

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Elektrotehnika instituut

ATM70LT

Rait Kangro

**AEGLASEKÄIGULISE PÜSIMAGNETGENERAATORI
EKSTSENTRILISUSE UURIMINE**

Magistritöö

Instituudi direktorprof. Tõnu Lehtla

Juhendajadassistent Toomas Vaimann

.....teadur Ants Kallaste

LõpetajaRait Kangro

Tallinn 2014

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 litsenseeritud tarkvara abil.

Tallinn, 6.05.2014.a.

..... Rait Kangro

ATM70LT

Aeglasekäigulise püsomagnetgeneraatori ekstsentrilisuse uurimine

Rait Kangro, üliõpilaskood 111730AAAMM, mai 2014. – 55 lk.

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Energeetikateaduskond

Elektrotehnika instituut, elektrimasinate õppetool

Töö juhendaja: assistent Toomas Vaimann, teadur Ants Kallaste

Võtmesõnad: Ekstsentrilisus, püsomagnetid, NdFeB, sünkroongeneraator, tuulegeneraator,

Referaat:

Lõputöö on 55 lehel, sisaldab 3 tabelit ja 35 joonist

Lõputöö eesmärgiks on uurida püsomagnetgeneraatori ekstsentrilisust. Uurimise käigus koostati generaatori matemaatiline mudel ja viidi läbi katsetused uurdevaba aeglasekäigulise püsomagnetgeneraatoriga. Katsetused viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli elektrimasinate laboris.

Katsete käigus sooritati tühijooksu- ja koormuskatsed ning katsetused ekstsentrilistes olukordades. Tühijooksukatsel mõõdeti faasipingeid erinevatel pöörlemiskiirustel. Koormuskatsel mõõdeti faasipingeid ja –voolusid nimipöörlemiskiirusel erinevate koormuste korral. Erinevaid faase koormati võrdsetel aktiivkoormustel. Lisakatsena mõõdeti katseseadmes õhupilus olevat magnetvoogu.

Mõõtetulemusi on võrreldud arvutuste ja FEM analüüsi teel saadud tulemustega.

Ekstsentrilisus mõjutab generaatorit suurel määral. Tsentreerimata masina puhul indutseeritakse mähistes erinevad pinged ning faasipinge tõuseb. Ekstsentrilise rootori puhul esinevad lisajõud, mis põhjustavad generaatoris vibratsiooni ning võivad kahjustada masinat.

ATM70LT

Исследование эксцентricности тихоходного постоянно-магнитного генератора

Райт Кангро, код студента 111730АААММ, май 2014. – 55 стр.

ТАЛЛИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ * Энергетический факультет

Электротехнический институт

Кафедра электрических машин

Руководитель работы: ассистент Тоомас Вайманн, научный сотрудник Антс Калласте

Ключевые слова: Эксцентricность, постоянные магниты, NdFeB, синхронный генератор, ветряной генератор.

Реферат:

Дипломная работа содержит 55 листов, 3 таблицы и 33 рисунка.

Цель дипломной работы состоит в исследовании эксцентricности тихоходного постоянно-магнитного генератора. Во время исследования была составлена математическая модель генератора и проведены испытания с беззазорным тихоходным постоянно-магнитным генератором. Испытания проводились в лаборатории электрических машин Таллинского Технического Университета.

Во время испытаний оценивалась эксцентricность как в режиме холостого хода, так и под нагрузкой. Во время холостого хода: измерялись фазовые напряжения при разных скоростях вращения. Под нагрузкой: измерялись фазовые напряжения и токи при разных нагрузках на номинальной скорости вращения. Фазы нагружали равными активными нагрузками. Дополнительно измеряли магнитный поток в воздушном зазоре испытываемого устройства.

Результаты измерений сравнивали с расчетными и полученными путем анализа МКЭ. Эксцентricность влияет в большой степени на работу генератора.

В обмотках неотцентрованных машин индуцируется различное напряжение и фазовое напряжение растёт. В случае эксцентricности ротора возникают дополнительные силы, которые приводят к вибрации генератора и могут повредить машину.

ATM70LT

Eccentricity Analysis of Slow-Speed Permanent Magnet Generator

Rait Kangro, student code 111730AAAMM, May 2014. – 55 pages

TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY * Faculty of Power Engineering

Department of Electrical Engineering

Chair of Electrical Machines

Tutor of the work: assistant Toomas Vaimann, researcher Ants Kallaste

Key words: Eccentricity, permanent magnet, NdFeB, synchronous generator, wind generator

Summary:

A thesis is presented on 55 pages that includes 3 tables and 35 figures.

The purpose of the thesis is to investigate eccentricity in a slow-speed permanent magnet synchronous generator. During the investigation, a mathematical model of the generator was prepared and experiments were carried out on the prototype machine in the Tallinn University of Technology electrical machines laboratory.

No-load and load tests were performed on the prototype machine. Tests were also carried out in different eccentric situations. During no-load test phase voltages were measured at different rotating speeds. In load test phase voltages and currents were measured at rated speed with different loads where phases were loaded equally. Air gap magnetic flux in the generator was measured in an additional test.

The measured results are compared with calculations and FEM analysis results.

Eccentricity has a big effect on the generator. In the unbalanced machine different voltages are induced in the windings and phase voltages are significantly higher than in a healthy machine.

The eccentric rotor causes additional force and vibrations, which may damage the machine.

SISUKORD

Sisukord.....	6
Magistritöö ülesanne	8
1. Eessõna.....	9
2. Sissejuhatus	10
3. Ülevaade püsिमagnetmasinatest	12
3.1. Püsिमagnetmasinad	13
3.1.1. PM sünkroongeneraatorid jaotatud väljaergutuse järgi.....	14
4. Püsिमagnetmasinate kasutamine tuulikutes	15
4.1. Tuuleenergia kasutamise ajalugu.....	15
4.2. Tuulegeneraatorite kasutamine.....	16
4.3. Tuulegeneraatorite eritüübid.....	16
4.4. Püsिमagnetite kasutamine tuulegeneraatorites	18
5. Ülevaade NdFeB magnetitest.....	20
5.1. NdFeB magnetite avastamine ja tootmine.....	20
5.2. NdFeB magnetmaterjali eelised ja puudused	20
5.3. NdFeB magnetite kasutamine.....	22
6. Ekstsentrilisuse nähtus	23
6.1. Ekstsentrilisus	23
6.2. Ekstsentrilisuse eritüübid.....	23
7. Generaatori matemaatiline mudel	25
7.1. Magnetvälja analüüs	26
7.1.1. Magnetvoo arvutamine õhupilus.....	26
7.1.2. Magnetvälja arvutamine vektorpotentsiaali meetodil	28
7.1.3. Magnetvälja hindamine lõplike elementide meetodil	29
7.2. Elektrilised parameetrid ja väljundkarakteristikud.....	30
7.3. Simulatsioon programmis FEMM 4.2	33
8. Katsetulemused	36
8.1. Katseseade	36
8.2. Katsetuste kirjeldus.....	37
8.3. Katsetulemused.....	38
8.3.1. Magnetvoo mõõtmistulemused	38
8.3.2. Tühijooksu- ja koormuskatse tulemused.....	38

8.3.3.	Staatilise ekstsentrilisuse katsetulemused	40
8.3.4.	Dünaamilise ekstsentrilisuse katsetulemused.....	41
8.3.5.	Asümmeetrilise kaalujaotuse katsetulemused	42
9.	Katsetulemuste analüüs	44
9.1.	Magnetvoo analüüs	44
9.2.	Tühijooksu- ja koormuskatse analüüs	44
9.3.	Ekstsentrilisuskatsete analüüs.....	46
10.	Kokkuvõte	48
	Kasutatud kirjandus.....	50
Lisa 1	52

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Elektrotehnika instituut

KOOSKÕLASTATUD

Prof. T. Lehtla.....

..... 2014

MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

Rait Kangro üliõpilaskood 111730AAAMM

Magistritöö teema: Aeglasekäigulise püsिमagnetgeneraatori ekstsentrilisuse uurimine

Ülesanne: Uurida NdFeB püsिमagnetgeneraatoris esinevat ekstsentrilisust ja viia läbi katsed

Lähteandmed:

1. Eelnevalt tehtud uurimistöö samal teemal
2. Elektrimasinate ja magnetite erialane kirjandus
3. Katseseade

Lahendamisele kuuluvate probleemide loetelu:

1. Ülevaade püsिमagnetmasinatest
2. Ülevaade püsिमagnetmasinate kasutamisest tuulikutes
3. Ülevaade NdFeB magnetitest
4. Teoreetiline taust ekstsentrilisuse nähtusest
5. Masina katsetused laboris
6. Ekstsentrilisuse mõju analüüs ja võrdlus tsentreeritud masinaga

Magistritöö esitada eesti keeles kahes eksemplaris koos eesti- ja kahe võõrkeelse referaadiga hiljemalt 09.06.2014.

Juhendaja:

Ülesande vastu võtnud:

Assistent Toomas Vaimann

Üliõpilane Rait Kangro

1. EESSÕNA

Lõputöö teema on välja antud Tallinna Tehnikaülikooli energeetikateaduskonna elektrotehnika instituudi algatusel. Tööks vajalikud katsetused sooritati Tallinna Tehnikaülikooli elektrimasinate laboris katseseadmega, mis on valminud koostöös ettevõttega My!Wind Llc. Katsetusi aitas läbi viia ja laboris andmeid koguda kursusekaaslane Norman Korn. Juhendajad, assistent Toomas Vaimann ja teadur Ants Kallaste, abistasid konsultatsioonidega ning olid suureks abiks ja toeks töö valmimise jooksul.

2. SISSEJUHATUS

Uurimise all olev teema on valitud Tallinna Tehnikaülikooli ja My!Wind Llc. koostöös valminud tuulegeneraatori projektiga seoses.

Ühiskonna üha suureneva energiatarbimise tõttu on kasvanud vajadus kasutada alternatiivseid energiaallikaid. Üle maailma on paigaldatud tuulegeneraatorite koguvõimsus iga aastaga kasvanud. Suurem osa tuulegeneraatorite poolt toodetud energiast saadakse megavatt klassi tuulikute, kuid üha populaarsemaks on muutunud väiketuulikud, mis on jõukohased eraisikutele ja väikeettevõtetele. Väiketuulikute paigaldamine ja nende poolt toodetud energiahulk on iga aastaga kasvamas. Tuulikute populaarsuse tõttu arendatakse neid pidevalt ning üha enam kasutatakse generaatorites püsिमagnetid, mis võimaldavad toota kompaktsemaid ja võimsamaid seadmeid. Püsिमagnetgeneraatorite uurimisest ja projekteerimisest on avaldatud mitmeid töid [1], [2].

Käesolevas töös on uuritud siserooriga püsिमagnetgeneraatorit, mis on mõeldud kasutuseks tuulikus. Uuritud seadme eripäraks on see, et tegemist on aeglasekäigulise generaatoriga, millel puudub reduktor tiiviku ja generaatori vahel. Generaatori aeglane pöörlemiskiirus saavutatakse pooluspaaride suure arvuga, mille tõttu on uuritaval seadmeh suhteliselt suur raadius võrreldes tavapärase generaatoritega. Raadiusest tingituna kerkivad esile võimalikud probleemid ekstsentrilisusega ning masina jäikusega. Ekstsentrilisuse mõju suure raadiusega generaatorites on uuritud vähe. Võimsamate ja suuremate generaatorite puhul, kus esinevad suuremad jõud, on ekstsentrilisuse avastamine ja mõju uurimine eriti oluline.

Magistritöö eesmärgiks on uurida aeglasekäigulise püsिमagnetgeneraatori ekstsentrilisust tühijooksul ja selle mõju masinale ning väljundparameetritele. Lisaks püsिमagnetmasinate, NdFeB magnetite ja masinate tuulikutes kasutamise teoreetilise tausta uurimisele viia läbi eksperimendid katseseadmeh. Katsed sooritada tsentreeritud ja terve masinaga ning olukorras kus esineb rootori ekstsentrilisus. Töö lõpus tuua välja tulemused ja analüüsida ekstsentrilisuse mõju.

Antud töö on edasiarendus varemvalminud doktoritööst, mis käsitleb uuritud generaatori projekteerimist [3]. Sama seadme projekteerimisest ja katsetamisest on valminud mitu artiklit [4], [5].

Peatükis 3 tutvustatakse püsomagnetmasinaid, kirjeldatakse nendes kasutatud magnetite põhiparameetreid. Tutvustatakse masinates esinevaid rikkeid ja tuuakse välja rikete tekkepõhjuseid. Lisaks kirjeldatakse püsomagnetmasinate eritüüpe.

Peatükis 4 kirjeldatakse tuule kasutamist elektri tootmiseks. Tutvustatakse tuulegeneraatorite ajalugu ja levimist. Tuuakse välja tuuleturbiinide kasutamise hetkeseis ning kirjeldatakse tuulegeneraatorite tüüpe, nende eeliseid ja puudusi. Peatüki lõpus tuuakse välja püsomagnetite eelised tuulegeneraatoris kasutamisel.

Peatükis 5 tutvustatakse uuritavas seadmes kasutatud NdFeB magnetite ajalugu, tuuakse välja materjali eeliseid ja puudused ning kirjeldatakse magnetmaterjali kasutamist tänapäeva seadmetes ja tehnoloogias.

Elektrimasinates esinevat ekstsentrilisust kirjeldatakse 6. peatükis. Tuuakse välja ekstsentrilisuse eritüübid ja kirjeldatakse nende olemust.

Peatükis 7 koostatakse generaatori matemaatiline mudel. Masina projekteerimise viiest etapist (dimensioonide arvutamine, magnetvälja analüüs, elektriliste parameetrite arvutamine, väljundkarakteristikute arvutamine ja temperatuuriarvutus) on käsitletud kolme. Tehakse magnetvälja analüüs, mille käigus arvutatakse magnetvoog õhupilus. Arvutatakse masina elektrilised parameetrid ja väljundkarakteristikud. Lisaks leitakse programmi FEMM 4.2 abil tsentreeritud ja tsentreerimata masinas mõjuvad jõud.

Peatükis 8 tutvustatakse uurimise all olevat katseseadet ja kirjeldatakse katsetuste läbiviimist. Tuuakse välja katsetulemused ja esitatakse need graafikutel.

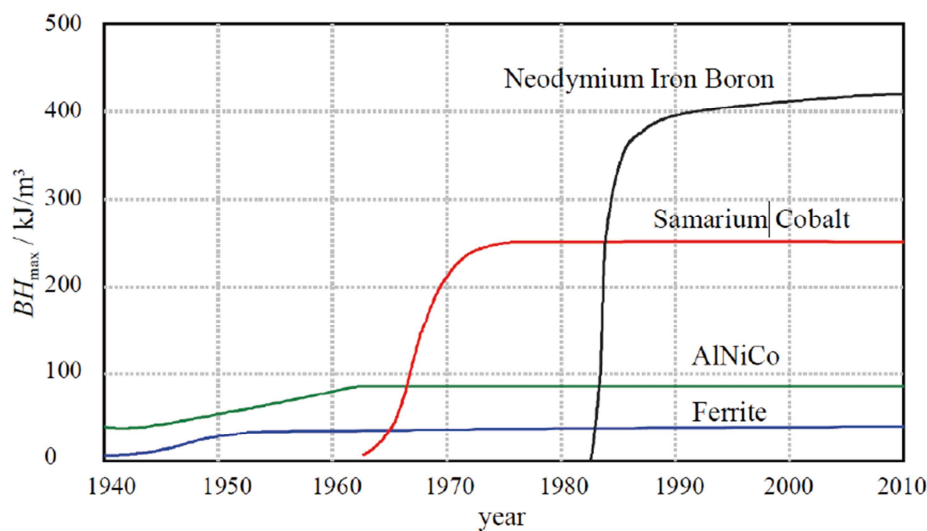
Peatükk 9 keskendub tulemuste analüüsile. Võrreldakse peatükis 7 arvutatud tulemusi peatükis 8 mõõdetud katsetulemustega. Tulemused on esitatud graafikutel.

Püsomagnetmasina modelleerimiseks ja analüütiliseks arvutuseks lõplike elementide meetodil on kasutatud spetsiaaltarkvara FEMM 4.2, mis on vabavarana allalaaditav [6]. Programm võimaldab konstrueerida seadme, kirjeldada seadmes kasutatatud materjale ning leida masinas mõjuvad jõud või kujutada seal esinevaid magnetvälju.

Lisa 1 all on välja toodud samal teemal kirjutatud teadusartikkel, mis on hetkel veel ilmumata. Lõputöös käsitletud teema kattub artikli temaga, kus selgitatakse aeglasekäigulise püsomagnetgeneraatori ekstsentrilisust ja selle mõju.

3. ÜLEVAADE PÜSIMAGNETMASINATEST

Püsimagnetite avastamine toimus enne meie ajaarvamist. Vaatamata sellele, et avastatud magnetid olid suhteliselt nõrgad, võtsid meremehed need kasutusele kompassides. Esimeste tehilike magnetite tootmisest on märke 13. sajandist. 20. sajandil hakkasid materjalid väga kiiresti edasi arenema ning iga kümnend tõi kaasa uusi avastusi ja leiutisi. 1960. aastatel avastati haruldased muldmetall koobalt Sm_2Co_5 materjalid. Neodüüm-raud-boor(NdFeB) materjalide avastamine on toonud kasutusele kõige tugevamad magnetid [7].



