sarnaseks. Kumeraid tõkendi lõppe on tööstuses kindlasti palju raskem stantsida ning sellest tulenevalt võib kasutada sirgeid tõkendi lõppe.

Ühe katsena testiti magnetvoo tõkendite laiuse mõju tangentsiaalsuunas. Radiaalsuunas ei olnud võimalik testi läbi viia, sest katsete alguses pandi paika püsिमagnetite kindel asetsemine ja mõõtmed. Katsetest selgus, et kui magnetvoo tõkendid laiemaks muuta, siis hakkab momendi pulseerimine suurenema, seega pole otstarbekas magnetvoo tõkendeid liiga laiaks teha. Lisaks vähenes laiemate magnetvoo tõkenditega ka maksimaalne moment.

Viimase katsena testiti magnetvoo tõkendite paiknemist nelja erineva konstruktsiooniga, mis on näidatud joonisel 5.25. Katsetest selgus, et kõige parema tulemuse andis konstruktsioon number 2. Katsetest selgus, et momendi pulseerimine hakkab suurenema, kui rootori kahe pooluse magnetvoo tõkendid üksteisest liiga kaugele või liiga lähedale viia. Seega olid kõige paremad tõkendi positsioonid konstruktsioonides 2 ja 3.

Ühes katses uuriti, millise mõju annab magnetvoo tõkendite kumeraks muutmine, sest enamus katseid viidi läbi sirgete tõkenditega. Katsete konstruktsioonide näited on joonisel 5.28. Tulemustest järeldus, et tõkendite kumeraks muutmine ei mõjutanud silmmärgatavalt masina momenti, seega võib kasutada sirgeid tõkendeid, sest neid on lihtsam tööstuses valmistada.

## 6. KOKKUVÕTE

Magistritöö eesmärk oli uurida teoreetilist tausta püsिमagnetitega reluktantsmasina kohta, teha masinale konstruktsiooni valik ning modelleerida masinat tarkvaradega Matlab ja FEMM. Reluktantsmasina modelleerimine nõudis teoreetilist ettevalmistust, seda uuriti lugedes erinevaid teadusartikleid ja õpikuid. Lõputöö sisus on kirja pandud masina teoreetiline taust. See hõlmas endas reluktantsmomendi olemuse lahti seletamist, ehk selgitust, kuidas tekib reluktantsmoment. Peale seda on kirjutatud reluktantsmasina põhilistest komponentidest, milleks on magnetvoo tõkendid, püsिमagnetid ja ribad. Lisaks ka välja toodud erinevaid eksisteerivaid püsिमagnetitega rootori disaini ja lõpuks räägitud reluktantsmasina arengust. Peale selle toodi välja püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasina eeliseid ja puudusi teiste olemasolevate masinate ees ja võimalikke rakendusi, kus masinat võib kasutada.

Modelleerimine eeldas staatori ja rootori valikut. Staatori osas oli valik lihtne, sest kasutusele võeti asünkroonmasina staator, mille põhiandmed on tabelis 4.1. Staatori põhiline omapära on, et tegemist on kahe kihilise staatoriga, mis tähendab, et kõik 36 uuret on jaotatud võrdse pindalaga osadeks, millest mõlemad osad moodustavad eraldi kihi, nagu joonisel 4.1 näidatud. Rootori valikul lähtuti olemasolevast kirjandusest. Rootori konstruktsiooni uurimine oli põhieesmärk. Rootori põhiparameetrid on toodud tabelis 4.2. Lihtsalt kokku võttes on rootor nelja pooluseline, kus iga pooluse kohta on 3 magnetvoo tõkendit, kaks püsिमagnetit, 6 tangentsiaalribi ja 5 radiaalribi.

Teinud staatori ja rootori valiku kindlaks, alustati masina modelleerimiskatsetega. Modelleerimiskatsed tuli automatiseerida, et neid oleks võimalik läbi viia. Selle jaoks koostati programmikood, mis on toodud ära lisa 1. Programmikoodi koostamisel olid kõige raskemad asjaolud Matlabi käskude tundma õppimine ja OctaveFemm käskude selgeks õppimine.

Modelleerimistulemused on esitatud peatükis 5 ja nende kokkuvõte alampeatükis 5.4. Kõikide katsete eesmärk oli teada saada, kuidas rootori disaini muutused mõjuvad masina momendile ja selle pulseerimisele. Modelleerimiskatsed hõlmasid endas järgmisi uurimisvaldkondi. Esimese kahe katsega testiti tangentsiaal- ja radiaalribide mõju masinale. Uuriti, kuidas nende paksus mõjutab masina momenti. Kokkuvõtte ribide mõjust masinale on esitatud tabelis 5.5.



Peale ribide uuriti ka püsिमagnetite mõju masinale. Katsetulemusi tehti mitmeid. Need hõlmasid endas katseid, kus rootori ühe pooluse kohta oli kasutusel 1 või 2 püsिमagnetit ning katse, kus kõik magnetid olid eemaldatud. Püsिमagnetite mõju masinale on kokku võetud tabelis 5.6.

