

**3D PRINDITUD MAGNETMATERJALIDE
MAGNETILISITE OMADUSTE MÄÄRAMINE**

**EVALUATION OF THE MAGNETICAL PROPERTIES OF 3D
PRINTED MAGNETIC MATERIALS**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Joonas Aru

Üliõpilaskood 185677EAAB

Juhendaja: Hans Tiismus, doktorant-
nooremteadur

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

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

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina _____ (autori nimi)

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

_____ ,

(lõputöö pealkiri)

mille _____ juhendaja _____ on

(juhendaja nimi)

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

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

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

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

_____ (kuupäev)

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

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Joonas Aru

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: 3D prinditud magnetmaterjalide magnetiliste omaduste määramine

Kuupäev:

55 lk

18.05.2022

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): doktorant-nooremteadur Hans Tiismus

Töö konsultant (konsultandid):

Sisu kirjeldus:

Lõputöö eesmärgiks oli määrata 3D prinditud magnetsüdamike termotöötamise ja erineva topoloogia mõju pehmetele magnetomadustele. Selleks prinditi SLM 3D printeri abil viis täistoroidi, mida lõõmutati erinevatel temperatuuridel ja kolm erineva topoloogiaga toroidi. Katsete käigus selgus, et kõige optimaalsem lõõmutamistemperatuur on 1200 °C ja temperatuuri tõstmisel hüstereesikaod ei vähene. Prinditud õhupilude abil oli 50 Hz juures võimalik langetada magnetsüdamiku kogukadusid 1 T juures 81 % ja 1,5 T juures 74 %. Siiski moodustasid pöörisvoolukaod 1 T juures 52,88 % ja 1,5 T juures 79,09 % kogukadudest

Töö käigus mõõdetud materjali omadusi kasutatakse edasistes töodes elektrimasinate projekteerimiseks ja modelleerimiseks. Madalatel väljatugevustel (1 T) saavutati võrdväärsete omadused laialdaselt kasutatavate elektrotehnilistele laminatsioonidele. Edasine töö projektis keskendub uudsete elektrimootorite arendamisele, mis kasutavad ära head 3D printimise ruumilist täpsust, et toota keerulise topoloogiaga kergemaid ja efektiivsemaid mootoreid.

Märksõnad: 3D printimine, SLM, hüstereesikaod, pöörisvoolukaod, magneetimisköver, lõõmutamine

ABSTRACT

Author: Joonas Aru

Type of the work: Bachelor

Title: Evaluation of the magnetical properties of 3D printed magnetic materials

Date: 17.05.2022

55 pages

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Early Stage Researcher Hans Tiismus

Consultant(s):

The aim of the thesis was to determine the effect of heat treatment and different topologies on the soft magnetic properties of 3D printed magnetic cores. For this purpose, five solid toroids were printed using an SLM 3D printer, annealed at different temperatures and three toroids with different topologies were printed. The experiments showed that the most optimal annealing temperature is 1200 °C and that increasing the temperature does not decrease the hysteresis losses. Using printed air gaps at 50 Hz, it was possible to reduce the total losses of the magnetic core by 81% at 1 T and 74% at 1.5 T. However, eddy current losses were still 52,88 % and 79,09 % of the total losses at 1 T and 1,5 T.

The material properties measured in this work will be used in further work on the design and modelling of electrical machines. At low field strengths (1 T), equivalent properties to those of widely used electrical laminations were achieved. Future work on the project will focus on the development of novel electric motors that take advantage of the high spatial accuracy of 3D printing to produce lighter and more efficient motors with complex topologies.

Keywords: 3D printing, SLM, hysteresis loss, Eddy current loss, magnetization curve, annealing

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	3D prinditud magnetmaterjalide magnetiliste omaduste määramine
Lõputöö teema inglise keeles:	Evaluation of the magnetical properties of 3D printed magnetic materials.
Üliõpilane:	Joonas Aru, 185677EAAB
Eriala:	Elektroenergeetika ja mehhatroonika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Hans Tiismus
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	24.06.2022
Lõputöö esitamise tähtaeg:	18.05.2022

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Elektrimasinate praegune tootmisviis seab masinatele üsna kindlad piirangud kuju ja omaduste osas. Seoses metalli 3D printimise võimalusega on võimalik teha täpselt selleks kasutuseks sobiv elektrimasin, rakendades selleks erinevaid kujusid ja sulameid. Näiteks on võimalik printida äärmuslikele temperatuuridele või rõhkudele vastupidavaid sulameid, samuti on võimalik teha eri kujulisi ja seest õõnsaid detaile. Nii on võimalik teha kergeid ja rasketesse tingimustesse sobivaid elektrimasinaid, mida saab kasutada näiteks lennunduses ja kosmosetööstuses. Lisaks on 3D printimine materjali osas kulutõhusam, kuna tootmises ülejäänud jäädet, ehk metalli pulbrit saab kohe uuesti kasutada.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on uurida 3D prinditud magnetmaterjalide omadusi ja hinnata nende kasutamise võimalusi elektrimasinates.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Kuidas sõltuvad magnetmaterjalide omadused katsekeha topoloogiast
- Kuidas sõltuvad magnetmaterjalide omadused termotöötlustest
- Kui efektiivne on 3D prinditud magnetmaterjalide kasutamine elektrimasinates
- Kus võiks olla 3D prinditud magnetmaterjalide sisaldavate elektrimasinate kasutusala

4. Lähteandmed

Lähteandmeteks on Tallinna Tehnikaülikoolis 3D prinditud magnetmaterjalide mõõtetulemused. Võrdluses kasutatavate klassikalisel meetodil toodetud materjalide andmed leitakse kataloogidest ja eelnevatest uurimustöödest.