Joonis 3.1. Magnetmaterjalide energiatiheduse areng aastate lõikes [8]

Magnetite tootmisele ja arendamisele pannakse suurt rõhku. Jooniselt 3.1 on näha, kuidas on erinevate magnetmaterjalide energiatihedus aastate lõikes arenenud. Tähelepanuväärne on see, et neodüümmagnetid on avastamise hetkest peale olnud kõige suurema energiatihedusega magnetid maailmas ning selle magnetmaterjali areng pole peatunud.

Püsimagnetite kasutamine on võimaldanud luua kõrge kasuteguriga masinaid, mida on üha rohkem rakendatud tuulegeneraatorites. Suure võimsusega püsimagnetmasinate arendus ja kasutamine on algstaadiumis ning võimalusi edasiarendamiseks on mitmeid. Aastate jooksul on tööstustes kasutusel olnud neli põhilist püsimagnetmaterjali: NdFeB, SmCo, AlNiCo ja ferriitmagnetid. Muldmetallmagnetitest kõige enam kasutatud on NdFeB.

Magnetmaterjalide tehnilised parameetrid on välja toodud Tabelis 3.1.

Tabel 3.1. Erinevate püsomagnetmaterjalide omadused [9]

	BH_{max} (kJ/m ³)	B_r (T)	H_c (kA/m)
NdFeB	220...500	0.97...1.45	740...1000
SmCo	120...240	0.85...1.1	620...840
Ferriit	7...42	0.2...0.48	120...360
AlNiCo	10...35	0.6...1.16	40...120

Magnetite valimisel jälgitakse 3 põhisuurust, mis on kirjeldatud Tabelis 3.1, need on energiatihedus BH_{max} , jääkmagnetvoo tihedus B_r ja koertsetiivjõud H_c . Neljas parameeter, millele tähelepanu pööratakse, on temperatuuritaluvus.

3.1. Püsomagnetmasinad

Elektrimootorid kasutavad üle 65% kogu maailmas toodetud elektrienergiast [10]. See on suure tähelepanu alla pannud kõrge kasuteguriga elektrimootorite väljatöötamise ja tootmise. Üheks võimaluseks kõrge kasuteguriga masinaid toota on kasutada masinates püsimateid.

Püsomagnetmasinad (PM masinad) on tööstustes laialdaselt kasutuses. Võrreldes elektromagnetilist ergutust vajavate mootoritega on PM masinatel suurem väändemoment, kõrgem tootlikkuse/suuruse suhe ja parem dünaamiline jõudlus [1]. Lisaks on PM masinad lihtsa ehitusega ja lihtsalt hooldatavad.

Selleks, et PM masina jõudlust parandada ja eluiga tõsta on väga tähtis masina elutsükli vältel rikete ennetamine. PM masinates tekkivad rikked jagunevad kolme kategooriasse: elektrilised, magnetilised ja mehaanilised vead [1].

Elektrilised rikked hõlmavad eelkõige probleeme mähistega ning on põhjustatud ülekuumenemisest.

Magnetilised rikked puudutavad magnetite demagnetiseerumist. Demagnetiseerumine on tavaliselt põhjustatud sellistest koormusolukordadest, mis nõuavad kõrget käivitusmomenti ja kus tekivad suured voolud ning mähiste soojenemine. Suurim oht magnetite demagnetiseerumiseks on kõrge temperatuuri korral.

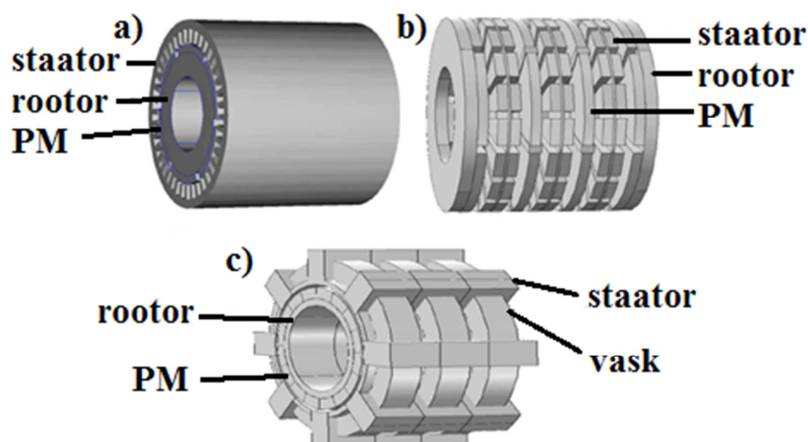
Mehaanilised rikked on põhjustatud tavaliselt laagrite või ekstsentrilisuse vigadest. Ekstsentrilisuse põhjustest ja iseloomust on rohkem juttu 6. peatükis. Mehaaniliste rikete üks võimalikke põhjuseid on tehase ebatäpne tootmiskvaliteet.

3.1.1. PM sünkroongeneraatorid jaotatud väljaergutuse järgi

PM masinad saab magnetvoo suuna järgi, ankru ja staatori vahelises õhupilus, jaotada kolme erinevasse kategooriasse [2]:

- **Radiaalse magnetvooga** generaatorid (joonis 3.2a), kus õhupilu läbiv magnetvoog on radiaalsuunas. Traditsioonilised elektrimasinad põhinevad just sellel lahendusel. Levinum konstruktsioon on siserootori ja välisstaatoriga, kuid kasutatakse ka välisrootori ja sisestaatoriga lahendust.
- **Aksiaalse magnetvooga** generaatorid (joonis 3.2b), kus magnetvoog läbib generaatori õhupilu pöörlemistelje suunas ehk aksiaalselt. Rootor paikneb teljesuunaliselt staatori kõrval. Levinum on ühepoolse rootori ja staatori lahendused, kuid kasutatakse ka kahepoolset staatorit või mitut rootorit.
- **Põikivooga** generaatorid (joonis 3.2c), kus magnetvoog läbib õhupilu põikisuunas, see saavutatakse eripäraselt kõrvutipaiknevate püsिमagnetsõlmede abil. Selline lahendus on suhteliselt uus ja väheuuritud ning oluliseks puuduseks on magnetvoo nõrgenemine ja demagnetiseerumine.

Kõige levinum on traditsiooniline lahendus ehk radiaalse magnetvooga generaator.



Joonis 3.2. Radiaalse-(a), aksiaalse-(b) ja põikivooga(c) masinad [11]

4. PÜSIMAGNETMASINATE KASUTAMINE TUULIKUTES

4.1. Tuuleenergia kasutamise ajalugu

Fossiilsete kütuste varude vähenemine ja hindade kallinemine on suure tähelepanu alla seadnud taastuvate energiaallikate kasutamise. Üheks taastuvaks energiaallikaks, mis kunagi otsa ei lõppe, on tuuleenergia. Aastate algusest on inimesed imetlenud tuule jõudu. Esimesi märke tuuleenergia kasutamisest inimkonna poolt on hinnanguliselt 5000 e.m.a. Esimesi tänapäeva tuulikuid meenutavaid lahendusi valmistati juba 10. sajandil Hiinas, Pärsias ja Tiibetis.

Rristisõdade tõttu, jõudsid horisontaalse võlliga tuulikud Pärsiast ja Kesk-Aasiast Euroopasse. Esimesed teated selliste tuulikute kasutamise kohta pärinevad Inglismaalt ja Prantsusmaalt 12. sajandist ning Saksamaalt ja Taanist 13. sajandist [2].

19. sajand osutus murranguliseks tuulegeneraatorite arengus. Esimese elektri tootmiseks mõeldud tuulegeneraatori ehitas 1887. aastal professor James Blyth. See oli ehitatud tema Maykirki suvila aeda. Mõnda aega hiljem, 1888. aastal valmistas 12 kW tuulegeneraatori leiutaja Ameerikast, Charles Brush. Poul la Cour tutvustas oma tuulegeneraatori lahendust 1890. aastate alguses. Cour pani suurt rõhku energia salvestamisele ning hakkas tuuleenergiat kasutama vesiniku tootmiseks. [12]

20. sajand on tuulegeneraatorite arengus olnud väga oluline kuna tuulegeneraatorite võimsus selles ajavahemikus on kasvanud kümnetes kordades.

Tuuleenergia kasutamise populaarsus on väga palju sõltunud fossiilsete kütuste hinnast. Pärast Teist Maailmasõda, kui kütustehinnad langesid, langes ka huvi tuuleturbiinide vastu. Kütusehinna tõus 1973. aastal, mis on tuntud kui kütusekriisi aasta, tõstis taas huvi tuulegeneraatorite vastu. [13]

2013. aasta seisuga on üle maailma paigaldatud tuulegeneraatorite võimsus 318 137 MW, võrreldes 2012 aastaga on paigaldatud võimsus kasvanud 12% võrra. [14]

4.2. Tuulegeneraatorite kasutamine

Enamus tuulegeneraatorite poolt toodetud võimusest tuleb suurtest, megavattides mõõdetavatest generaatoritest. Sellised tuulikud on väga suured, kallid ja vajavad tugevat võrku, millele süsteemi ehitada, koos piisava võimsusega reservjaamadega. Suurte elektrituulikute ehitamine pole alati mõttekas ning kohati piisab ka madalama võimsusega väikeste tuulikute paigaldamisest. Väikesed tuulegeneraatorid hõlmavad vahemikku 6 W kuni 300 kW [15]. Selliste tuulegeneraatorite paigaldamine on mõttekas kohtades, kus pole võrguühendust. Kohad, kus tarvitatakse genereeritud võimsus ära erinevate seadmete ja protsesside töös hoidmiseks. Väikesed tuulikud on kasutusel olnud terve 20. sajandi vältel ning on kogumas populaarsust üle maailma. Kõige aktiivsemalt paigaldatakse väiketuulikuid Hiinas, USAs ja Suurbritannias [15].

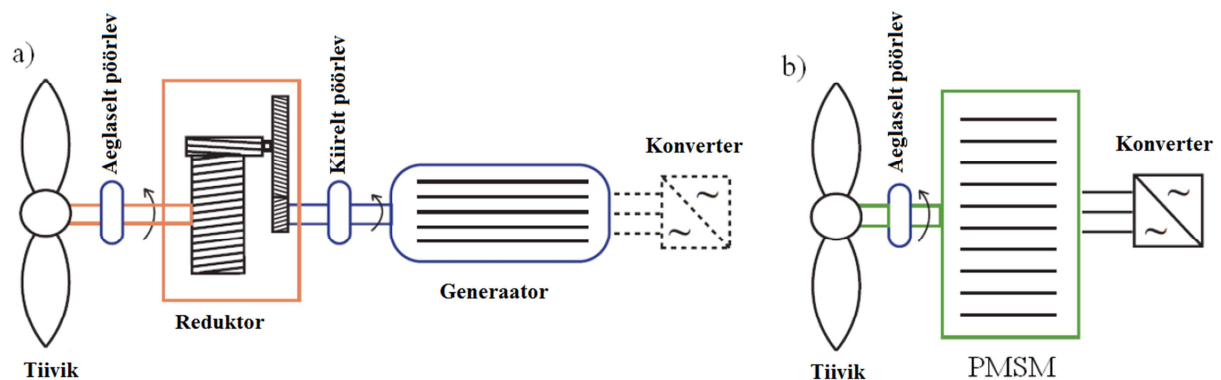
Keskmine Ameerika pere kasutab aastas umbes 11,5 kWh elektrit. Nende andmete põhjal väidab Maailma Tuuleenergia Assotsiatsioon (WWEA), et 10 kW tuuleturbiin kataks täielikult keskmise pere energiavajaduse. Võrreldes Ameerika pere Euroopa ja Hiina perekonnaga, siis Euroopas saaks pere hakkama 4 kW tuulikuga ning Hiina pere 1 kW tuulikuga [15].

Eestis täpne arvepidamine väiketuulikute kohta puudub. Hinnanguliselt on neid kokku paarsada, millest paarkümmend on ühendatud ka võrku. Maailma Tuuleenergia Assotsiatsiooni raportis on kirjas, et 2011. aasta lõpuks üle maailma paigaldatud 730 000 väiketuulikut. 2010. aasta lõpus oli see arv 656 000, 2009. aastal 521 000 ning 2008. aastal 460 000. Väiketuulikute koguvõimsus moodustas 2011. aastal umbes 576 MW kogu tuuleenergiast, mis kokku oli 240 GW. 2013. aastal lisatud väiketuulikute koguvõimsus Elektrilevi võrku oli 150,6 kW. Kokku lisandus 15 väiketuulikut, nendest kõige enam oli 10 kW tuulikuid. [16]

4.3. Tuulegeneraatorite eritüübid

Tuulegeneraatoreid on palju erinevaid ja neid saab liigitada väga erinevate kriteeriumide järgi: võimsuse, suuruse, tiiviku kuju, võlli paigutuse, otsetoimeliste või käigukastiga tuulikute ning erinevate generaatoritüüpide järgi.

Tuulegeneraatori tootlikkus sõltub otseselt tuule tugevusest ja tiiviku pöörlemiskiirusest, mida tugevam tuul, seda rohkem energiat toodetakse. Tiiviku pöörlemiskiirus oleneb tema ehituslikest iseärasustest nagu: suurus, kuju ja labade arv. Tavaliselt on tuuleturbiini tiiviku pöörlemise kiirus suhteliselt madal jäädes 80...300 p/min vahemikku. Generaatorid on üldjuhul suurema pöörlemiskiirusega ning töötavad tavaliselt vahemikus 1000 kuni 3000 p/min. Kasutades sellist generaatorit tuulikus, tuleb kasutada ühe- või mitmeastmelist reduktorit generaatori ja võlli peale ühendatud tiiviku vahel nagu näidatud joonisel 4.1a. Reduktori kasutamine muudab generaatori oluliselt raskemaks. Reduktoris esinevad suuremad mehaanilised kaod ja reduktoris olevad liikuvad osad vajavad lisahooldust, mis tõstab tuulegeneraatori eksploatatsioonikulu. Vaatamata sellele on reduktoriga tuulegeneraatorid olnud pikka aega kasutuses, nad on tehniliselt heal tasemel ja väga levinud.



Joonis 4.1. Tuulegeneraatori põhimõtte skeem (a) reduktoriga, (b) tiivik on ühendatud otse generaatoriga [3]

Teise lahendusena on võimalik ühendada tiivik otse generaatoriga nagu näidatud joonisel 4.1b. Selline kasutusviis eeldab, et tuleks kasutada aeglase pöörlemiskiirusega generaatorit, mis on mitmepooluseline. Otsetoimelisel tuulegeneraatoril on mitmeid eeliseid reduktoriga tuuliku ees [2]:

- suureneb generaatori poolt toodetav energiahulk, sest kasutatakse paremini ära väiksemaid tuulekiirusi
- vähenevad hoolduskulud, töökindlus suureneb
- väheneb ümbruskonda kiirgav müra
- väheneb elektrivõrgu flikker
- suureneb võimsustegur

Nagu eelnevalt mainitud, on suurte ja võimsate tuulegeneraatorite pöörlemiskiirus madal, seetõttu on otseajamiga generaatoris tiiviku ja generaatori pöörlemiskiirus sama. Aeglasekäigulise generaatori pooluste suure arvu tõttu on generaatori läbimõõdu ja pikkuse suhe suhteliselt suur. See põhjustab probleeme megavatt võimsusklassi kuuluvate tuulikute ehituses, kus tekib probleeme ühtlase õhupilu ja piisava jäikuse tagamisega [17].

Otseajamiga generaator sobib kasutamiseks väiksema võimsusega tuulikutes, kus pöörlemiskiirus on mõnevõrra suurem, seetõttu on võimalik ehitada väiksem generaator, kus on pooluseid vähem.

4.4. Püsimagnetite kasutamine tuulegeneraatorites

Tuulikutes kasutatakse nii püsi- kui elektromagnetitega sünkroongeneraatoreid. Madala pöörlemiskiirusega tuuleagregaadid, kus kasutatakse elektromagnetitega sünkroongeneraatoreid, on suhteliselt rasked ja kallid. Madala kiirusega pöörlevaid tuulikuid, kus kasutatakse püsimagneteid, peetakse selle tööstusharu üheks perspektiivikamaks seadmeks. Täna sel päeval maksavad sellised masinad rohkem kui reduktoriga tuulegeneraatorid, kuid PM masinatel on palju eeliseid.

Püsimagnetite kasutamine generaatorites on võimaldanud kõrge kasuteguriga masinate ehitamist. See eelis on teinud püsimagnetgeneraatorite kasutamise atraktiivseks tuuleagregaatides. Püsimagnetmasinate omadused kattuvad suurepäraselt tuulegeneraatori ehituspõhimõtetega [18]:

- lihtne ehitus,
- kerge kaal,
- madal kiirus,
- suur väljundvõimsus,
- muutuva kiirusega generaator,
- madal väändemoment,
- odav hind.

Püsimagneteid kasutades on generaator kerge ja generaatori ergutus tuleb püsimagnetitest, puuduvad ergutuskaod. Sellised masinad on kõrge kasuteguriga ja väga töökindlad.

5. ÜLEVAADE NdFeB MAGNETITEST

5.1. NdFeB magnetite avastamine ja tootmine

NdFeB magnetid avastati 1983. aastal *General Motors Inc.* (GM) poolt Ameerika Ühendriikides ja *Sumitomo Special Metalsi* (SSM) poolt Jaapanis [7]. Nad kasutasid sama materjali tootmiseks erinevaid meetodeid.

GM tootmisprotsessi puhul loodi õhuke metalliriba, seda inertses keskkonnas vedelikujoas kiiresti jahutades. Riba purustati ja pärast kül- või kuumpressimist saadi erineva tugevusega magnetid [7].