Viimases katses uuriti magnetvoo tõkendite mõju masinale. Kõigepealt uuriti kuidas mõjutab masina momenti tõkendi lõppude kumeraks tegemine või sirgeks jätmine. Tulemusena selgus, et tõkendite lõpud võib sirgeks jätta, sest kumeraks tegemine erilist võitu ei andnud masina momendi suhtes. Katsetati veel erinevaid magnetvoo tõkendite laiusi. Tõkendite laiust muudeti tangentsiaalsuunas ja tulemused on eelnevas peatükis 5.4 kokku võetud. Üks katse teostati sirgete ja kumerate magnetvoo tõkenditega, millest selgus, et sirged tõkendid õigustavad ennast ja tõkendeid ei pea kumeraks tegema.

Katsete analüüsimiseks tehti lisaks momendi- nurgatunnusjoone graafikutele ka Fourier'i teisendused, et kontrollida katsetulemusi ja näha millised harmoonilised mõjutavad momendi pulseerimist. Fourier'i teisenduste abil saadud sagedusspektrid on esitatud peatükis 5.3 tehtud katsete juures.

Katsetulemused tõestasid, et olemasolevad teadusartiklid ja õpikud sisaldavad õiget informatsiooni. Lisaks õpetas antud lõputöö püsिमagnetitega sünkroonreluktantsmasinat palju rohkem tundma ja äratas huvi selle uurimise vastu. Programmikoodi kirjutamine oli väga arendav kogu lõputöö vältel. Tänu lõputöö kirjutamisele sai autor väga hea ülevaate programmidest Matlab ja FEMM. Terve masina modelleerimiskatsed viidi läbi programmis Matlab.

Hinnang töö tulemustele on autori poolt hea, sest uuriti palju erinevaid rootori konstruktsioone ja läbi viidi palju katseid, mis kestsid mitmeid öid. Katsete tulemused on väga realistlikud, sest lähevad kokku teiste uurimustega. Töö tegemisel lahendamisele kuulunud ülesanded sai täidetud.

Antud lõputöös uuriti mitmeid rootori konstruktsioone, kuid tulevikus on veel uurida väga palju. Järgmiseks uurimissuunaks võib- olla näiteks magnetvoo tõkendite arvu mõju, magnetite suuruse ja kuju mõju ning ka nende paiknemine, rootori pooluste arvu mõju ja staatori uurete arvu mõju masinale.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. Belahcen, A. Type of Machines // Elektrimasinate Raalprojekteerimise loenguslaidid (2012), lk 77...84.
2. Bianchi N; Bolognani S; Bon D; Michele D, Rotor Flux-Barrier Design for Torque Ripple Reduction in Synchronous Reluctance and PM-Assisted Synchronous Reluctance Motors, IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, lk 921...928.
3. Tsung Liu C; Chang B; Hung K-Y; Lin S-Y, Cutting and Punching Impacts on Laminated Electromagnetic Steels to the Designs and Operations of Synchronous Reluctance Motors, National Sun Yat-Sen University – Taiwan, 2014, lk. 1...6.
4. Martins C. E. G; P. Kuo-Peng; N. Sadowski, Design of Synchronous Reluctance Motors With Flux Barriers Using 2D-FEM, WEG Industries S.A. -Motors Division – Brasiilia, 2003, lk 1669...1674.
5. Kallaste, A; Vaimann, T; Belahcen, A. Design of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine. Electric Power Engineering (EPE), Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on, IEEE conference publications, 2014, – lk. 1...4.
6. Pyrhönen, J; Jokinen, T; Hrabovcova, V; Design of Rotating Electrical Machines Second Edition – United Kingdom: John Wiley & Sons, 2014, – lk 388...474.
7. Niazi, P. Permanent magnet assisted synchronous reluctance motor Design and performance improvement, Texas A&M University, 2005, – lk. 4...16.
8. Khan, K, S; Design of a Permanent-Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine for a Plug-In Hybrid Electric Vehicle, Electrical Machines and Power Electronics School of Electrical Engineering, Sweden 2011, – lk 1...7; 33...36.
9. Vartanian, R; Tolyat, H. Design and Comparison of an Optimized Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor (Pma-SynRM) with an Induction Motor with Identical NEMA Frame Stators, Texas A&M University – Texas, 2009, – 107...112.
10. Ferrari, M; Bianchi, N; Fornasiero, E, Analysis of Rotor Saturation in Synchronous Reluctance and PM Assisted Reluctance Motors, IEEE, 2013, – lk 1...9.
11. Vimalakeerthy, D; Kanagaraj, N; Sanavullah, M.Y, Permanent Magnet Synchronous Reluctance Motor Design Enhancement Using Finite Element Method, AVS Engineering College, 2012, – lk 114...120.