SSM kasutas aga pulber metallurgilist protseduuri magnetite tootmiseks. Metall sulatati inertses keskkonnas ja valati kangideks. Seejärel jahvatati metall pulbriks ja külmpressiti magnetväljas [7].

Nõudlus NdFeB magnetite järgi on suur ja materjali tootmine on pärast kriisiaja langust iga aastaga kasvanud. Suurim NdFeB magnetite tootja ja ka tarbija on Hiina [19].

5.2. NdFeB magnetmaterjali eelised ja puudused

Neodüümmagnetite laia leviku ja populaarsuse taga on palju eeliseid, mis on omased sellele magnetmaterjalile [7]:

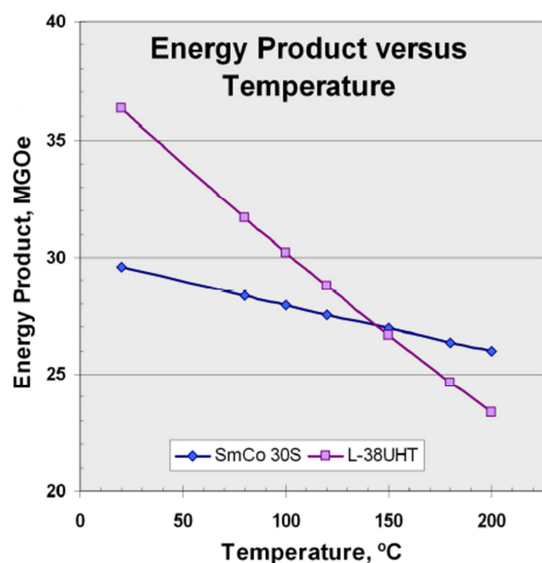
- kõrge energiatihedusega materjal,
- kasutatakse odavaid, strateegiliselt vähetähtsaid toormaterjale tootmiseks (Fe, B, Al),
- saab kasutada erinevaid tootmisviise magnetmaterjali valmistamiseks (GE ja SSM tootmisviisid).

Kahjuks on sellel materjalil ka suur hulk puudusi, mis teeb magnetite kasutamise ja tootmise keerukaks [7]:

- uue materjali kasutuselevõtuks ja paigaldamiseks olemasolevatesse seadmetesse on vaja uut tehnoloogiat,

- väike kasutuseks kõlblik temperatuurivahemik, mis on põhjustatud madalast Curie´ temperatuurist,
- korrodeeruv materjal, seetõttu vajab materjali pind katmist,
- pulber oksüdeerub õhuga kokkupuutudes hetkeliselt,
- täielikuks magneetamiseks on vaja väga tugevaid magnetvälju,
- magnetmaterjali on keerukas kasutada ja sellega opereerida kuna magnetväli on sedavõrd tugev metallide ja teiste magnetite suhtes.

Varasemalt mainitud madal Curie´ temperatuur ehk Curie´ punkt, millest kõrgemal temperatuuril materjali magnetilised omadused kaovad, on NdFeB magnetite puhul suureks probleemiks. Temperatuuritaluvus piirab magnetite kasutusvõimalusi ekstreemsetes olukordades nagu lennuki või kosmose rakendustes. Seetõttu eelistatakse äärmuslikes olukordades sageli NdFeB magnetitele SmCo magneteid. Joonisel 5.1 on välja toodud nende kahe materjali magnetilised omadused temperatuuri tõustes.



Joonis 5.1. NdFeB ja SmCo magnetite magnetiliste omaduste sõltuvus temperatuurist [20]

Graafikult on näha, et temperatuuri tõustes langeb NdFeB magneti energiaviljakus tunduvalt kiiremini kui SmCo magnetil ning 150°C alates on SmCo tugevam.

NdFeB magnetmaterjalid on tänasel päeval enim kasutatud magnetid. Tal on palju eeliseid teiste magnetmaterjalide ees, kuid üksikute puuduste tõttu ei saa seda igal pool kasutusele võtta.

5.3. NdFeB magnetite kasutamine

Püsimagnetmaterjale on arendatud juba aastaid. Selle aja jooksul on parandatud temperatuuritaluvust ja magnetvälja tugevust, mis omakorda on võimaldanud püsimagnetite kasutamist erinevates valdkondades.

Suurtes süsteemides kasutatakse NdFeB magnetiteid laagrites, mootorites, pöörisvoolu pidurites ja transpordis, näiteks hübriidautodes ja maglev tehnoloogias [21]. Maglev tehnoloogia, mis tähendab „*Magnetic Levitation*“ kasutatakse rongiliikluses ja selle eesmärk on hõõrdekaotamine rööbaste ja rongirataste vahel.

Väikestes süsteemides kasutatakse NdFeB magnetiteid peamiselt selle tõttu, et tänu tugevale magnetväljale on võimalik ehitada väiksemaid ja kompaktsemaid seadmeid. Püsimagnetiteid kasutatakse arvuti kõvaketastes, kitarril helipeades, kõlarites ja kõrvaklappides ning isegi e-sigarettides.

Tänu tugevale magnetväljale leitakse NdFeB magnetitele kasutust paljudes erinevates valdkondades. Nõudlus NdFeB materjalile on 2000. aastaga võrreldes kasvanud kordades. Peamised NdFeB kasvavad turud on autotööstustes elektri- ja hübriidautode tootmine ning elektrimasinate tootmine, kus rõhku pannakse tuulegeneraatorite valmistamisele [19].

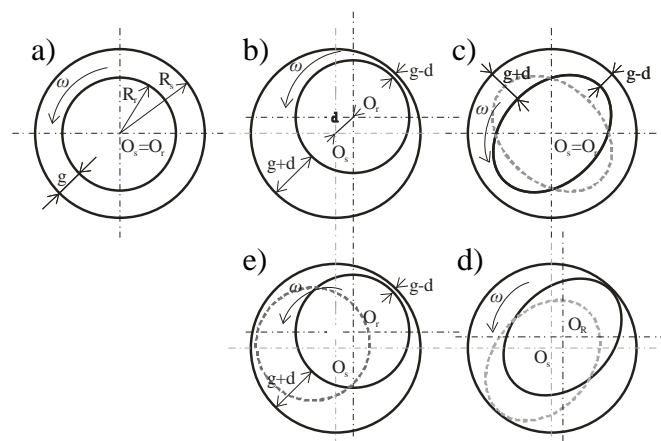
6. EKSTSENTRILISUSE NÄHTUS

6.1. Ekstsentrilisus

Ekstsentrilisuse mõiste tuleneb keskaegsest ladinakeelsest väljendist „*eccentricus*“, mis on omakorda tuletatud kreekakeelsest väljendist „*ekkentros*“, mis tähendab tsentrist väljas [22]. Elektrimasina ekstsentrilisust iseloomustab ebahütlane õhupilu, mis jääb staatori ja rootori vahele. Elektrimasina õhupilu ekstsentrilisust saab seostada mitmete tootmisfaasis tekkinud ebatäpsustega nagu näiteks laagrite asetus, võlli paindumine. Ekstsentrilisust esineb teatud määral igas masinas, sest töötamise käigus paratamatult masinaosad kuluvad ning masin pole enam tsentris. Staatilise ja dünaamilise ekstsentrilisuse määr elektrimasinas on tavaliselt 10% [23], [24]. Rootori ekstsentrilisus põhjustab pulseerivaid ebahütlasi magnetilisi jõudusi, tsirkuleerivaid voole staatori mähistes, mille tõttu suurenevad kaod ja esineb soojenemist [25].

6.2. Ekstsentrilisuse eritüübid

Ekstsentrilisus võib tekkida masina töö käigus, aga võib olla ka tingitud tootmisel tekkinud ebatäpsustest. Joonisel 6.1 on välja toodud ekstsentrilisuse eritüübid.



Joonis. 6.1. Ekstsentrilisuse eritüübid: a) tsentreeritud masin; b) staatiline; c) elliptiline; d) staatiline ja elliptiline e) dünaamiline [4]

Eritüüpideks on tsentreeritud ehk terve masin (Joonis. 6.1a), staatiline ekstsentrilisus (SE) (Joonis. 6.1b), elliptiline ekstsentrilisus (EE) (Joonis. 6.1c) ja dünaamiline ekstsentrilisus (DE) (Joonis. 6.1d ja 6.1e).

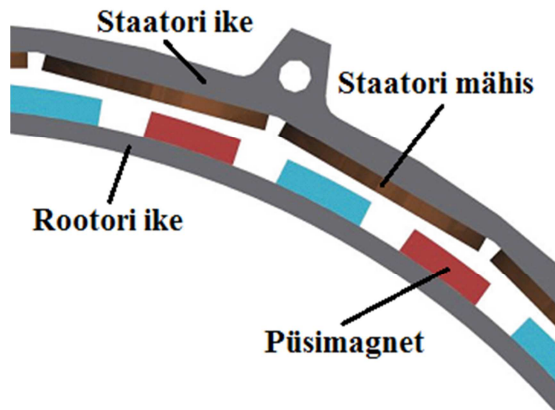
Staatiline ekstsentrilisus (SE) esineb kui rootori pöörlemistelg ja staatori sümmeetriline telg ei asu ühel joonel, ehk nende asukohad ei ühti. SE on põhjustatud staatori pinna ovaalsusest või rootori valest paigutusest staatori suhtes. Rootori pööreldes tema asukoht staatori suhtes ei muutu ja õhupilu staatori poolt vaadatuna ei muutu, aga nendevaheline õhupilu masina igas punktis pole ühtne.

Elliptiline ekstsentrilisus (EE) on peamiselt põhjustatud rootori ebasümmeetrilisest kujust. Staatori ja rootori keskpunktid võivad ühtida, kuid õhupilu staatori poolt vaadatuna muutub ja on ajast sõltuv.

Dünaamilise ekstsentrilisuse (DE) puhul ei asu rootori pöörlemistelg ja tema sümmeetriline keskpunkt ühel joonel. Rootori keskpunkt võib staatori omaga asuda ühel joonel, kuid võib ka olla selles nihkes. Staatori poolt vaadatuna muutub õhupilu laius, kui rootor pöörleb. Õhupilu laius on ajast sõltuv.

7. GENERAATORI MATEMAATILINE MUDEL

Antud töös uuritud seade on sünkroongeneraator, mille rauast rootorile on liimitud NdFeB püsिमagnetid. Joonisel 7.1 on näidatud uuritava elektrimasina osad. Staatori ike on valmistatud elektrotehnilisest terasest ning sellele on kinnitatud staatorimähised.



Joonis 7.1. Generaatori ehitus

Generaatori konstrueerimiseks on vajalik läbida projekteerimine etappide kaupa. Lühidalt võib masina projekteerimise jagada viieks etapiks: dimensioonide arvutamine, magnetvälja analüüs, elektriliste parameetrite arvutamine, väljundkarakteristikute arvutamine ja temperatuuriarvutus.

Uuritava seadme eeldatavad nimiparameetrid on esitatud tabelis 7.1.

Tabel 7.1. Uuritava seadme eeldatavad nimiparameetrid

Parameeter	Väärtus
Nimivõimsus	5 kW
Nimipöörlemiskiirus	230 p/min
Nimipinge	270 V _{ac}
Nimivool	11,2 A _{ac}
Mähiste arv	24
Pooluste arv	40
Generaatori diameeter	690 mm
Õhupilu laius	2,5 mm

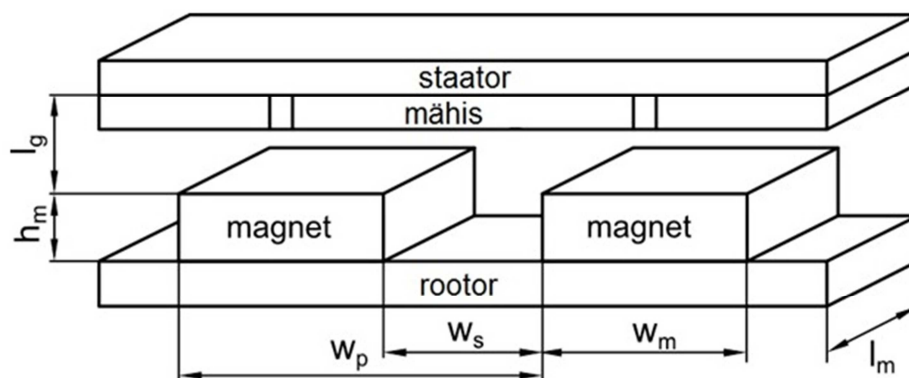
Antud töös on varasemalt teada elektrimasina dimensioonid, seetõttu ei ole vajadust masina mõõtmeid arvutada. Magnetvälja analüüsi etapis arvutatakse välja magnetvoog õhupilus, mille abil saame leida elektrimasina elektrilised parameetrid. Elektriliste parameetrite

arvutamise etapis leitakse mähistes indutseeritud elektromotoorjõud, mille abil saab arvutada masina väljundkarakteristikud. Temperatuuriarvutust antud töös ei käsitleta.

7.1. Magnetvälja analüüs

7.1.1. Magnetvoo arvutamine õhupilus

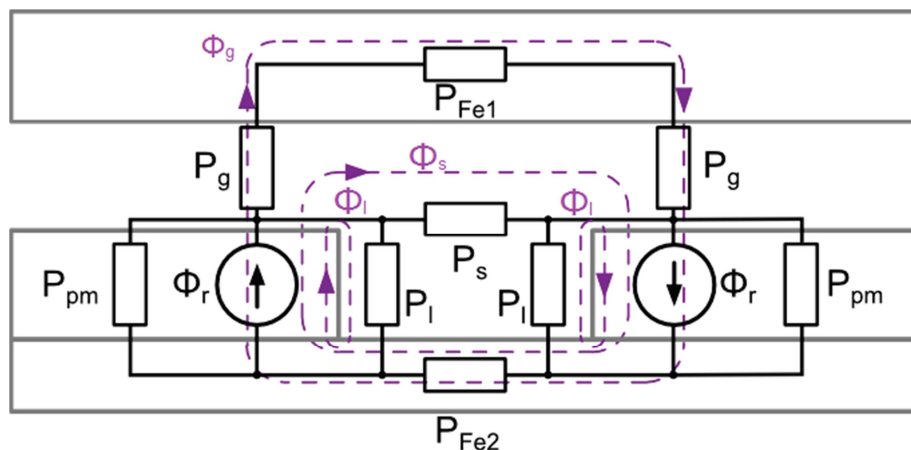
Magnetite, mähiste, rootori ja staatori parameetrid on varasemalt teada. Nendele parameetritele tuginedes saab arvutada magnetvootiheduse õhupilus ja seejärel mähises indutseeritud elektromotoorjõu. Magnetite asetus rootoril ja mähiste asetus staatoril koos tähistustega on näidatud joonisel 7.2, kus h_m on magneti kõrgus, l_g - magnetite ja staatori vaheline kaugus, w_p - ühe pooluse pikkus, w_s on kahe magneti vaheline kaugus, w_m magneti pikkus ja l_m magnetite ja rootori laius.



Joonis 7.2. Magnetite ja mähiste asetuse skeem [5]

Generaatori väljundparameetrite arvutamiseks tuleb leida magnetvoo poolt indutseeritud elektromotoorjõud mähistes.

Magnetvood ja läbitungivuste arvutamise lihtsustatud skeem on näidatud joonisel 7.3. Magnetvoog on kirjeldatud nelja komponendina: magnetvoog õhupilus Φ_g , lekkevoog magneti külgedel Φ_l , lekkevoog naaberpoolusele Φ_s ja Φ_r , mis on võrdne ülejäänud kolme magnetvoo summaga.



Joonis 7.3. Õhupilu magnetvoo komponentide ja arvutamise skeem [5].

Õhupilu magnetvootihedust ja mähises indutseeritud elektromotoorjõudu on võimalik arvutada läbitungivuste kaudu. Püsimagnetite läbitungivuse P_{pm} saab arvutada järgmise valemiga:

$$P_{pm} = \mu_0 \mu_r \frac{A_{pm}}{h_m} = \mu_0 \mu_r \frac{l_m w_m}{h_m} \quad (7.1)$$

μ_0 – vaakumi magnetiline läbitavus

μ_r – suhteline magnetiline läbitavus

A_{pm} – magneti pindala

Lekkevood magnetite külgedel P_l saab leida valemiga:

$$P_l = \frac{\mu_0 l_m}{\pi} \int_0^{\frac{w_m}{2}} \frac{dx}{x + \frac{h_m}{\pi}} = \frac{\mu_0 l_m}{\pi} \cdot \ln \left(1 + \frac{\pi w_m}{2 h_m} \right) \quad (7.2)$$

Läbitungivuse õhupilus olevale lekkevoole P_s arvutatakse valemiga:

$$P_s = \frac{\mu_0 l_m}{\pi} \int_0^{l_g} \frac{dx}{x + \frac{w_s}{\pi}} = \frac{\mu_0 l_m}{\pi} \cdot \ln \left(1 + \frac{\pi l_g}{w_s} \right) \quad (7.3)$$

Staatori ja rootori vahel oleva õhupilu läbitungivuse P_g leitakse valemiga:

$$P_g = \mu_0 \frac{A_{pm}}{l_g} = \mu_0 \frac{l_m w_m}{l_g} \quad (7.4)$$

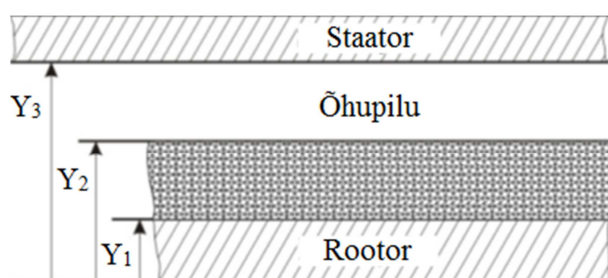
Nüüd saab leida magnetvoo suuruse õhupilus Φ_g , tuginedes eelnevalt leitud parameetritele. Φ_g arvutakse valemiga:

$$\phi_g = \phi_r \cdot \frac{P_g}{P_\Sigma} = \frac{B_r \cdot l_m \cdot w_m \cdot P_g}{P_{pm} \cdot P_l + \frac{P_s}{2} + P_g} \quad (7.5)$$

B_r - püsिमagnetі jääkmagnetvoo tihedus

7.1.2. Magnetvälja arvutamine vektorpotentsiaali meetodil

Uuritava generaatori magnetvälja hindamiseks, on võimalik kasutada ka vektorpotentsiaali meetodit. Seda meetodit kasutatakse töös tegeliku masina ja lõplike elementide meetodil saadud tulemuste võrdlemiseks. Enne arvutuste alustamist eeldame, et PM ühtlase kiirusega liikumine õhupilus tekitab ideaalse sinusoidi. Arvutamiseks kasutame lihtsustatud ja tasapinnalist mudelit, sest generaatori suure raadiuse tõttu ei mõjuta lihtsustamine oluliselt lõpptulemust. Joonisel 7.4 on välja toodud arvutamiseks kasutatavad parameetrid, kus Y_1 on rootori paksus, Y_2 on rootori ja magneti paksus ning Y_3 on rootori, magneti ja õhupilu paksus.



Joonis 7.4. Vektorid magnetvoo arvutamiseks.

Eeldusel, et tekib ideaalne sinusoid, arvutakse magnetvoo väärtused resultantvektori ja sinusoidi lainepikkuse kaudu. Resultantvektori A arvutamiseks kasutatakse järgmist valemit:

$$A = \frac{y}{Y_3 - Y_2} = \left\{ A_{2,2} \left(e^{\frac{Y_3}{u}} - e^{\frac{Y_2}{u}} \right) - A_{2,1} \left(e^{-\frac{Y_3}{u}} - e^{-\frac{Y_2}{u}} \right) \right\} \quad (7.6)$$

$A_{2,2}$ – lõppasukohavektor

$A_{2,1}$ – algasukohavektor

Sinusoidi lainepikkuse u saab arvutada valemiga:

$$u = \frac{\pi d_r}{p} \quad (7.7)$$

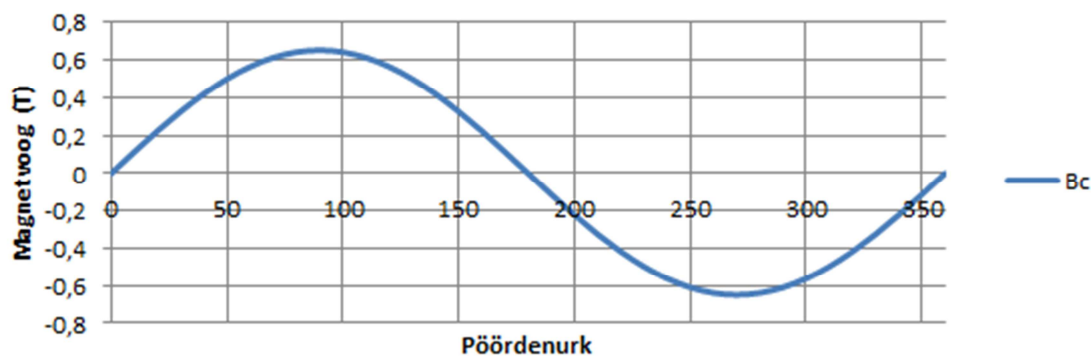
d_r - rootori raadius

p – pooluspaaride arv

Nüüd kui vajalikud komponendid leitud, arvutatakse magnetvoog B_c valemiga:

$$B_c = \frac{A}{u} \quad (7.8)$$

Arvutuslik magnetvoo graafik on esitatud joonisel 7.5. Magnetvoo maksimumväärtus on 0,653 T.



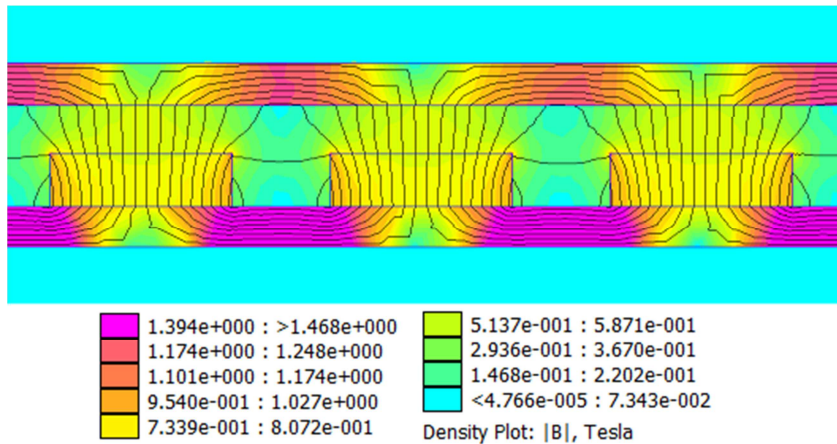
Joonis 7.5. Magnetvoo kalkulatsioon õhupilus

Magnetvoo arvutamisel on arvesse võetud ainult põhiharmoonilist ehk kõrgemate harmooniliste osakaalu antud töös pole uuritud. Kõrgemate harmooniliste arvestamisel muutub joonisel olev sinusoidaalne graafik oluliselt.

7.1.3. Magnetvälja hindamine lõplike elementide meetodil

FEM (*Finite Element Method*) ehk lõplike elementide meetodiks kasutati programmi FEMM 4.2, mis on vabavarana allalaaditav [6]. Programm võimaldab konstrueerida masina pinnalaotuse, lähtudes reaalistest mõõtetest, ja kujutada ning mõõta masinas mõjuvaid jõudusi ja välju. Joonisel 7.6 on kujutatud tasapinnaline katseseadme mudel, mis vastab generaatori parameetritele. Lihtsustatud tasapinnaline mudel koostati, sest generaatori raadius on oluliselt suurem kui ühe pooluse pikkus ning kokkuvõttes see tulemust oluliselt ei mõjuta.

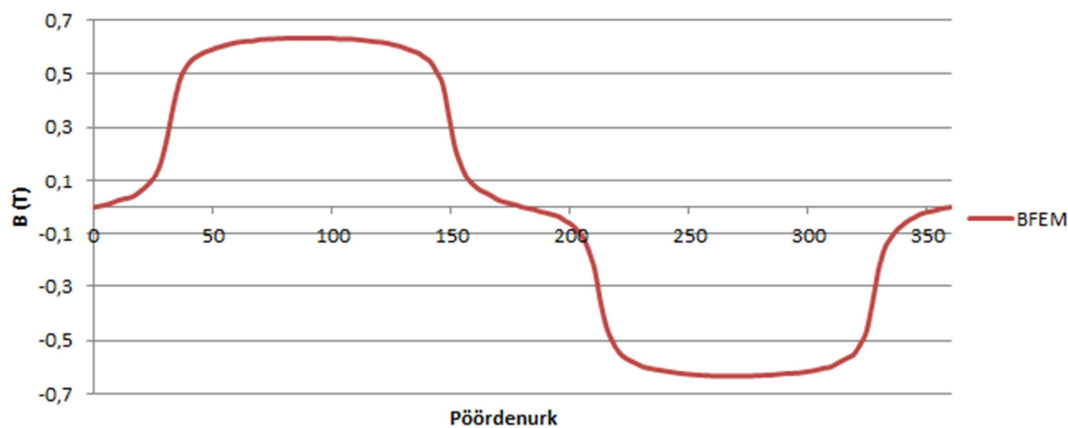
Lihtsustatud mudeli kasutamine muudab andmete mõõtmise programmis kergemaks ja täpsemaks.



Joonis 7.6. Katseseadme sirge pinnalaotus programmis FEMM 4.2

Jooniselt 7.6 on hästi näha magnetvoo jõujooned ja magnetvoo tugevused erinevates generaatori piirkondades. Kõrgeim magnetvoo tugevus õhupilus oli 0,633 T.

Joonisel 7.7 on näha programmi poolt arvutatud tulemused. Graafikult on selgelt näha, kuidas magnetvoo väärtus magneti servas väheneb järsult ja magneti kohal on suhteliselt ühtlane.



Joonis 7.7. Magnetvootihedus õhupilus

7.2. Elektrilised parameetrid ja väljundkarakteristikud

Tuginedes magnetvootihedusele ja eelnevalt teada olevatele suurustele, saab leida mähises indutseeritud elektromotoorjõu E sagedusel f valemiga:

$$E(f) = \frac{\sqrt{2}\pi n_c n_t k_w \phi_g}{m} f \quad (7.9)$$

n_c – mähiste arv

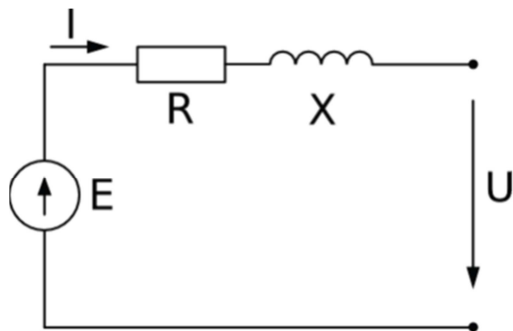
n_t – keerdude arv mähises

k_w – mähise tegur

m – faaside arv

Generaatori faasipinge U ja voolutugevuse I leidmiseks, on koostatud joonisel 7.8. näidatud lihtsustatud skeem, mille põhjal on koostatud arvutusvalem:

$$U = E - jXl - RI \quad (7.10)$$



Joonis 7.8. Generaatori ühe faasi lihtsustatud skeem

Generaatori väljundparameetrite arvutamiseks on esmalt vaja leida puuduolevad suurused: mähiste takistus R ja reaktiivtakistus $X(f)$.

Mähise takistuse R leitakse valemiga:

$$R = \rho \cdot \frac{n_t \left(2w_{cl} + \pi \frac{5}{8} w_{co} \right)}{S_t \cdot n_p} \cdot \frac{n_c}{m} \quad (7.11)$$

n_t – keerdude arv mähises

ρ – materjali eritakistus

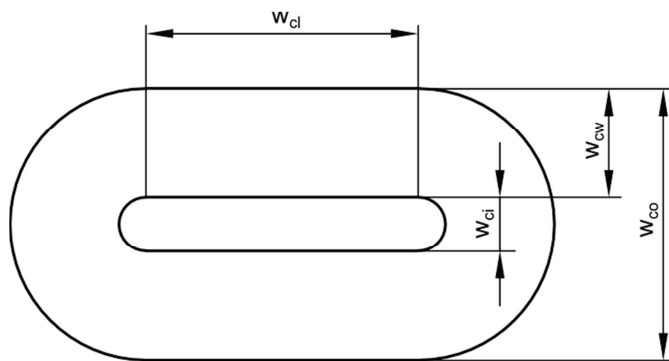
w_{cl} – mähise pikkus

w_{co} – mähise laius

S_t – juhtme ristlõike pindala

n_p – paralleeljuhtmete arv

Valemis 7.11 kasutatud mähise mõõdud on kirjeldatud joonisel 7.9.



Joonis 7.9. Mähise parameetrid [24]

Järgmiseks on tarvis arvutada faasi reaktiivtakistus, kuid enne seda on vaja leida mähise induktiivsus. Induktiivsuse arvutamiseks võib kasutada valemit, mida võib leida mitmest õpikust ja käsiraamatust. Tegemist on lihtsustatud arvutusega, kuid niigi lihtsustatud mudeli tulemust see oluliselt ei mõjuta. Induktiivsuse L_c saab leida valemiga:

$$L_c = \frac{40r_{eq}^2 \cdot n_t^2}{6r_{eq} + 9l_c + 10w_{cw}} \quad (7.12)$$

r_{eq} – mähise keskmine raadius

l_c – juhtme sirge osa pikkus

w_{cw} – mähise keeru laius

Nüüd saab arvutada faasi reaktiivtakistuse $X(f)$, valemiga:

$$X(f) = \frac{2\pi L_c n_c}{m n_p} f \quad (7.13)$$

Faasivoolu ja –pinge saab arvutada kasutades kordusi. Voolu leidmiseks kasutakse valemit:

$$I(P) = \frac{P}{m \cdot U_{t-1}} \quad (7.14)$$

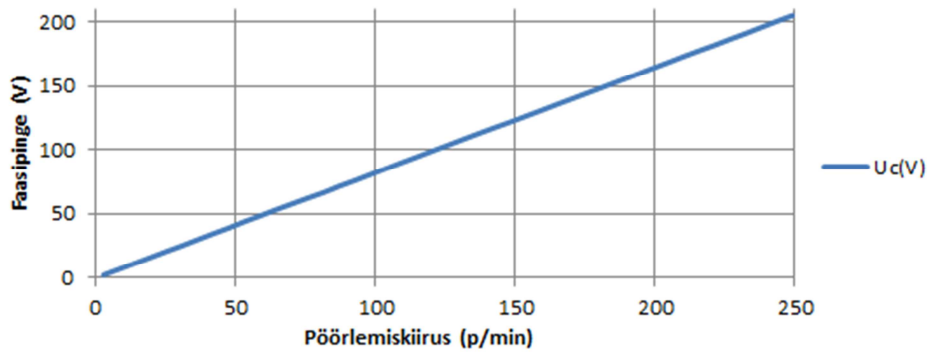
Esimese voolutugevuse arvutamiseks tuleb kasutada etteantud pingeväärtust, järgmised vooluväärtused leitakse kasutades kordusi.

Faasipinge on sõltuvuses võimusest ja sagedusest ning leitakse järgmise valemiga:

$$U(P, f) = E(f) - jX(f)I(P) - RI(P) \quad (7.15)$$

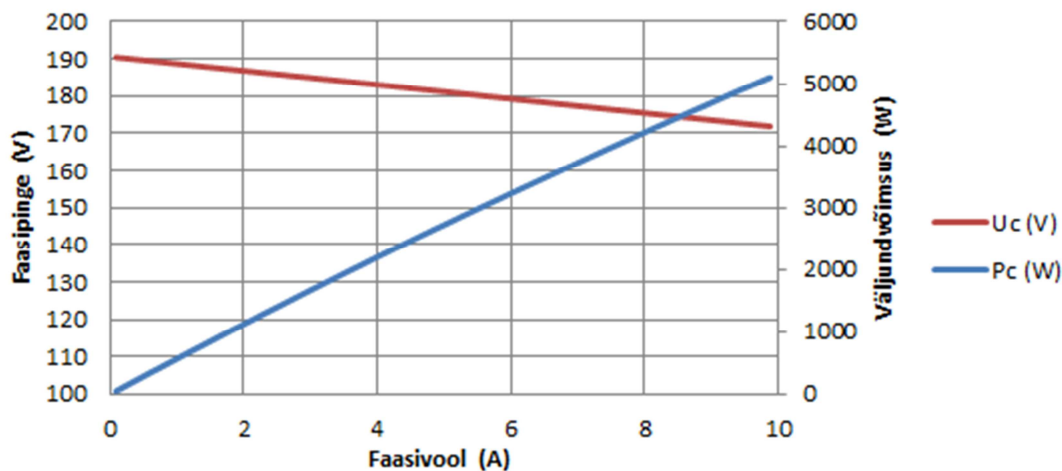
Valemis 7.15 on faasipinge arvutamiseks kasutatud näivtakistust, mis on leitud reaktiivtakistuse X ja aktiivtakistuse R abil.

Arvutuslikud tulemused katseseadme tühijoosu- ja koormuskatsele on välja toodud joonisel 7.10 ja joonisel 7.11. Arvutused ja graafikud on teostatud programmiga MS Excel 2010.



Joonis 7.10. Arvutuslik tühijoosgraafik

Tühijoosgraafik kasvab pöörlemiskiiruse suurenedes lineaarselt ja vastab oodatud tulemustele.

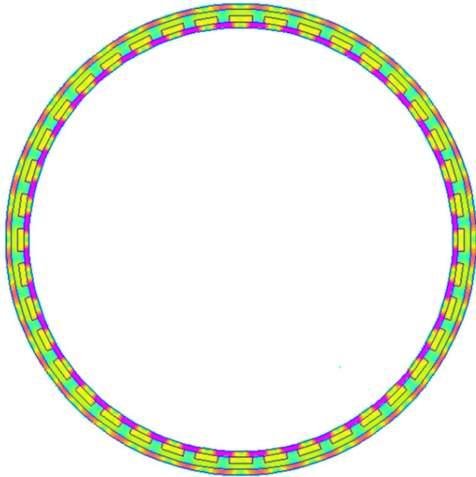


Joonis 7.11. Arvutuslik koormuskatsegraafik

7.3. Simulatsioon programmis FEMM 4.2

Tasakaalustatud masinas on üldjuhul jõudude resultant võrdne nulliga. Selleks, et aru saada millisel määral mõjutab ekstsentrilisus katseseadet, koostati programmis FEMM 4.2

katseseadme täissuuruses pinnalaotus. Joonisel 7.12 kujutatud pinnalaotus on koostatud väikestest sirgetest lõikudest, milles iga magnet on eelmisega võrreldes 9° võrra nihutatud. Mähiste asukohta pole joonisel kujutatud, kuna nad ei mõjuta magnetvoogu ega rootori ja staatori vahel mõjuvat jõudu.