12. Vartanian, R; Deshpande, Y; Toliyat, H. A, Performance Analysis of a Rare Earth Magnet Based NEMA Frame Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine with Different Magnet Type and Quantity, IEEE, 2013, – lk 476...483.
13. Popescu, M; Dorell, D.G; Ionel, D;Cossar, C. Single and Double Layer Windings in Fractional Slot per Pole PM Machines, University of Glaskow – UK, IEEE, 2008, – 2055...2060.
14. Ichinokura, O; Ono, T; Takahashi, A; Nakamura, K; Watanabe, T. Three-Phase Reluctance Generator with Permanent Magnets Buried in Stator Core, Tohoku University – Jaapan, IEEE, 2006, – 1032...1036.
15. Howard. E; Kamper M. J; Gerber. S. Flux Barrier and Skew Design Optimisation of Reluctance Synchronous Machines, koostatud ABB AS korporatisooni poolt – Rootsi, IEEE, 2014, – 1186...1192.
16. Kallaste, A. Aktsiaalvooga püsimagnetitega toroidmähisega generaator. Magistritöö. – Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli elektrotehnika aluste ja elektrimasinate instituut, 2006. – 15...17.
17. Finite Element Method Magnetics / Versioon: 4.2: User Manual, 2013. – 1...160.
18. Finite Element method Magnetics: OctaveFEMM / Versioon 1.2: User Manual, 2013. – 1...61.
19. Bianchi, N. Electrical Machine Analysis Using Finite Elements – United States of America: Taylor & Francis Group, 2005, – lk 25...59.

## Modelleerimiskatsete läbiviimiseks koostatud programmikood

```

clear all
close all
clc %clears Command Window display, giving you a "clean screen."
disp('Ragnar Johanson; 2015')
disp('PM Assist Synchronous Machine'); %Display text or array
q=4; %number of rotor poles
    %Input variables
delta_WT = 360; % current position angle step (degrees)(360 = 1; 1=360 steps)
    %Installation and startup
    % Start up and connect to FEMM
addpath('C:/femm42/mfiles');
openfemm %To start octaveFEMM session, then openfemm function is used to start up
FEMM

current=2;
IRMS=18/current; % Current rms value
Step=2; %stator electrical rotation step, it's 4 times smaller in real life
    % Electrical rotation angle, 180 means 45 and etc.
    % Real angle is 4 times smaller than inserted, if 180- its 45
Angle=380; %Total angle the stator will be eelectrically rotated
X = fprintf('Total Number of loops - %d \n',Angle/Step);
tic
for ST=1:(Angle/Step) %Number of loops for stator rotational position, 0
    % Create a new magnetostatics problem, 0 means magnetics problem
newdocument(0)
    % Set problem parameters
    % mi_probdef(freq Hz,units,type,precision,depth,minangle,(acsolver))
mi_probdef(0, 'millimeters', 'planar', 1.e-8, 200, 30);

for WT_step = 1 : (360 / delta_WT); %numbe of loops for current position change
    % Current angle in rad (transformation)
WT=pi/4-pi/180 * (delta_WT * (WT_step-1)) ;
    % Set number of turns
NT=20;
    % Phase currents
IA=IRMS*sqrt(2)*sin(WT);
IB=IRMS*sqrt(2)*sin(WT+2/3*pi);
IC=IRMS*sqrt(2)*sin(WT+2/3*2*pi);
IX=-IA;
IY=-IB;
IZ=-IC;
    % Add materials from library ( In FEMM)

```

```

mi_getmaterial('NdFeB 52 MGOe');
mi_getmaterial('SmCo 27 MGOe')
mi_getmaterial('SmCo 24 MGOe')
mi_getmaterial('M-19 Steel');
mi_getmaterial('416 Stainless Steel');
mi_getmaterial('Air');
mi_getmaterial('NdFeB 32 MGOe');
mi_addboundprop('outer', 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
mi_getmaterial('10 AWG');
    %Adding new circuits (circuitname, current, )
mi_addcircprop('A', IA, 1); %1 means it is in series not parallel
mi_addcircprop('B', IB, 1);
mi_addcircprop('C', IC, 1);
mi_addcircprop('X', IX, 1);
mi_addcircprop('Y', IY, 1);
mi_addcircprop('Z', IZ, 1);
    %rotor diameters and airgap width
D11=25; %rotor inner diameter
D12=124; %rotor outer diameter
G11=0.5; %airgap
    % slot dimensions, B11-opening, B12-lower width, B13-higher width, H1-total
    % high, H11-foot high, H13-staight high, H14-cil seperation high,
B11=2; B12=6; B13=7.5; H10=22; H11=1; H13=16; H14=10.05;
NS=36; %number of slots
    %Slot point radius and angle, kus raadius on 0 punkti suhtes
SR1=D12/2+G11; %half rotor inner diam.+aircap
SR2=D12/2+G11+H11; %+foot high
SR3=D12/2+G11+(H10-B13/2-H13);%total high-higher width-staight hiht
SR4=D12/2+G11+H10-B13/2;%+total high -higher width/2
SR5=D12/2+G11+H10-B13/2-H13+H14;%H14- coil separation high
    %Slot points shifted by angle
SR1A=atan(B11/2/SR1);%opening/2
SR2A=atan(B11/2/SR2);
SR3A=atan(B12/2/SR3);
SR4A=atan(B13/2/SR4);
SR5A=(SR4A-SR3A)*H14/H13+SR4A;
    % magnet radial legth and cicumferential width (mm)
th=pi/2;% angle for rotating slots and other things 90 deg.

    %Magnets
    %X1, X2 and X3 are magnet location, from point (0,0)
X1=51; %in mm, 48
X2=38; %in mm, 36
X3=24; % Inner flux barrier rec. parts position from point (0,0) 24
H0=6; %1. magnet high, same as flux barrier
H10=6;%2. magnet high, same as flux barrier
H20=6;%barrier rec. high same as flux barrier