Joonis 7.12. Katseseadme pinnalaotus programmis FEMM 4.2

Programm võimaldab analüüsida jõudusid, mis mõjuvad masinale x- ja y-telje suunas. Esmalt leiti tsentreeritud masina telgede suunas mõjuvad jõud ning seejärel ekstsentrilises masinas mõjuvad jõud. Ekstsentrilise olukorra tekkimiseks nihutati rootorit staatori suhtes 1 mm võrra x-telje suunas. Tabelist 7.2 on näha, et tsentreeritud masina puhul on telgede suunas mõjuvad jõud nullilähedased. Väike kõrvalekalle nullväärtusest on normaalne ja see võib olla põhjustatud sellest, et masina rootori ja staatori puhul pole tegemist ideaalsete ringjoontega.

Tabel 7.2. Katsemasinale x- ja y-telje suunas mõjuvad jõud

	Jõud telgedel (N)	
	x	y
Tsentreeritud	0,733	-2,654
1 mm nihutatud	-621,101	1,656

Tasakaalustamata masina puhul, kus rootor on 1 mm võrra tsentrist väljas, on näha, et y-telje suunal olulist muutust ei toimunud, kuid x-telje suunas mõjuv jõud on märgatavalt suurenenud. Selline olukord võib põhjustada laagrite kiiremat kulumist ja lisavibratsioone, mis pikemas perspektiivis võivad muutuda masinale ohtlikuks.

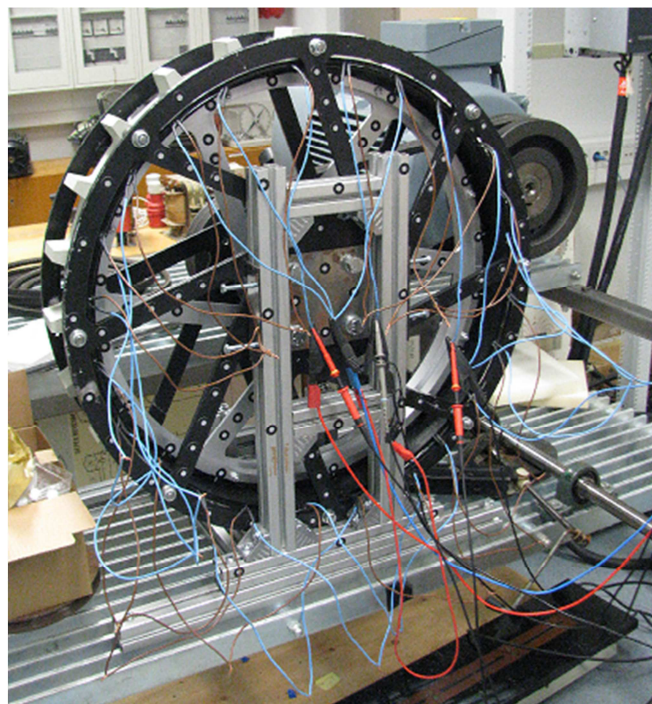
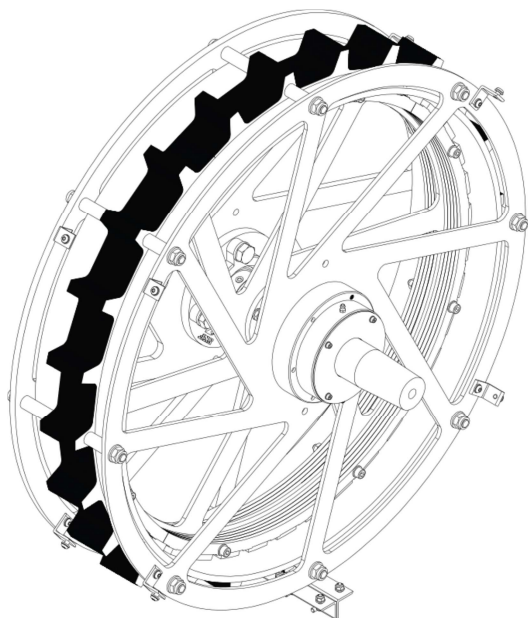
See katse tõestab, et ekstsentrilisuse tekkides esinevad tasakaalustamata masinas kümneid, kui mitte sadu kordi suuremad jõud, kui tsentreeritud masinas. Lisajõud mõjutab elektrimasina

liikuvaid osi ja eelkõige põhjustab nende kiiremat kulumist. Erilist tähelepanu tuleks pöörata suurematele ja võimsamatele masinatele, kus jõud on oluliselt suuremad.

8. KATSETULEMUSED

8.1. Katseseade

Täissuuruses katseseade asub Tallinna Tehnikaülikooli elektrimasinate laboris. Katseseadmeks on uurdevaba püsomagnet sünkroongeneraator, mis on valminud koostöös ettevõttega My!Wind Llc. Selles töös uuritud katseseadme rootor on ehitatud kasutades NdFeB püsimagneteid. Generaator on kinnitatud stabiilse ja raske metallist laua külge spetsiaalselt valmistatud rakisega. Tuuleenergiat simuleerib 30 kW elektrimootor, mis veab rihmülekanega ringi katseseadme rootorit. Elektrimootori kiirust reguleerib sagedusmuundur, mis võimaldab generaatori testimist erinevatel pöörlemiskiirustel. Illustreeriv pilt katseseadmest on esitatud joonisel 8.1a, joonisel 8.1b on kujutatud katseseadet mõõtmiste ajal. Jooniselt 8.1b on näha, et iga mähise algus ja lõpp on generaatori ühele küljele juhtmetega välja toodud ning neid saab ühendada vastavalt vajaminevale katsetatavale skeemile, lisaks on lihtne teostada mõõtmisi. Katsed sooritati tähtühenduses oleva generaatoriga. Katseseadme projekteerimisest on kirjutatud doktoritöö [3].



Joonis 8.1. Illustratsioon prototüüpmasinast(a) ja katseseade laboris (b)

Samale katseseadmele on valmistatud SmCo ja Fe magnetitest rootorid, mille omadusi uuritakse teistes töödes.

8.2. Katsetuste kirjeldus

Katsetused prototüüp generaatoriga viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli elektrimasinate laboris. Katsetuste käigus sooritati mitu erinevat eksperimenti. Magnetvoo mõõtmised teostati õhupilus mähiseid isoleeriva pinna lähedalt. Viidi läbi tühijooksu- ja koormustest ning katsed erinevate ekstsentrilisuste korral. Koormuskatse sooritati nimipöörlemiskiirusel koormates masinat erinevatel aktiivkoormustel. Koormuskatsel koormati kõiki faase võrdsete koormustega. Koormuseid kontrolliti multimeetriga ja pöörlemiskiirust pööretelugejaga. Tühijooksukatse viidi läbi erinevatel pöörlemiskiirustel.

Veaolukorrad tekitati töökorras ja tsentreeritud masinat modifitseerides. Erinevate ekstsentriliste olukordade loomiseks nihutati rootorit või selle massikeset 1 mm võrra algsest asukohast. Kuna masina õhupilu laius on 2,5 mm valiti ekstsentrilisuseks 1 mm. Suurem ekstsentrilisus võib muutuda ohtlikuks ja tekitada masinale kahjustusi. Väiksem ekstsentrilisus kui 1 mm, ei pruugi anda oodatud tulemusi.

Masinat katsetati kolmes erinevas veaolukorras:

- staatiline ekstsentrilisus, mis saavutati staatori 1 mm võrra madalamaks laskmisega rootori suhtes,
- dünaamiline ekstsentrilisus, mis tekitati rootorit 1 mm võrra nihutades võlli ja staatori suhtes,
- asümmeetriline kaalujaotus, kui ühele rootori kodarale kinnitati lisaraskus, mis nihutas rootori massikeset 1 mm võrra.

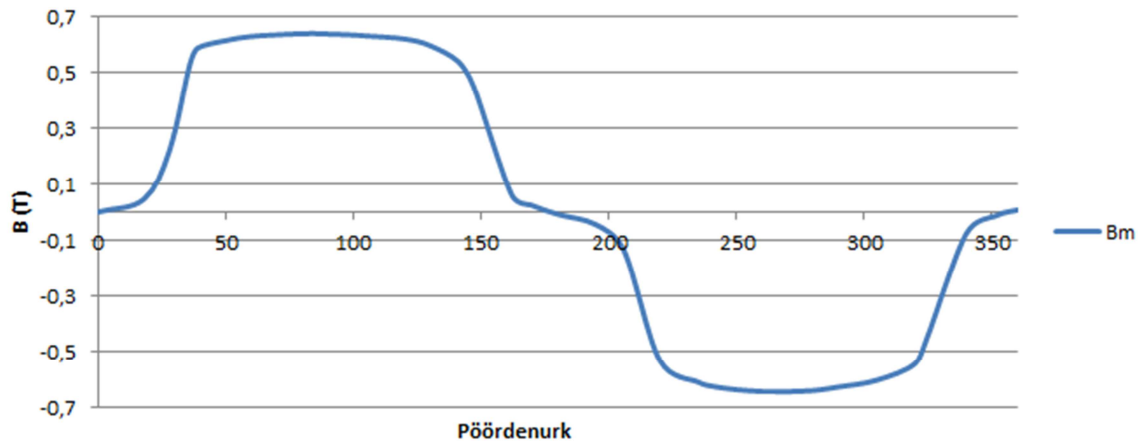
Kõiki veaolukordi katsetati tühijooksul ja nimipöörlemiskiirusel 230 p/min. Andmed salvestati kasutades ostsilloskoopi.

Elliptilist ekstsentrilisust ei katsetatud, sest sellise katse jaoks puudusid vastavad vahendid. Elliptiline rootor tuleks spetsiaalselt valmistada, mis oleks lisakulu ja kokkuvõtlikult poleks otstarbekas.

8.3. Katsetulemused

8.3.1. Magnetvoo mõõtmistulemused

Katseseadmest ülevaate saamiseks mõõdeti magnetvoogu õhupilus. Mõõdetud tulemused on esitatud joonisel 8.2. Kõrgeim mõõdetud väärtus on 0,639 T.



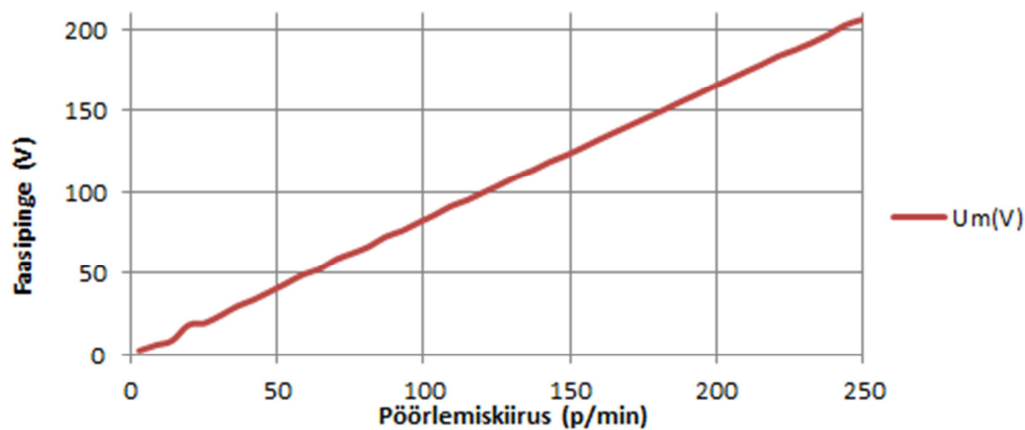
Joonis 8.2. Magnetvoo mõõtmistulemused õhupilus

Mõõtmised sooritati käsiaparaadiga ja nagu jooniselt näha, pole graafik kohati sujuv. Sellele vaatamata vastavad mõõdetud tulemused ootustele.

8.3.2. Tühijooksu- ja koormuskatse tulemused

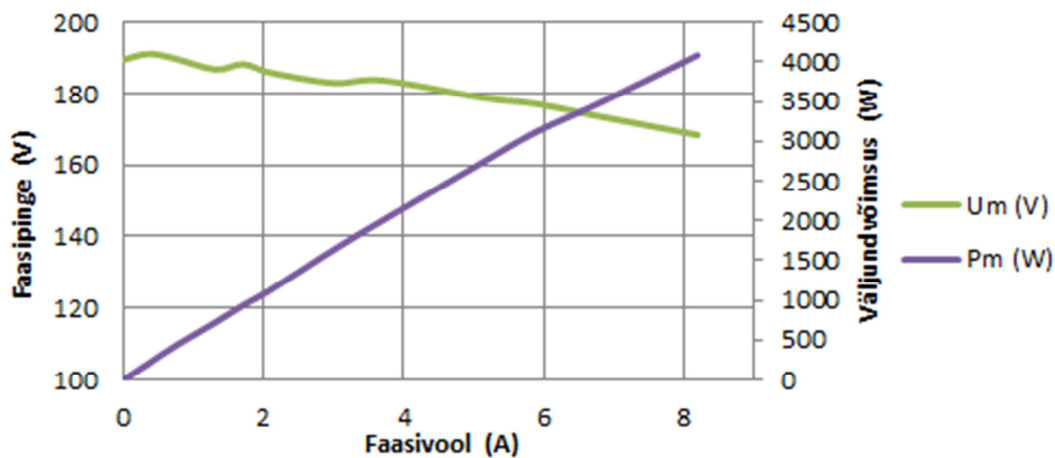
Tühijooksukatse viidi läbi erinevatel pöörlemiskiirustel. Tühijooksu katsetulemused on välja toodud joonisel 8.3.

Väikesed kõrvalekalded sirgest graafikust on tingitud sagedusmuunduri astmelisest kiiruse muutumisest. Graafikult näeme, et ootustele vastavalt kasvab faasipinge pöörlemiskiiruse suurenedes linearselt.



Joonis 8.3. Tühjooksukatse tulemused

Koormuskatse tulemused on esitatud joonisel 8.4. Mõõdetud tulemuste astmeline graafik on põhjustatud sagedusmuunduri astmelisest reguleerimisest. Kuna katsed viidi läbi sisetingimustes ja katseseadmehel puudus tuulegeneraatorile omane jahutus, lõppevad katsetulemused 8 A ja 4 kW juures. Mähiste kuumenemisest tingituna pole mõistlik riskida masina kahjustamisega.

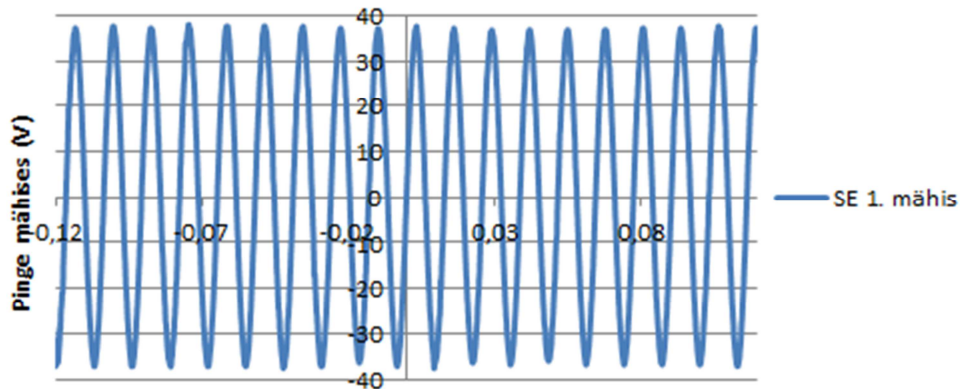


Joonis 8.4. Koormuskatse tulemused

Faasipinge langus koormuse kasvades on põhjustatud generaatori sisetakistuse ja voolu poolt tekitatud pingelangu tõttu. Sisetakistus katse käigus ei muutu ning võimsuse kasvades ja voolu suurenedes, suureneb pingelang.

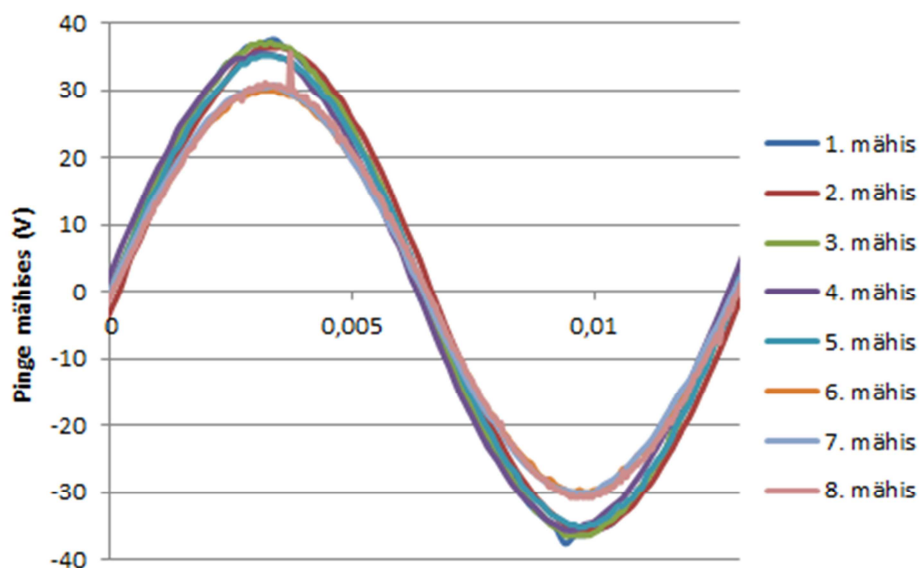
8.3.3. Staatilise ekstsentrilisuse katsetulemused

Ekstsentrilisuse katsetes mõõdeti samas faasis asuvate mähiste pinget ja faasipinget. Joonisel 8.5 on välja toodud ühe mähise pinget staatilise ekstsentrilisuse korral. Graafikult on näha, et väljundiks on ühtlase amplituudiga siinus. Võib järeldada, et rootori asukoht staatori suhtes ajas ei muutu ning rootor on fikseeritud.