```

```

%Magnet width
W1= 5; %In real life, it means width is 2*W1
W2= 5; %In real life, it means width is 2*W2
%Dwaring 2 magnets in upper position
mi_drawrectangle(-W1,X1,W1,X1-H0);
mi_drawrectangle(-W2,X2,W2,X2-H10);
%Rectangular part of flux barriers that are near to magnets
Rib=0.5; %Rib width between magnet and Flux barrier rec. part 0,5
W3=0.5; %Flux barrier rec. part width W3 , upper
W4=1; %Flux barrier rec. part width W4, lower
W5=6.25+0; %Inner flux barrier rec. parts width
Rib1=0.25; %Middle rib width, real value is 2*Rib1
LC=0; %Line lenght near barrier rec. parts.
%Drawing rec. parts of flux barrier, in upper side
mi_drawrectangle(-W1-W3-Rib,X1,-W1-Rib,X1-H0);
mi_drawrectangle(W1+Rib,X1,W1+W3+Rib,X1-H0);
mi_drawrectangle(-W2-W4-Rib,X2,-W2-Rib,X2-H10);
mi_drawrectangle(W2+Rib,X2,W2+W4+Rib,X2-H10);
%Rectangular parts additional lines
mi_drawline(-W1-W3-Rib,X1-H0,-W1-W3-Rib-LC,X1-H0);
mi_drawline(-W2-W4-Rib,X2-H10,-W2-W4-Rib-LC,X2-H10);
mi_drawline(W1+W3+Rib,X1-H0,W1+W3+Rib+LC,X1-H0);
mi_drawline(W2+W4+Rib,X2-H10,W2+W4+Rib+LC,X2-H10);
%Nearest rom the shaft
mi_drawline(-W5-Rib1,X3-H20,-W5-Rib1-LC,X3-H20);
mi_drawline(W5+Rib1,X3-H20,W5+Rib1+LC,X3-H20);
%drawing inner barrier rec. parts, in upper side
mi_drawrectangle(-W5-Rib1,X3,-Rib1,X3-H20);
mi_drawrectangle(Rib1,X3,W5+Rib1,X3-H20);
%Flux barriers tip points and arc's lines and etc.
%Barriers tip points shift degrees
A= 45/5.3; %Rotation degree in celcius
B= A*2+2.9;
C=A*3.35; %;
D=4.3; %Tipu laius, see on nurk nende kahe tipu punkti vahel
BRC=0.01; % Barrier arc. radius changes, ~0 means no radius
TIP1=0.01; %It's the arc tip radius
Y1=58.5; %Barrier tip point position from (0,0)
A1=0.5*pi+(A+2.6)*pi/180; %nurk, mille võrra keerame tipu punkti, radians
B1=0.5*pi+B*pi/180; %0,5*pi on 90 kraadi radiaanides
C1=0.5*pi+C*pi/180;
D1=D*pi/180;
% Rotation matrix'es
ROT1=[cos(A1),-sin(A1);sin(A1),cos(A1)]; %It's rotation matrix
ROT2=[cos(B1),-sin(B1);sin(B1),cos(B1)];
ROT3=[cos(C1),-sin(C1);sin(C1),cos(C1)];
ROT4=[cos(A1+D1),-sin(A1+D1);sin(A1+D1),cos(A1+D1)];