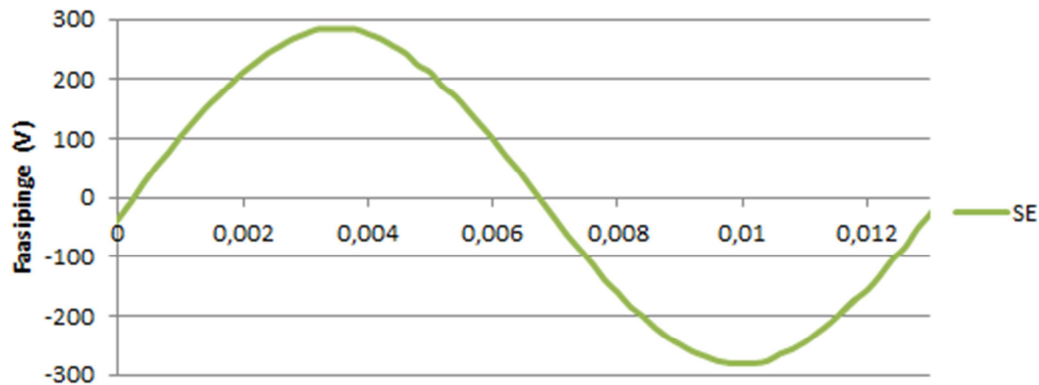
Joonis 8.5. SE pinge ühes mähises

SE korral rootori ja staatori tsentrite asukohad ei ühti ning õhupilu pole masina ulatuses võrdne, seega peab mähistes indutseeritud pinge erinevama. Jooniselt 8.6 on näha, et mähisepinged ühes faasis erinevad väga suurel määral. Seal, kus õhupilu on väiksem indutseeritakse suurem pinge ja vastupidi.



Joonis 8.6. SE pinged kõikides mähistes

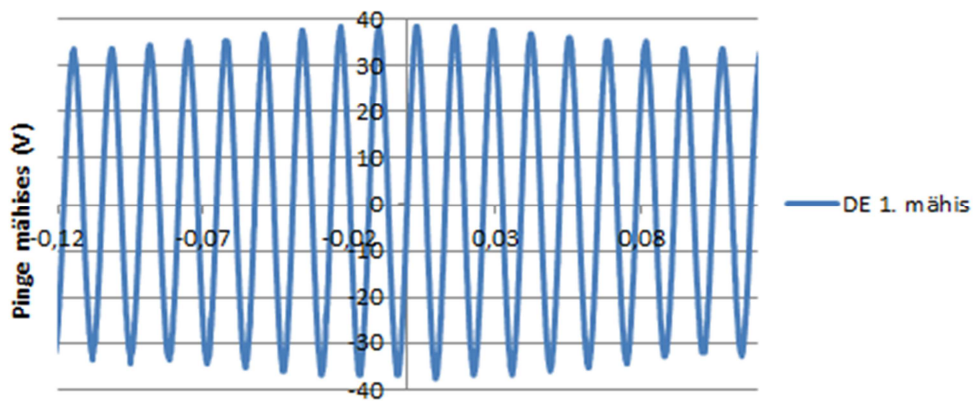
SE faasipinge on välja toodud joonisel 8.7. Graafikult on näha, et faasipinge on sinusoid ja mingeid kõrvalekaldeid ei esine.



Joonis 8.7. SE faasipinge

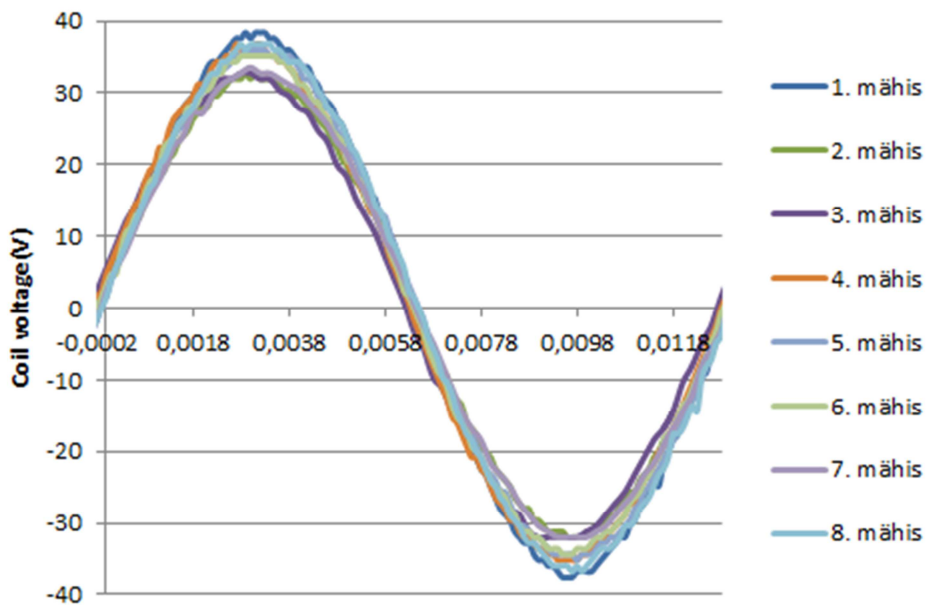
8.3.4. Dünaamilise ekstsentrilisuse katsetulemused

Esimeses mähises mõõdetud pinge tulemused DE korral on esitatud joonisel 8.8. Jooniselt on näha, et kuigi pinge mähises on siinus, pingeamplituud on muutuv. Võib järeldada, et rootori asukoht ajas muutub ja tegemist on masinaga, kus esineb ekstsentrilisus.



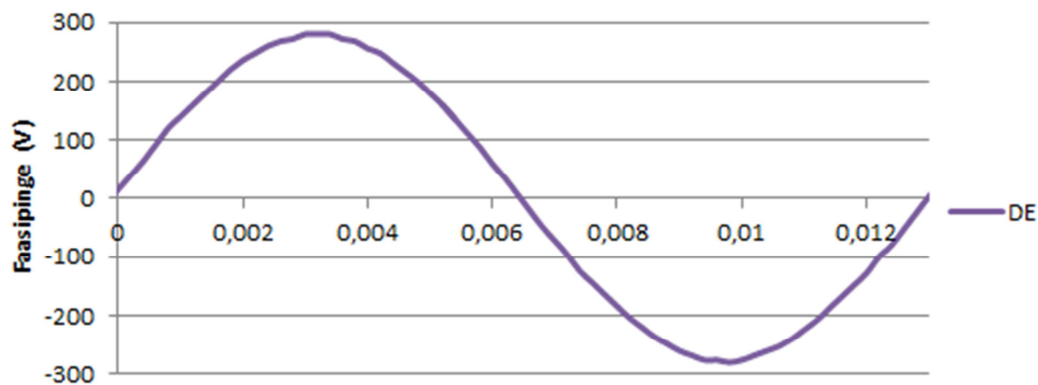
Joonis 8.8. DE pinge ühes mähises

Samamoodi nagu SE korral, esineb DE puhul mähistes pingete erinevus. Jooniselt 8.9 on selgelt näha, et magnetitele lähemal ja kaugemal olevates mähistes indutseeritakse erinevad pinged. Erinevus suurima ja vähima mähisepinge vahel on 6,4 V.



Joonis 8.9. DE pinged kõikides mähistes

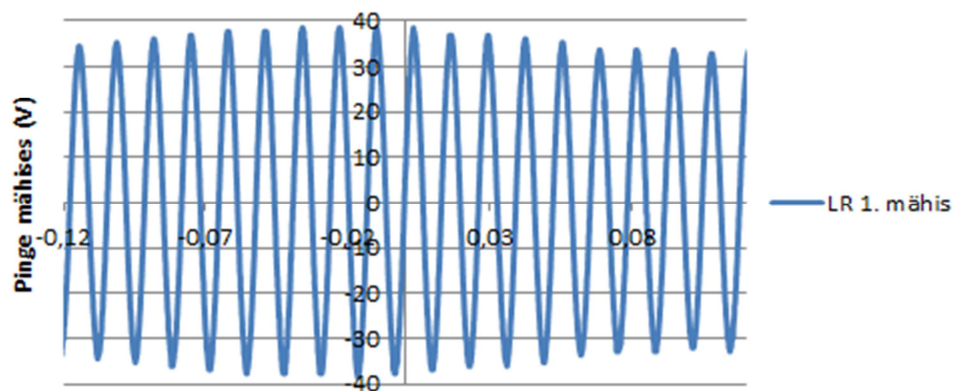
DE faasipinge on välja toodud joonisel 8.10. Graafik on ühtlane siinus ja olulisi kõrvalekaldeid ei esine.



Joonis 8.10. DE faasipinge

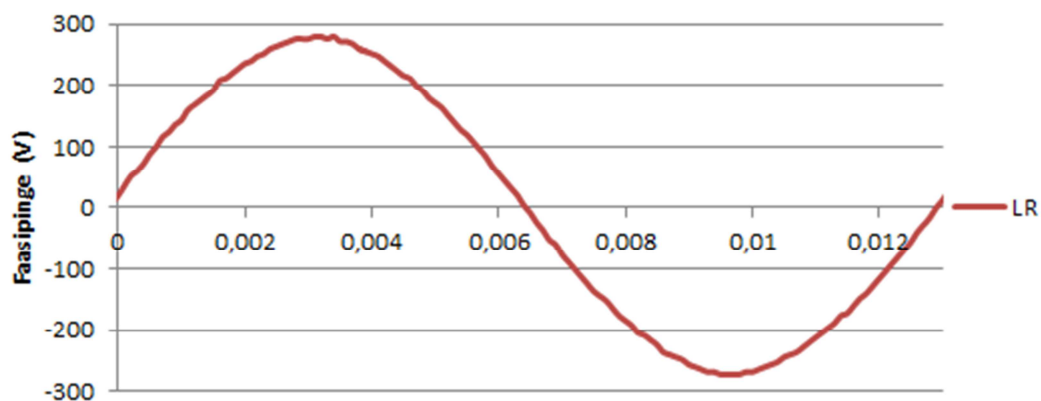
8.3.5. Asümmeetrilise kaalujaotuse katsetulemused

Asümmeetriline katse tehti võrdluseks teistega ja selle puhul kõiki mähisepingeid eraldi ei mõõdetud. Joonisel 8.11 on välja toodud ühe mähise pinge. Graafikult on näha, et lisaraskusega rootori puhul sarnaneb mähisepinge DE katses mõõdetud mähisepingega. Pinge on siinuseline, kuid amplituud muutub.



Joonis 8.11. Lisaraskusega rootori (LR) pinge ühes mähises

Lisaraskusega masina faasipinge graafik on esitatud joonisel 8.12.



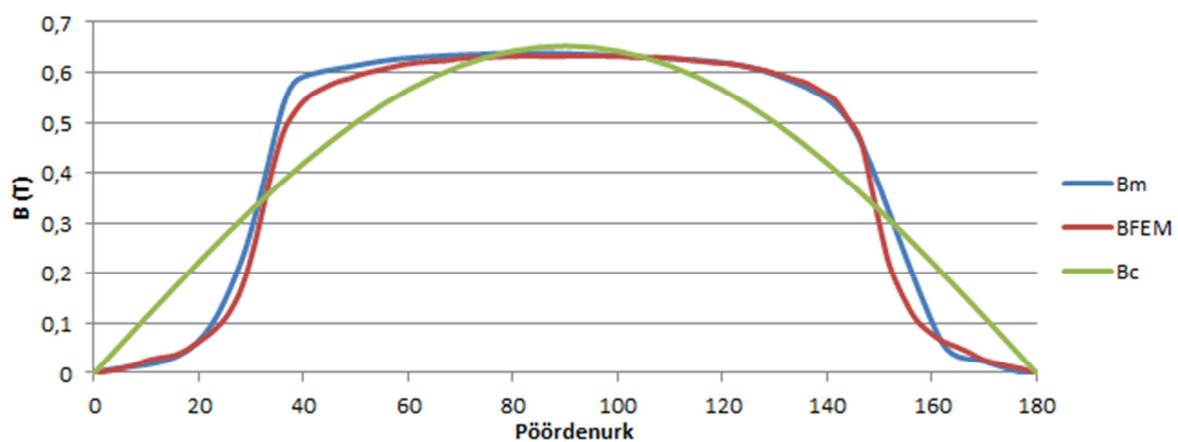
Joonis 8.12. LR faasipinge

LR faasipinge nagu ka mähisepinge sarnaneb DE katsel mõõdetud tulemustele, väljundpinge on ühtlane siinus ja kõrvalekaldeid ei esine.

9. KATSETULEMUSTE ANALÜÜS

9.1. Magnetvoo analüüs

Magnetvoo tulemused õhupilus on esitatud joonisel 9.1. Graafikult on näha, et mõõdetud ja simuleeritud tulemused kattuvad. Väikesed kõrvalekalded on põhjustatud mõõtmistäpsusest. Vektorpotentsiaali meetodil arvatud graafik erineb oluliselt teistest graafikutest selle tõttu, et kujutatud on ainult põhiharmoonilist.

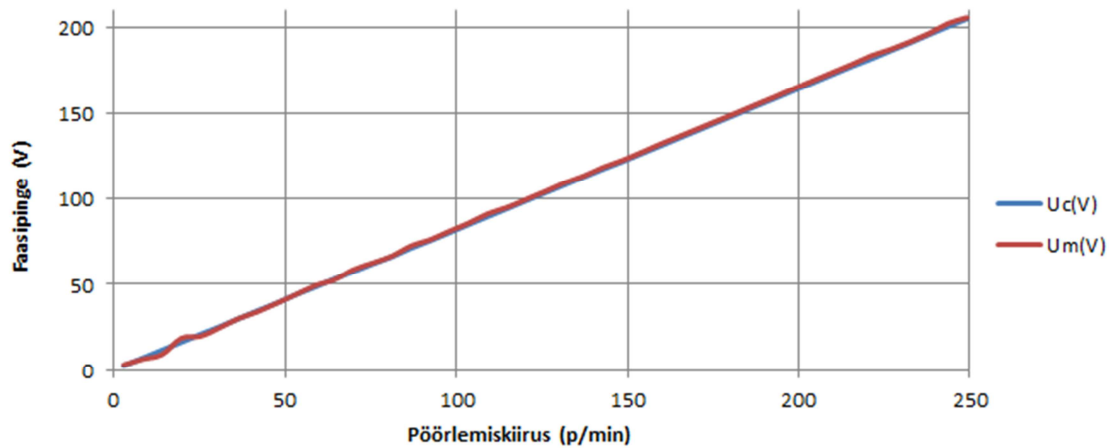


Joonis 9.1. Magnetvoo võrdlus. B_m – mõõdetud tulemused, B_{FEM} – simuleeritud tulemused ja B_c – arvatud tulemused

Graafikutelt on näha, et magnetvoo maksimumväärtused on ligilähedased ja samas suurusjärgus, mis tõestab, et simuleeritud ja arvatud tulemused vastavad realselt mõõdetud tulemustele.

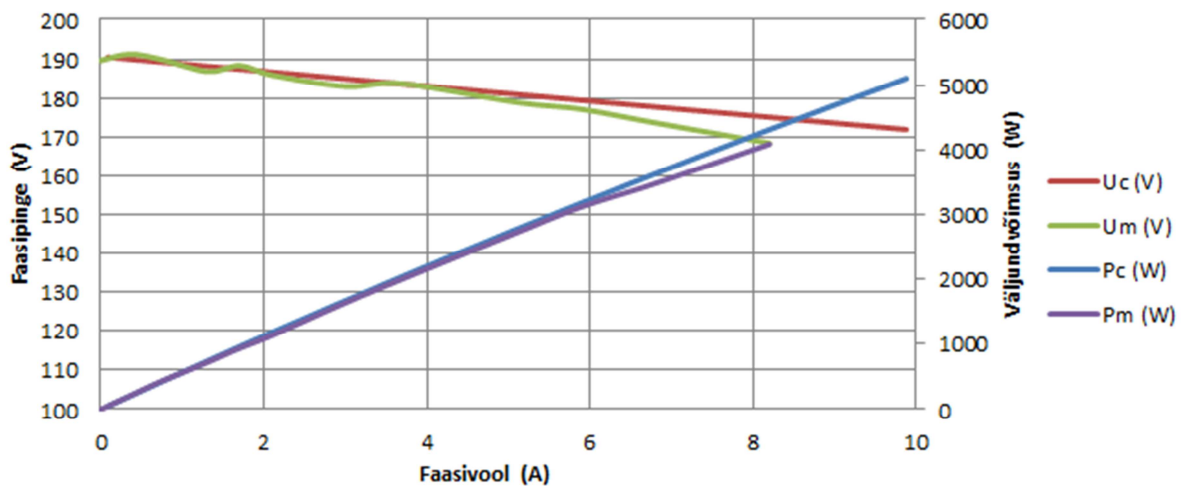
9.2. Tühijooksu- ja koormuskatse analüüs

Tühijooksukatse tulemused on välja toodud joonisel 9.2. Jooniselt on näha, et arvatud tulemused vastavad mõõdetud tulemustele ning pingegraafikud kattuvad. Mõõdetud tulemuste graafikul on näha, et esinevad väikesed kõrvalekalded, mis ei ole põhjustatud mõõteveast, vaid on tingitud sagedusmuunduri astmelisest reguleerimisest.



Joonis 9.2. Tühijooksukatse tulemused, kus U_c – arvutatud pinge, U_m – mõõdetud pinge

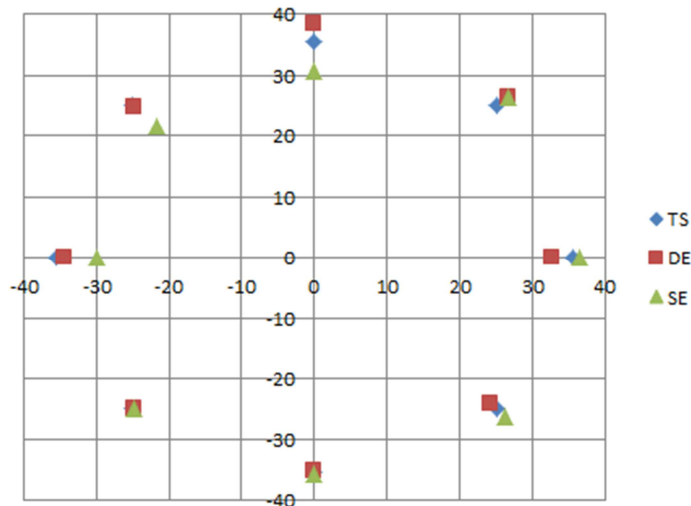
Koormuskatse tulemused on esitatud joonisel 9.3. Jooniselt on näha, et mõõdetud ja arvutatud tulemused langevad kokku väiksema võimsuse poolel. Võimsuse kasvades, tekib graafikutesse erinevus. Erinevus võib olla põhjustatud mähiste soojenemisest tingitud kadudest. Mõõdetud väärtused lõppevad 8 A piiril, kus väljundvõimsus saavutab 4 kW. Katsete lõppemine on põhjustatud mähiste soojenemisest ning kehvi jahutustingimusi arvesse võttes ei olnud katseid alustades plaanis masinat täiskoormuseni koormata.



Joonis 9.3. Koormuskatse tulemused, kus U_c – arvutatud pinge, U_m – mõõdetud pinge, P_c – arvutatud võimsus ja P_m – mõõdetud võimsus

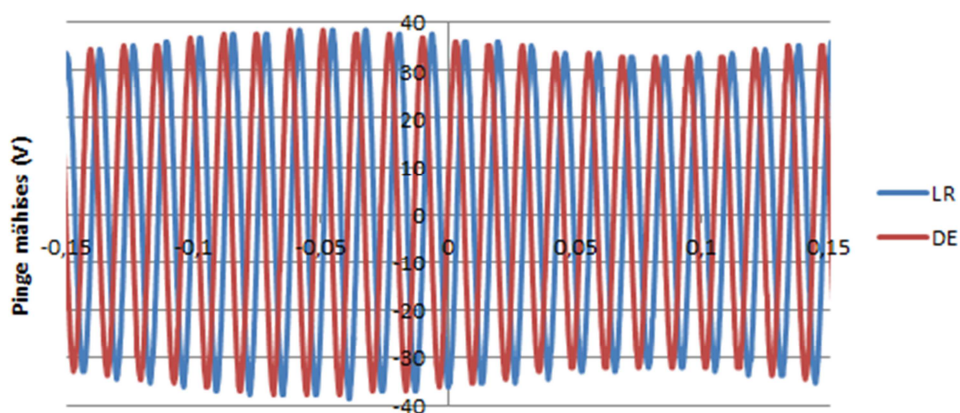
9.3. Ekstsentrilisuskatsete analüüs

Tsentreerimata generaatori katsetulemuste võrdlus terve masinaga on välja toodud joonisel 9.4, kus on esitatud ühes faasis olevate mähiste pinged. Jooniselt on näha, kuidas tsentreerimata rootor mõjutab oluliselt staatoril erinevates asukohtades olevates mähistes indutseeritud pingeid.



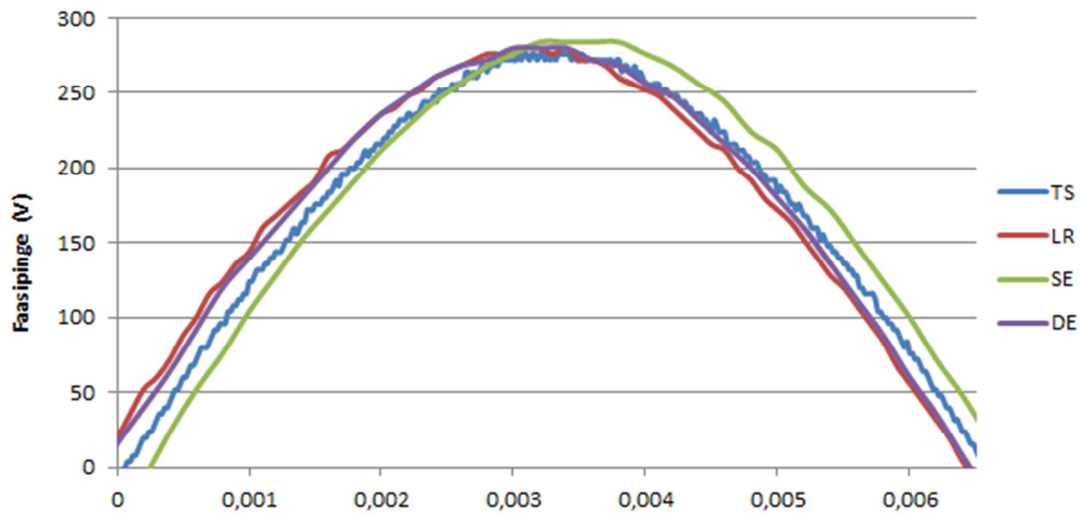
Joonis 9.4. Mähisepingete võrdlus. TS – tsentreeritud, DE – dünaamiline ekstsentrilisus, SE – staatiline ekstsentrilisus

Lisaraskusega rootori puhul ei mõõdetud kõikide mähiste pingeid. Lisaraskusega rootori ja DE võrdlus on välja toodud joonisel 9.5. Jooniselt on näha, et lisamass rootoril käitub väga sarnaselt võrreldava ekstsentrilise olukorraga. Pingeamplituudid on peaaegu võrdsed.



Joonis 9.5. Lisaraskusega (LR) ja dünaamilise ekstsentrilisuse (DE) mähisepingete võrdlus

Sarnaselt mähisepingetele esineb erinevus ka faasipingetes. Faasipingete võrdlus on näidatud joonisel 9.6. Graafikutelt on näha, et kõrgeim faasipinge on mõõdetud SE korral väärtusega 288 V. Tsentreeritud masina puhul on mõõdetud 276 V. DE ja lisaraskusega rootori faasipinged on praktiliselt sama amplituudiga.



Joonis 9.6. Faasipingete võrdlus

10. KOKKUVÕTE

Antud töös uuriti aeglasekäigulise püsomagnetgeneraatori ekstsentrilisust ja selle mõju masina väljundparameetritele. Töö käigus anti ülevaade püsomagnetmasinast ja nende kasutamisest tuulegeneraatorites. Kirjeldati NdFeB püsomagnetmaterjali ja toodi välja selle eelised ning puudused. Iseloomustati ekstsentrilisuse nähtust ja selle tekkepõhjuseid. Koostati generaatori matemaatiline mudel ja viidi läbi katsed Tallinna Tehnikaülikooli elektrimasinate laboris.

Generaatori matemaatilise mudeli koostamises kirjeldati magnetvoo analüüsi, arvatati elektrilised parameetrid ja väljundkarakteristikud.

Magnetvoo analüüsi tulemused on ootuspärased, varasemalt arvatud magnetvoo väärtused langevad kokku lõplike elementide meetodil leitud tulemustega ning katse käigus mõõdetud tulemustega.

Tühijooksu- ja koormuskatsetulemused tsentreeritud masinal vastavad ootustele ja kattuvad arvatud tulemustega. Väikesed kõrvalekalded mõõdetud tulemuste puhul on põhjustatud sagedusmuunduri astmelisest reguleerimisest. Joonisel 9.3 on näha, et suurematel võimsustel voolu kasvades pingeväärtus langeb. See on põhjustatud masina sisetakistusest ja voolu tõusust, pingelang suureneb.

Ekstsentrilisuse võrdlus generaatori ühe faasi mähistes on välja toodud joonisel 9.4. Graafikutelt on näha, et ekstsentrilisus mõjutab mähistes indutseeritud pingeid märgatavalt. Lisaks mähisepingete erinevusele on joonisel 9.6 näha, et faasipinged ekstsentrilistes olukordades tõusevad samuti, kuid pingeerinevus on väiksem kui 5%.

Tsentreeritud ehk tervel masinal on rootorile mõjuvad jõud tasakaalus, kuid ekstsentrilisuse korral on rootor tasakaalust väljas ning esinevad lisajõud. Jõudude analüüs on tehtud peatükis 7.3 ning tulemused välja toodud tabelis 7.2. Ekstsentrilises masinas esineb rootorile kordades suurem jõud kui tsentreeritud masinas. Lisajõud mõjutavad eelkõige laagreid ning põhjustavad nende kiiremat kulumist. Seega ekstsentrilisuse avastamine algfaasis on väga oluline eriti võimsamate masinate korral.

Ekstsentrilisus mõjutab püsomagnetgeneraatori tööd, kuid 1 mm tsentrist nihutatud rootoriga katseadmel jääb faasipinge erinevus alla 5%. Ekstsentrilisuse tõttu esinevad masinas lisajõud ja vibratsioonid, mis mõjutavad masina laagreid ja konstruktsiooni.

Käesolevas töös on ekstsentrilised katsed sooritatud tühijooksul, mistõttu on ebaselge ekstsentrilise generaatori käitumine koormustel. Tulevikutöodes tuleks sooritada ekstsentrilise generaatoriga katsed erinevatel koormustel ning uurida generaatori käitumist ja koormustel tekkivaid vibratsioone.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. B. M. Ebrahimi, J. Faiz, M. J. Roshtkhari „Static-, Dynamic-, and Mixed-Eccentricity Fault Diagnoses in Permanent-Magnet Synchronous Motors“ *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 11, Nov. 2009 – lk. 4727...4739.
2. A. Kilk „Paljupooluseline püsomagnetitega sünkroongeneraator tuuleagregaatidele“ Doktoritöö - Tallinn, Tallinna Tehnikaülikool, 2008.
3. A. Kallaste „Low Speed Permanent Magnet Slotless Generator Development and Implementation for Windmills“ Doktoritöö - Tallinn: TTÜ elektriainstituut ja jõuelektronika instituut, 2013.
4. A. Kallaste, A. Belahcen, A. Kilk, T. Vaimann „Analysis of the Eccentricity in a Low-Speed Slotless Permanent-Magnet Wind Generator“ *IEEE Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)*, 2012.
5. K. Tuttelberg, T. Vaimann, A. Kallaste „Analysis of a Slow-Speed Slotless Permanent Magnet Synchronous Generator“ *IEEE Energy (IYCE), 4th International Youth Conference on 2013*.
6. <http://www.femm.info/wiki/Download>. Vaadatud 05.01.14
7. R. Petrie „PERMANENT MAGNETS IN REVIEW“ Thomas and Skinner Inc. Indianapolis, Indiana – lk. 207...210.
8. Material of Magnet Technology Center at Prizztech Ltd.
9. P. Sekerak, V. Hrabovcova, M. Onufer, L. Kalames, P. Rafajdus, “Synchronous Motors with Different PM Materials” *Proceedings of the 9th International Conference – 2012 ELEKTRO*, vol. 3 - lk. 241...246.
10. B. Brusso, A. Rahman „History of Interior Permanent Magnet Motors“ *IEEE Industry Applications Magazine*, Jan/Feb 2013 – lk. 10...15.
11. A. Chen, R. Nilssen, A. Nysveen „Performance Comparisons Among Radial-Flux, Multistage Axial-Flux, and Three-Phase Transverse-Flux PM Machines for Downhole Applications“ *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 46, No. 2, March/April 2010 – lk. 779...789.
12. <http://www.masterresource.org/category/windpower/long-history/>. Vaadatud 15.02.14
13. <http://energy.gov/eere/history-wind-energy>. Vaadatud 15.02.14
14. <http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>. Vaadatud 16.02.14

15. <http://www.wwindea.org/webimages/WWEA%20Small%20Wind%20World%20Report%20Summary%202012.pdf>. Vaadatud 15.02.14
16. <http://www.tuuleenergia.ee/>. Vaadatud 16.02.14
17. J. Järvik, A. Kilk, V. Keskküla, A. Reivik, A. Oorn „Esimesed Eestis väljatöötatud väiketuulegeneraatorid“ // *Elektriala* 5/2005 – lk 9...10
http://www.volta.ee/volta/artiklid/failid/volta_elektriala_5-2005.pdf. Vaadatud 18.03.14
18. Kallaste, A.; Järvik, J.; Kilk, A. (2006). “Permanent magnet axialflux generator with toroidal winding.” *In: 5th International Conference "Electric power quality and supply reliability" : conference proceedings - August 23-26, 2006, Viimsi, Estonia: Tallinn: Tallinn University of Technology, 2006 - lk. 167...171.*
19. S. Shaw, S. Constantinides “Permanent Magnets: the Demand for Rare Earths“ *8th International Rare Earths Conference - November 2012*
20. S. Constantinides „Demand for rare earth materials in permanent magnets“ - *Arnold Magnetic Technologies - 2012*
21. M. Thompson „Practical Issues in the Use of NdFeB Permanent Magnets in Maglev, Motors, Bearings, and Eddy Current Brakes“ *Proceedings of the IEEE Vol. 97, No. 11, November 2009 – lk. 1758...1767.*
22. http://en.wikipedia.org/wiki/Eccentricity_%28behavior%29. Vaadatud 02.02.14
23. J. Cameron, W. Thomson and A. Dow, “Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors,” *Proceedings of IEE – Pt. B, May 1986, vol. 133, no. 3 - lk. 155...163.*
24. S. Nandi, S. Ahmed and H. Toliyat, “Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages,” *IEEE Transactions on Energy Conversion, September 2001, vol. 16, no. 3 – lk. 253...260.*
25. L. T. Rosenberg „Generator Eccentricity, Vibration, and Shaft Currents“ *AIEE Power Apparatus and Systems, 1955 – lk 465*

Air-Gap Eccentricity Analysis of Slow-Speed Slotless Permanent Magnet Synchronous Generator

R. Kangro, T. Vaimann, A. Kallaste, A. Belahcen

Abstract— This paper presents the analysis of electrical parameters in case of air-gap eccentricity in a novel slow-speed slotless permanent magnet synchronous generator. Construction of the novel generator has been explained. Laboratory tests with healthy machine and the machine with an eccentric rotor have been presented. Discussion on how the air-gap eccentricity affects the output parameters of the generator as well as how air-gap eccentricity can be detected has been presented. Different possible eccentricity cases of the machine have been explained and their possible effects on generator performance have been analyzed. Necessity of further study is pointed out.

Index Terms— Air-gap, neodymium, permanent magnet machines, wind energy generation

I. INTRODUCTION

Using wind energy to generate electricity is a highly actual topic. In the 21st century more and more renewable energy sources are installed due to the price increase and depletion of fossil fuels. Most of the energy produced by wind turbines comes from megawatt scale turbines but year to year small scale wind turbines have been gaining popularity. World Wind Energy Association's 2013 half year report about installed capacity of small scale wind turbines (6 W to 300 kW) shows the installed power of 576 MW [1] – which has increased by 23% compared to previous years result.

There are a lot of different designs for small scale wind generators. Recently more and more generators are being produced using permanent magnets. The advantages of implementation of permanent magnets in generators match perfectly with the requirements for building a wind turbine [2]:

- simple construction;
- light weight;
- slow speed;
- high power;
- variable speed;
- low torque;
- low price.

One of the solutions for a small scale generator is to use a slow-speed slotless permanent magnet (PM) synchronous machine. This solution allows us to build lightweight and low-speed generators without a gearbox. With simple construction, low construction cost is expected. Such a machine has been designed and built [3]. Illustration of the machine is presented in Fig. 1.

The construction of the machine eliminates the problem of cogging torque because of the toothless construction. Therefore the starting torque of the machine is relatively low. Due to simple slow speed machine design, large radius and the fact that the machine is relatively thin, the low mechanical stiffness of the construction raises the problem of air-gap eccentricity. Therefore the issue of eccentricity has to be analyzed.

Air-gap width and its uniformity is one of the key issues in the generator design. However, it is not clear how much does the air-gap eccentricity affect the performance of the electrical machine. It is undoubtedly important to take it into account during the design process.

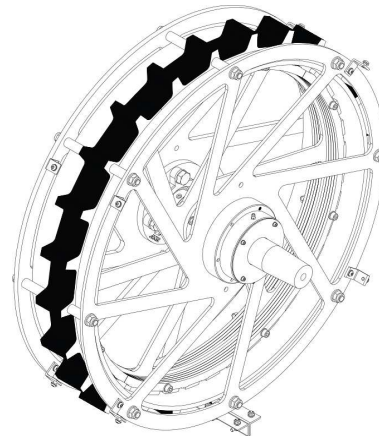


Fig. 1. Illustration of experimental generator

In this paper main types of eccentricities and their effect on output parameters are investigated by comparing them to a healthy machine. Fig. 2 shows possible air-gap eccentricities: static, dynamic and elliptic eccentricity. Different manufacturing inaccuracies are the main cause of air-gap eccentricity. These involve construction tolerances, bearings and shaft bending. To a certain extent eccentricity appears in every machine and may worsen during the operation. The inherent level of static or dynamic eccentricity is typically within 10% of the air-gap [4], [5].