```

```

ROT5=[cos(B1+D1),-sin(B1+D1);sin(B1+D1),cos(B1+D1)];
ROT6=[cos(C1+D1),-sin(C1+D1);sin(C1+D1),cos(C1+D1)];
T1=[Y1;0]; %Tip points starting position befor rotation
%Outer barrier arc parts
O1=ROT1*T1;
O2=ROT2*T1;
O3=ROT3*T1;
O4=ROT4*T1;
O5=ROT5*T1;
O6=ROT6*T1;
% Left side barrier arc tips etc.
mi_drawarc(O1(1),O1(2),-W1-W3-Rib,X1,BRC,1);%kumerus teha muutujaga
mi_drawarc(O2(1),O2(2), -W2-W4-Rib,X2 ,BRC,1);
mi_drawarc(O3(1),O3(2), -W5-Rib1,X3 ,BRC,1);
mi_drawarc(O4(1),O4(2),-W1-W3-Rib-LC,X1-H0,BRC,1);%tökendi kumerus teha muutujaga
mi_drawarc(O5(1),O5(2), -W2-W4-Rib-LC,X2-H10 ,BRC,1);
mi_drawarc(O6(1),O6(2), -W5-Rib1-LC,X3-H20 ,BRC,1);
%Flux barriers end tip arcs, left side
mi_drawarc(O1(1),O1(2),O4(1),O4(2),TIP1,1);
mi_drawarc(O2(1),O2(2),O5(1),O5(2),TIP1,1);
mi_drawarc(O3(1),O3(2),O6(1),O6(2),TIP1,1);
%drawing rotor barriers, right arc parts
mi_drawarc(W1+W3+Rib,X1,-O1(1),O1(2),BRC,1);
mi_drawarc(W2+W4+Rib,X2, -O2(1),O2(2) ,BRC,1);
mi_drawarc(+W5+Rib1,X3, -O3(1),O3(2) ,BRC,1);
mi_drawarc(+W1+W3+Rib+LC,X1-H0,-O4(1),O4(2),BRC,1);
mi_drawarc(+W2+W4+Rib+LC,X2-H10, -O5(1),O5(2) ,BRC,1);
mi_drawarc(+W5+Rib1+LC,X3-H20, -O6(1),O6(2) ,BRC,1);
%Flux barriers end tip arcs, right side
mi_drawarc(-O4(1),O4(2),-O1(1),O1(2),TIP1,1);
mi_drawarc(-O5(1),O5(2),-O2(1),O2(2),TIP1,1);
mi_drawarc(-O6(1),O6(2),-O3(1),O3(2),TIP1,1);
mi_clearselected;
%Now we are rotating rotor parts, so we have 4 pole machine
mi_selectcircle(0,0,61.6,1); %select rec. parts that we are rotating
mi_copyrotate2(0,0,90,3,1); % simple copyrotate function to rec. parts
mi_selectcircle(0,0,61.6,3); %select arc lines that we are rotating
mi_copyrotate2(0,0,90,4,3); % Copyrotate arc lines (flux barrier)
% Giving material for magnets
for i=1:q
R=[cos((i-1)*th) -sin((i-1)*th); sin((i-1)*th) cos((i-1)*th)];
H10= [-W1+2;X1-2];
H20= [-W2+2;X2-2];
pm1=R*H10;
pm2=R*H20;
switch i %Switches between magnets, because magnet direction is different
case 1 %Upper magnets

```

```

mi_addblocklabel(pm1(1),pm1(2))
mi_selectlabel(pm1(1),pm1(2));
% mi_setblockprop('NdFeB 52 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90), 4+2*i-1, 0);
% mi_setblockprop('M-19 Steel', 1, 0, '<None>', 0, 4, 0);
% mi_setblockprop('SmCo 27 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90), 4+2*i-1, 0);
mi_setblockprop('NdFeB 32 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90), 4+2*i-1, 0);
% mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);
% mi_setblockprop('SmCo 24 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90), 4+2*i-1, 0);
mi_clearselected
mi_addblocklabel(pm2(1),pm2(2))
mi_selectlabel(pm2(1),pm2(2));
% mi_setblockprop('NdFeB 52 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90), 4+2*i, 0);
% mi_setblockprop('M-19 Steel', 1, 0, '<None>', 0, 4, 0);
% mi_setblockprop('SmCo 27 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90), 4+2*i, 0);
mi_setblockprop('NdFeB 32 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90), 4+2*i, 0);
% mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);
% mi_setblockprop('SmCo 24 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90), 4+2*i, 0);
mi_clearselected
case 2 %Left side magnets
mi_addblocklabel(pm1(1),pm1(2))
mi_selectlabel(pm1(1),pm1(2));
% mi_setblockprop('NdFeB 52 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90+180), 4+2*i-1, 0);
% mi_setblockprop('M-19 Steel', 1, 0, '<None>', 0, 4, 0);
% mi_setblockprop('SmCo 27 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90+180), 4+2*i-1, 0);
mi_setblockprop('NdFeB 32 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90+180), 4+2*i-1, 0);
% mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);
% mi_setblockprop('SmCo 24 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90+180), 4+2*i-1, 0);
mi_clearselected
mi_addblocklabel(pm2(1),pm2(2))
mi_selectlabel(pm2(1),pm2(2));
% mi_setblockprop('NdFeB 52 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90+180), 4+2*i, 0);
%mi_setblockprop('M-19 Steel', 1, 0, '<None>', 0, 4, 0);
% mi_setblockprop('SmCo 27 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90+180), 4+2*i, 0);
mi_setblockprop('NdFeB 32 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90+180), 4+2*i, 0);
% mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);
% mi_setblockprop('SmCo 24 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90+180), 4+2*i, 0);
mi_clearselected
case 3 %Bottom magnets
mi_addblocklabel(pm1(1),pm1(2))
mi_selectlabel(pm1(1),pm1(2));
% mi_setblockprop('NdFeB 52 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90), 4+2*i-1, 0);
% mi_setblockprop('M-19 Steel', 1, 0, '<None>', 0, 4, 0);
% mi_setblockprop('SmCo 27 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90), 4+2*i-1, 0);
mi_setblockprop('NdFeB 32 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90), 4+2*i-1, 0);
% mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);
% mi_setblockprop('SmCo 24 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90), 4+2*i-1, 0);
mi_clearselected

```



```

mi_addblocklabel(pm2(1),pm2(2))
mi_selectlabel(pm2(1),pm2(2));
% mi_setblockprop('NdFeB 52 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90), 4+2*i, 0);
% mi_setblockprop('M-19 Steel', 1, 0, '<None>', 0, 4, 0);
% mi_setblockprop('SmCo 27 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90), 4+2*i, 0);
mi_setblockprop('NdFeB 32 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90), 4+2*i, 0);
% mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);
% mi_setblockprop('SmCo 24 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90), 4+2*i, 0);
mi_clearselected
    case 4 %Right side magnets
mi_addblocklabel(pm1(1),pm1(2))
mi_selectlabel(pm1(1),pm1(2));
% mi_setblockprop('NdFeB 52 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90+180), 4+2*i-1, 0);
% mi_setblockprop('M-19 Steel', 1, 0, '<None>', 0, 4, 0);
% mi_setblockprop('SmCo 27 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90+180), 4+2*i-1, 0);
mi_setblockprop('NdFeB 32 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90+180), 4+2*i-1, 0);
% mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);
% mi_setblockprop('SmCo 24 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90+180), 4+2*i-1, 0);
mi_clearselected
mi_addblocklabel(pm2(1),pm2(2))
mi_selectlabel(pm2(1),pm2(2));
% mi_setblockprop('NdFeB 52 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90+180), 4+2*i, 0);
% mi_setblockprop('M-19 Steel', 1, 0, '<None>', 0, 4, 0);
% mi_setblockprop('SmCo 27 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90+180), 4+2*i, 0);
mi_setblockprop('NdFeB 32 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90+180), 4+2*i, 0);
% mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);
% mi_setblockprop('SmCo 24 MGOe', 1, 0, '<None>', ((i-1)*90+90+180), 4+2*i, 0);
mi_clearselected
    end
end

```

```

% Giving material to flux barriers air parts

```

```

mi_addblocklabel(-W5+0.3-Rib1/2,X3-1)
mi_selectlabel(-W5+0.3-Rib1/2,X3-1); mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);
mi_addblocklabel(-W1-W3/2-Rib,X1-1)
mi_selectlabel(-W1-W3/2-Rib,X1-1); mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);
mi_addblocklabel(-W2-W4/2-Rib,X2-1)
mi_selectlabel(-W2-W4/2-Rib,X2-1); mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);

```

```

mi_addblocklabel(-W5-2-Rib1/2,X3-1)
mi_selectlabel(-W5-2-Rib1/2,X3-1); mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);
mi_addblocklabel(-W1-W3-1-Rib,X1-1)
mi_selectlabel(-W1-W3-1-Rib,X1-1); mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);
mi_addblocklabel(-W2-W4-1-Rib,X2-1)
mi_selectlabel(-W2-W4-1-Rib,X2-1); mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);

```

```

mi_addblocklabel(W5-0.5+Rib1/2,X3-1)

```

```

mi_selectlabel(W5-0.5+Rib1/2,X3-1); mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);
mi_addblocklabel(W1+W3/2+Rib,X1-1)
mi_selectlabel(W1+W3/2+Rib,X1-1); mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);
mi_addblocklabel(W2+W4/2+Rib,X2-1)
mi_selectlabel(W2+W4/2+Rib,X2-1); mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);

mi_addblocklabel(W5+2+Rib1/2,X3-1)
mi_selectlabel(W5+2+Rib1/2,X3-1); mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);
mi_addblocklabel(W1+W3+1+Rib,X1-1)
mi_selectlabel(W1+W3+1+Rib,X1-1); mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);
mi_addblocklabel(W2+W4+1+Rib,X2-1)
mi_selectlabel(W2+W4+1+Rib,X2-1); mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);
    % Copyng and rotating materials, because we have 4 pole machine
mi_copyrotate2(0,0,90,3,2);
    mi_clearselected
    %rotor inner and outer edges
mi_drawarc(0,12.5,0,-12.5,180,1); %shaft
mi_drawarc(0,-12.5,0,12.5,180,1);
mi_drawarc(0,62,0,-62,180,1);
mi_drawarc(0,-62,0,62,180,1);
    % rotor material
mi_addblocklabel(0,60);
mi_selectlabel(0,60);
mi_setblockprop('M-19 Steel', 1, 0, '<None>', 0, 4, 0);
mi_clearselected
    % shaft material
mi_addblocklabel(-10,2);
mi_selectlabel(-10,2);
mi_setblockprop('416 Stainless Steel', 1, 0, '<None>', 0, 4, 0);
mi_clearselected
    %Airgap, giving material AIR
mi_addblocklabel(0,62.25);
mi_selectlabel(0,62.25);
mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);
mi_clearselected
    % Stator inner and outer edges
    for i=1:NS;
k=i*360/NS+(ST-0)*Step/q-Step/q-9.103+45;
mi_drawarc(SR1*cos((SR1A)-pi/2-k*pi/180),-SR1*sin((SR1A)-pi/2-k*pi/180)...
    ,SR1*cos((SR1A)-pi/2-(k+180)*pi/180),-SR1*sin((SR1A)-pi/2-(k+180)*pi/180),180,1);
mi_drawarc(SR1*cos((SR1A)-pi/2-(k+180)*pi/180),-SR1*sin((SR1A)-pi/2-(k+180)*pi/180)...
    ,SR1*cos((SR1A)-pi/2-k*pi/180),-SR1*sin((SR1A)-pi/2-k*pi/180),180,1);
    end
mi_drawarc(0,105,0,-105,180,1); %Stator outer arc
mi_drawarc(0,-105,0,105,180,1) %Stator outer arc
% Giving material to stator
mi_addblocklabel(0,103);