The main problem caused by eccentricity is asymmetric magnetic flux density in the air-gap, which causes a

This paper has been supported by Estonian Ministry of Education and Science base financing fund (project „Design and Optimization Methodology for Electrical Machine-Drives“).

R. Kangro, A. Kallaste, T. Vaimann and A. Belahcen are with the Department of Electrical Engineering, Tallinn University of Technology, Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn, Estonia (e-mail: raitkangro@gmail.com, ants.kallaste@ttu.ee; toomas.vaimann@ttu.ee; anouar.belahcen@ttu.ee).

deviation of output voltage and current of the machine and also oscillations in the power of the machine. Therefore machines electrical parameters may not meet the designed ones. The oscillating power can cause unequal distribution of the load, which in turn causes local hot spots and wearing of coil insulation as well as additional forces that affect the bearings. Since every magnet on the rotor causes radial force, then with uniform air-gap the resultant of this force is balanced and equals to zero. In case of air-gap eccentricity, additional forces will be present and the resultant of the forces is not zero. This affects the bearings and cause faster wearing.

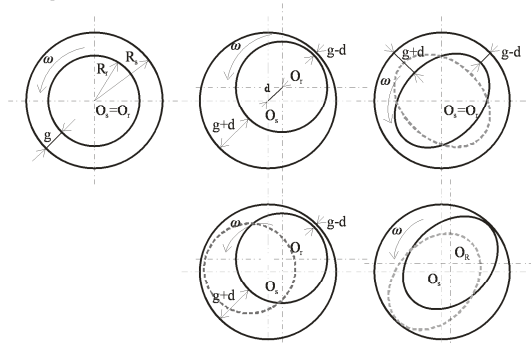


Fig. 2. Types of eccentricities: a) healthy; b) static; c) elliptic; d) static and elliptic e) dynamic [6]

This paper investigates static and dynamic air-gap eccentricities in a low-speed slotless permanent magnet generator. Experiments have been made by modifying the prototype to match different eccentricities. Results have been analyzed and compared to a healthy machine.

I. METHOD AND TESTING PRINCIPLE

Testing took place in the laboratory of electrical machines of the Department of Electrical Engineering at Tallinn University of Technology. During the testing process multiple experiments were carried out on the prototype machine. Firstly no-load and load tests and followed by different fault situations. The load test was carried out by applying various loads on the generator at rated speed. The no-load test was performed at different rotational speeds.

Fault situations were created by modifying a healthy machine. Rotor, or rather its mass center was shifted 1 mm from the original position to create different eccentricities. Choosing bigger eccentricity might cause a risk of damage to the machine since the air-gap width of the prototype is 2.5 mm and smaller might not give clear results.

Asymmetrical weight distribution was achieved by adding additional weight to a rotor spoke in a distance that rotor's mass center shifts 1 mm away from the center.

Static eccentricity, known as none coaxiality of rotor and stator, was achieved by lowering the stator yoke, regarding to the rotor by 1 mm.

Dynamic eccentricity, known as dislocated rotor, was achieved by lowering the rotor 1 mm, regarding to the shaft and stator.

All cases were investigated during nominal working situation, 230 rpm. Each fault case is compared to the healthy machine situation. During different fault situations output parameters of the prototype were measured.

II. FEM ANALYSIS

FEM analysis was made using software FEMM 4.2. For getting an understanding how much will rotor displacement affect the force between stator and rotor a full size layout of the prototype was constructed and it is shown in Fig 3. Round rotor is constructed of small straight magnet pole segments and the stator of straight winding segments. Because the prototype has a large radius it does not affect the experimental data significantly.

For a healthy machine force on x-axis was 0.733 N and on y-axis -2.654 N. Small deviations from balanced 0 N is acceptable, since the modelled rotor and stator are not a perfect circle.

After shifting the rotor from the center by 1 mm on the x-axis, the force values were: x-axis -621.101 N and on y-axis 1.656 N. There is a significant change in force between stator and rotor. This may greatly affect the physical aspect of the generator. Bearings have to tolerate much more load and may wear faster. Furthermore, this kind of fault situation may cause additional vibration. This modeling shows that eccentricity detection is very important especially on larger scale machines where forces are much higher than in the tested machine.

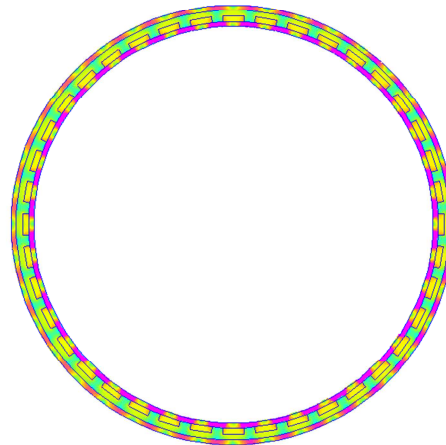


Fig. 3. Layout of the prototype in FEMM 4.2

III. TEST RESULTS

For the healthy machine, output characteristics were calculated and compared with test results. Generator output voltage at no-load in different rotational speeds is given in Fig. 4, where calculated and test results can be seen. As it can be read from Fig. 4, measured and calculated values are almost identical.

The load test was done at nominal rotational speed where generator was loaded using resistive load. Generator output voltage and power at different loads is given in Fig. 5. As can be seen from Fig. 5 there is a small difference between the calculation and test results, especially on higher load values. Calculated values differ from the test results, because simplifications in the calculation model, especially for the coil inductance calculation, were used. There are fluctuations in the voltage during the test, as the experiments were carried out with the machine at room temperature and the machine was heating up during the test.

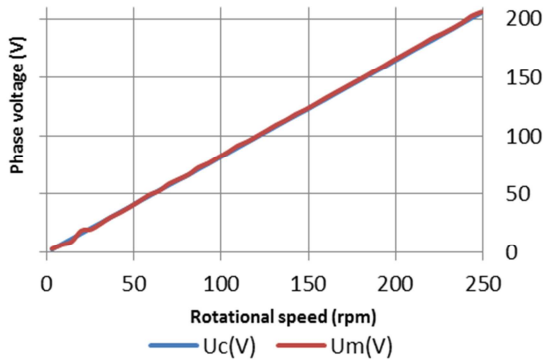


Fig. 4. No-load test, („m“ denotes measured and „c“ denotes calculated)

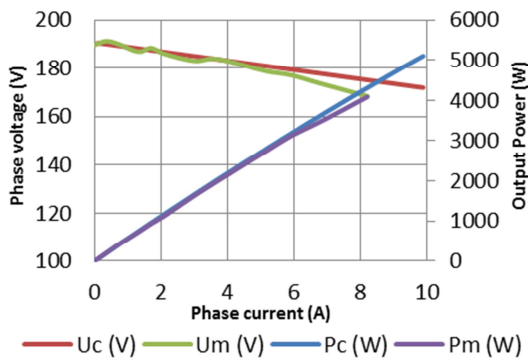


Fig. 5. Load test, („m“ denotes measured and „c“ denotes calculated)

To study static eccentricity at no-load, phase coils were measured separately. As can be seen from Fig. 6, static eccentricity will result in a big difference in phase coils. 1 mm shift in the air-gap gives 18% of voltage fluctuation in one phase coil, with the lowest voltage amplitude value in the coil being 30.8 V and maximum 37.2 V.

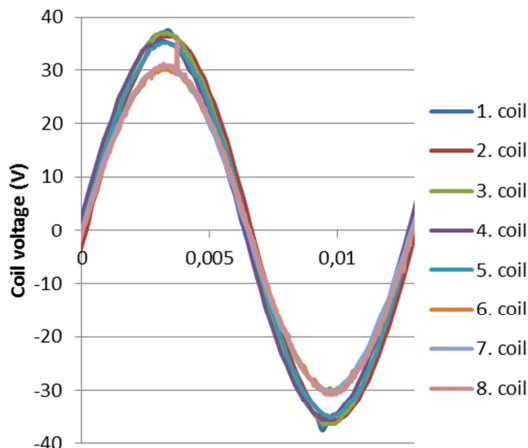


Fig. 6. Static eccentricity, coil voltages on one phase

Similarly to the static eccentricity, dynamic eccentricity tests were carried out and are presented in Fig. 7. Similarly to Fig. 6, there is a clear peak at a lower end, which shows that the rotor is out of balance.

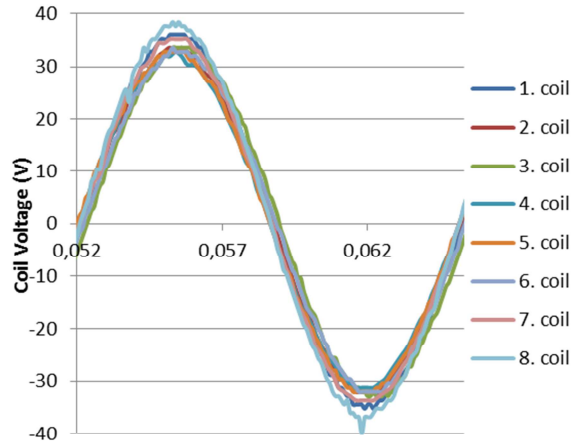


Fig. 7. Dynamic eccentricity, coil voltages on one phase

For comparison, the graph was constructed where separate coil voltages are presented in space at their real location, shown in Fig. 8. It can be seen on the figure how coil voltages on one phase are divided in a full circle under different eccentricity situations.

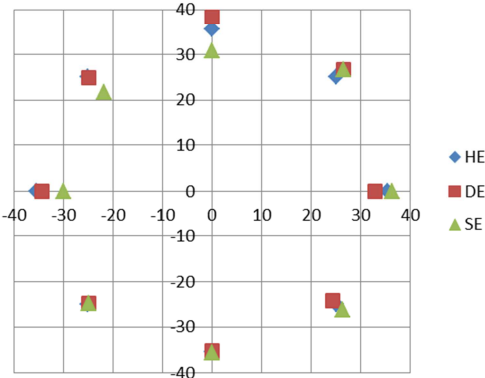


Fig. 8. Static (SE) and dynamic eccentricity (DE) compared to healthy machine (HE)

Calculations regarding different eccentricities have been previously carried out and presented in [6].

Additional test was carried out by adding a mass on one rotor spoke by creating asymmetrical weight distribution. It can be seen in Fig. 9 that additional weight affects the machine and its output voltage on one coil during the full turn of the rotor.

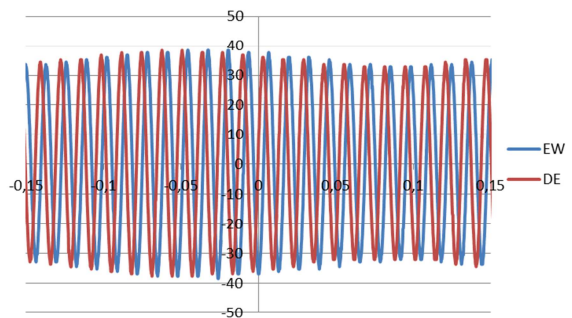


Fig. 9. Extra weight (EW) on rotor spoke and dynamic eccentricity (DE) comparison on one coil

Asymmetrical weight distribution test results are similar to the dynamic eccentricity test results. It can be said that an unbalanced rotor acts like dynamic eccentricity. Therefore it is very important that the rotor is balanced and this must be taken into account during the design process.

Previous test results showed that coil voltages under fault situation differ a lot. Fig. 10 shows one phase voltage during a half-period. It can be seen that also phase voltages have a difference. Healthy machine has the lowest phase voltage of 276 V and the machine where static eccentricity exists has the highest phase voltage of 288 V.

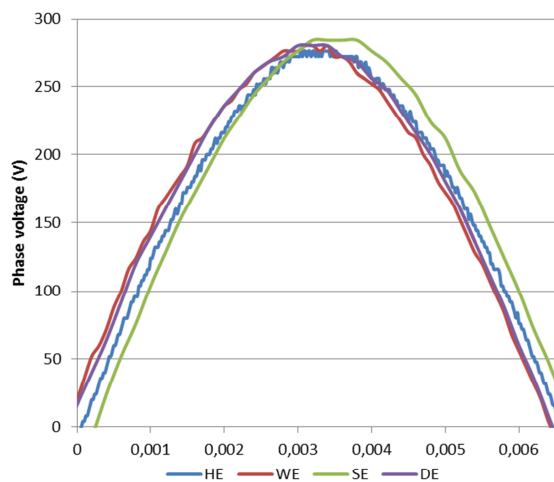


Fig. 10. Phase voltages during half-period, HE – healthy machine, WE – additional weight, SE – static eccentricity, DE – dynamic eccentricity

I. ANALYSIS AND CONCLUSION

Air-gap eccentricity of a slotless low-speed permanent magnet wind generator has been investigated and tests have been carried out on a prototype generator. Different types of eccentricity fault situations have been tested on the prototype and output parameters have been analyzed.

Previous investigation about the eccentricity effect on the output parameters of a slotless low-speed permanent magnet generator showed that any kind of eccentricity causes additional stress to the machine. Ultimately it shortens the lifetime of the machine and causes faster wearing of the bearings.

In case of static eccentricity it can be seen that output parameters of the machine were affected and difference between coil voltages is noticeable. Tests showed that phase voltage of the machine rises when compared to a healthy machine. It was found that force between stator and rotor increases significantly if the air-gap width is not uniform. As this force is not changing in time, it does not induce notable additional vibrations in the generator.

Dynamic eccentricity is very similar to the static eccentricity except the change of shift-vector in time, which causes additional vibration leading to faster wearing of the bearings. Output parameters were similar to static eccentricity, although phase voltage was somewhat lower but noticeably higher than in a healthy machine.

Asymmetric weight experiment shows that an unbalanced rotor acts like dynamic eccentricity including the output parameters.

In this paper, eccentricity study was carried out on a machine at no-load conditions. For the future work

eccentricity study using loaded machine is planned to be carried out. This will enable the investigation of the overloading of the coils and eccentricity effect on the machine efficiency. Also there is higher risk of local overheating of the machine when air-gap eccentricity is present, which needs to be investigated in a deeper manner.

ACKNOWLEDGMENT

Authors would like to thank My!Wind Llc for their help and support in the building of the prototype generator.

REFERENCES

- [1] World Wind Energy Association <http://www.wwindea.org>
- [2] A. Kallaste, J. Järvi, and A. Kilk, "Permanent magnet axialflux generator with toroidal winding," Proceedings of the 5th International Conference Electric Power Quality and Supply Reliability, 2006, pp. 167-171.
- [3] A. Kallaste, T. Vaimann, and O. Pabut, "Slow-speed ring-shaped permanent magnet generator for wind applications," Proceedings of the 11th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering" and "Doctoral School of Energy and Geotechnology II", 2012, pp. 66-69.
- [4] J. Cameron, W. Thomson and A. Dow, "Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors," Proceedings of IEE – Pt. B, May 1986, vol. 133, no. 3, pp. 155-163.
- [5] S. Nandi, S. Ahmed and H. Toliyat, "Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages," IEEE Transactions on Energy Conversion, September 2001, vol. 16, no. 3, pp. 253-260.
- [6] A. Kallaste, A. Belahcen, A. Kilk, and T. Vaimann, "Analysis of the eccentricity in a low-speed slotless permanent-magnet wind generator," Proceedings of the 8th International Conference Electric Power Quality and Supply Reliability, 2012, pp. 47-52.

BIOGRAPHIES

Rait Kangro was born in Valga in 1989 and received his BSc degree in electrical engineering from Tallinn University of Technology, Estonia in 2011. He is currently a Master's student in Tallinn University of Technology Department of Electrical Engineering.

Currently he is working as a sales engineer in UTU Powel Ltd.

Toomas Vaimann was born in Pärnu, Estonia, in 1984 and received his BSc and MSc degrees in electrical engineering from Tallinn University of Technology, Estonia, in 2007 and 2009 respectively. He is currently a PhD student in Tallinn University of Technology Department of Electrical Engineering.

He has been working in several companies as an electrical engineer. Presently he is working at the Tallinn University of Technology Department of Electrical Engineering as an engineer.

His main research interests include diagnostics of electrical machines.

Ants Kallaste was born in Pärnu, Estonia in 1980 and received his BSc, MSc and PhD degrees in electrical engineering from Tallinn University of Technology, Estonia, in 2004, 2006 and 2013 respectively. He has been an IEEE member since 2013.

He has been working in several companies as an electrical engineer. Presently he is working at the Tallinn University of Technology Department of Electrical Engineering on researcher position and is the Head of Chair of Electrical Machines.

His main research interest includes PM machine design and wind generators.

Anouar Belahcen was born in Morocco, in 1963. He received the B.Sc. degree in physics from the University Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fes, Morocco, in 1988 and the M.Sc. (Tech.) and Doctor (Tech.) degrees from Helsinki University of Technology, Finland, in 1998, and 2004, respectively. From 2008 to 2013, he has been working as Adjunct Professor in the field of coupled problems and material modeling at Aalto University, Finland. Since 2011 he is Professor of electrical machines at Tallinn University of Technology, Estonia and in 2013 he became Professor of Energy and Power at Aalto University. His research interest are numerical modeling of electrical machines, especially magnetic material modeling, coupled magnetic and mechanical problems, magnetic forces, and magnetostriction.