```

```

mi_selectlabel(0,103);
mi_setblockprop('M-19 Steel', 1, 0, '<None>', 0, 4, 0);
mi_clearselected
% Setting Boundary conditions
mi_selectarcsegment(-105,0); %selecting arc
mi_selectarcsegment(105,0); %selecting arc
mi_setarcsegmentprop(3,'outer', 0, 6);
mi_clearselected
for i=1:NS; %NS- number of slots
    %Step/q, because we have to rotate it in electrical degrees not
    %mechanically
    k=i*360/NS+(ST)*Step/q-Step/q-9.103+45; %before + sign, there is slot and after that
    comes additional rotation degrees
    %ST/Step is main rotating for geting analyses
    %Doing slots upper arcs
    mi_drawarc(SR4*cos((SR4A)-pi/2-k*pi/180),-SR4*sin((SR4A)-pi/2-k*pi/180)...
        ,SR4*cos((SR4A)+pi/2+k*pi/180),SR4*sin((SR4A)+pi/2+k*pi/180),180,5);
    %Drawing all slot lines
    mi_drawline(SR1*cos((SR1A)-pi/2-k*pi/180),-SR1*sin((SR1A)-pi/2-k*pi/180)...
        ,SR2*cos((SR2A)-pi/2-k*pi/180),-SR2*sin((SR2A)-pi/2-k*pi/180));
    mi_drawline(SR2*cos((SR2A)-pi/2-k*pi/180),-SR2*sin((SR2A)-pi/2-k*pi/180)...
        ,SR3*cos((SR3A)-pi/2-k*pi/180),-SR3*sin((SR3A)-pi/2-k*pi/180));
    mi_drawline(SR3*cos((SR3A)-pi/2-k*pi/180),-SR3*sin((SR3A)-pi/2-k*pi/180)...
        ,SR4*cos((SR4A)-pi/2-k*pi/180),-SR4*sin((SR4A)-pi/2-k*pi/180));
    mi_drawline(-SR1*cos((SR1A)-pi/2+k*pi/180),-SR1*sin((SR1A)-pi/2+k*pi/180)...
        ,-SR2*cos((SR2A)-pi/2+k*pi/180),-SR2*sin((SR2A)-pi/2+k*pi/180));
    mi_drawline(-SR2*cos((SR2A)-pi/2+k*pi/180),-SR2*sin((SR2A)-pi/2+k*pi/180)...
        ,-SR3*cos((SR3A)-pi/2+k*pi/180),-SR3*sin((SR3A)-pi/2+k*pi/180));
    mi_drawline(-SR3*cos((SR3A)-pi/2+k*pi/180),-SR3*sin((SR3A)-pi/2+k*pi/180)...
        ,-SR4*cos((SR4A)-pi/2+k*pi/180),-SR4*sin((SR4A)-pi/2+k*pi/180));
    mi_drawline(SR3*cos((SR3A)-pi/2-k*pi/180),-SR3*sin((SR3A)-pi/2-k*pi/180)...
        ,-SR3*cos((SR3A)-pi/2+k*pi/180),-SR3*sin((SR3A)-pi/2+k*pi/180));
    mi_drawline(SR5*cos((SR5A)-pi/2-k*pi/180),-SR5*sin((SR5A)-pi/2-k*pi/180)...
        ,-SR5*cos((SR5A)-pi/2+k*pi/180),-SR5*sin((SR5A)-pi/2+k*pi/180));
    %deleting some unnecessary slot lines
    mi_selectnode (SR5*cos((SR5A)-pi/2-k*pi/180),-SR5*sin((SR5A)-pi/2-k*pi/180));
    mi_selectnode (-SR5*cos((SR5A)-pi/2+k*pi/180),-SR5*sin((SR5A)-pi/2+k*pi/180));
    % k*pi/180 adding degree every time, it's in radians
mi_deleteselectednodes;
    %deleting stator inner radius unneeded arcs
    mi_selectarcsegment(SR1*cos(-pi/2-k*pi/180),-SR1*sin(-pi/2-k*pi/180));
    mi_deleteselectedarcsegments;
% slot material, Inner coils
switch i
    case {1,2,3,19,20,21}
        mi_addblocklabel((SR3+3)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR3+3)*sin(-pi/2-k*pi/180));
        mi_selectlabel((SR3+1)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR3+1)*sin(-pi/2-k*pi/180));

```

```

mi_setblockprop('10 AWG', 1, 0, 'A', 0, 4, NT);
mi_clearselected
case {4,5,6,22,23,24}
mi_addblocklabel((SR3+3)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR3+3)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_selectlabel((SR3+1)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR3+1)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_setblockprop('10 AWG', 1, 0, 'Y', 0, 4, NT);
mi_clearselected
case {7,8,9,25,26,27}
mi_addblocklabel((SR3+3)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR3+3)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_selectlabel((SR3+1)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR3+1)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_setblockprop('10 AWG', 1, 0, 'C', 0, 4, NT);
mi_clearselected
case {10,11,12,28,29,30}
mi_addblocklabel((SR3+3)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR3+3)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_selectlabel((SR3+1)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR3+1)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_setblockprop('10 AWG', 1, 0, 'X', 0, 4, NT);
mi_clearselected
case {13,14,15,31,32,33}
mi_addblocklabel((SR3+3)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR3+3)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_selectlabel((SR3+1)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR3+1)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_setblockprop('10 AWG', 1, 0, 'B', 0, 4, NT);
mi_clearselected
case {16,17,18,34,35,36}
mi_addblocklabel((SR3+3)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR3+3)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_selectlabel((SR3+1)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR3+1)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_setblockprop('10 AWG', 1, 0, 'Z', 0, 4, NT);
mi_clearselected
end
% slot material, Outer coils
switch i
case {3,4,5,21,22,23}
mi_addblocklabel((SR4+1)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR4+1)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_selectlabel((SR4+1)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR4+1)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_setblockprop('10 AWG', 1, 0, 'A', 0, 4, NT);
mi_clearselected
case {6,7,8,24,25,26}
mi_addblocklabel((SR4+1)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR4+1)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_selectlabel((SR4+1)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR4+1)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_setblockprop('10 AWG', 1, 0, 'Y', 0, 4, NT);
mi_clearselected
case {9,10,11,27,28,29}
mi_addblocklabel((SR4+1)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR4+1)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_selectlabel((SR4+1)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR4+1)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_setblockprop('10 AWG', 1, 0, 'C', 0, 4, NT);
mi_clearselected
case {12,13,14,30,31,32}
mi_addblocklabel((SR4+1)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR4+1)*sin(-pi/2-k*pi/180));

```

```

mi_selectlabel((SR4+1)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR4+1)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_setblockprop('10 AWG', 1, 0, 'X', 0, 4, NT);
mi_clearselected
case {15,16,17,33,34,35}
mi_addblocklabel((SR4+1)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR4+1)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_selectlabel((SR4+1)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR4+1)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_setblockprop('10 AWG', 1, 0, 'B', 0, 4, NT);
mi_clearselected
case {1,2,18,19,20,36}
mi_addblocklabel((SR4+1)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR4+1)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_selectlabel((SR4+1)*cos(-pi/2-k*pi/180),-(SR4+1)*sin(-pi/2-k*pi/180));
mi_setblockprop('10 AWG', 1, 0, 'Z', 0, 4, NT);
mi_clearselected
end
end
main_maximize %maximizes the main FEMM window
mi_zoomnatural;
% Save the geometry to disk so we can analyze it
% mi_createmesh
% {
mi_saveas('PMSynchRel_ragnar.fem');
mi_analyze %runs the magnetic solver
mi_loadsolution(); %loads and displays the solution
%Selecting rotor and shaft before calculating torque
mo_selectblock(0,D11/2-2);
mo_selectblock(0,D12/2-2);
%Selecting magnets before calculating torque
% {
for i=1:4
R=[cos((i-1)*th) -sin((i-1)*th); sin((i-1)*th) cos((i-1)*th)];
H1= [-W1+2;X1-2];
H2= [-W2+2;X2-2];
pm1=R*H1;
pm2=R*H2;
mo_selectblock(pm1(1),pm1(2));
mo_selectblock(pm2(1),pm2(2));
end
% }

%Calculating block integral for the selected blocks
mo_blockintegral (22); %22 means torque
Joud(ST)=mo_blockintegral(22) %FEMM calculated it and now we take that value in use
% ST is giving the matrix length
plot (Joud,'-'); % ,'-*'
hold on
plot([0 Angle/Step],[0 0],'-k') %Printing horisontal line
grid on %Adding grid to graph

```

```
xlabel('Koormusnurk') % x-axis label
ylabel('Moment, [N*m]') % y-axis label
%title('Without magnets')
title('With current and magnets flux barrier arc tips testing ')
%}
end
%To know how much loops are done we print it:
X = fprintf('    Number of loops done - %d \n',ST);
end
toc    %Measuring total testing time
```