5. Uurimismeetodid

Töö keskendub prinditud katsekehade elektromagnetiliste omaduste määramisele. Prinditud toroidsete trafosüdamike magnetahela parameetrid määratakse katseliselt vastavalt rahvusvahelistele standarditele. Uuritakse nii magnetvoo tihedust kindlatel väljatugevustel, kui ka magnetsüdamiku kadusid. Katsed teostatakse elektrimasinate uurimisrühma teaduslaboris. Vajalik andmetöötlus ja arvutused matemaatikapakettis Matlab. Saadud tulemusi võrreldakse nii teiste prinditud materjalide (võrdlusandmed teaduslikust kirjandusest), kui ka kommertsiaalsete materjalidega (võrdlusandmed tootjate kataloogidest).

6. Graafiline osa

Graafiline osa on tööpõhiosas välja toodud tekstijoonistena, lisades kajastatakse katsete pilte ning teisi suuremõõtmelisi skeeme või jooniseid.

7. Töö struktuur

- Eessõna
- Sissejuhatus
- Magnetmaterjalide teoreetilised alused
- 3D prinditud magnetmaterjalide omaduste määramine
- 3D prinditud magnetmaterjalide kasutusvõimalused elektrimasinates
- 3D prinditud magnetmaterjalide võrdlus klassikaliste magnetmaterjalidega
- Järeldused
- Kokkuvõte
- Kasutatud kirjandus
- Lisad

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Peamiselt viidatakse töös teadusartiklitele – seoses töö uudsusega:

[1] M. U. Naseer, A. Kallaste, B. Asad, T. Vaimann, and A. Rassõlkin, "A Review on Additive Manufacturing Possibilities for Electrical Machines," *Energies*, vol. 14, no. 7, p. 1940, Mar. 2021, doi: 10.3390/en14071940.

[2] G. Ouyang, X. Chen, Y. Liang, C. Macziewski, and J. Cui, "Review of Fe-6.5 wt%Si high silicon steel—A promising soft magnetic material for sub-kHz application," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 481, no. January, pp. 234–250, 2019, doi: 10.1016/j.jmmm.2019.02.089.

[3] R. Wrobel and B. Mecrow, "A Comprehensive Review of Additive Manufacturing in Construction of Electrical Machines," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 35, no. 2, pp. 1054–1064, 2020, doi: 10.1109/TEC.2020.2964942.

[4] T. N. Lamichhane, L. Sethuraman, A. Dalagan, H. Wang, J. Keller, and M. P. Paranthaman, "Additive manufacturing of soft magnets for electrical machines—a review," *Mater. Today Phys.*, vol. 15, p. 100255, 2020, doi: 10.1016/j.mtphys.2020.100255.

[5] H. Tiismus, A. Kallaste, A. Belahcen, T. Vaimann, A. Rassõlkin, and D. Lukichev, "Hysteresis Measurements and Numerical Losses Segregation of Additively Manufactured Silicon Steel for 3D Printing Electrical Machines," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 18, p. 6515, 2020, doi: 10.3390/app10186515.

9. Lõputöö konsultandid

Ants Kallaste.

10. Töö etapid ja ajakava

Kirjanduse kogumine ja sellega tutvumine (30.11)

Teoreetilise osa kirjutamine (30.12)

3D printitud magnetmaterjalidega mõõtmiste teostamine (01.02)

Mõõtmistulemuste analüüs (16.02)

3D printitud magnetmaterjalide kasutusvõimaluste analüüs elektrimasinates (06.03)

Uuringutulemuste võrdlus klassikaliste magnetmaterjalidega (13.03)

Töö tulemuste kirjeldamine (27.03)

Järelduste kirjutamine, kokkuvõtte koostamine (3.04)

Töö esimene versioon valmis, juhendajale läbilugemiseks saatmine (15.04)

Paranduste sisseviimine, juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (5.05)

Töö lõplik versioon valmis (16.05)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	11
SISSEJUHATUS	12
1. 3D PRINDITUD MAGNETMATERJALIDE TEOREETILISED ALUSED	14
1.1 3D printimise tehnoloogia	14
1.2 3D printimise eelised	15
1.3 Varasemalt tehtud tööd	17
1.4 Magnetmaterjalid	18
1.4.1 Magnetmaterjalide liigitus	18
1.4.2 Magnetiline dipool	18
1.4.3 Diamagnetism	19
1.4.4 Paramagnetism	20
1.4.5 Ferromagnetism	20
1.4.6 Magnetilised domeenid	21
1.4.7 Hüsterrees	22
1.4.8 Magnetmaterjali energiakaod	24
2. 3D PRINDITUD MAGNETMATERJALIDE OMADUSTE MÄÄRAMINE	26
2.1 Meetodid	26
2.2 Katse	29
2.2.1 Katseskeem	29
2.2.2 Toroidide printimine	31
2.2.3 Toroidide lõõmutamine	36
2.3 Katsetulemused	37
2.3.1 Täistoroidide tulemused	37
2.3.2 Õhupiludega toroidide tulemused	46
2.4 Katsetulemuste võrdlus	49
2.5 3D prinditud materjali kasutusvõimalused	51
KOKKUVÕTE	52
KASUTATUD KIRJANDUS	54

EESSÕNA

Lõputöö teema oli välja pakutud Tallinna Tehnikaülikooli kodulehel Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi elektrimasinate uurimisrühma poolt. Teema osutus valituks tema aktuaalsuse, perspektiivikuse ja autori isikliku huvi tõttu. Katsekehade 3D printimine, ettevalmistamine ja katse viidi läbi Tallinna Tehnikaülikoolis.

Töö autor soovib eriti tänada juhendajat, Hans Tiismust, kes oli alati nõuga abiks ning vastas väga operatiivselt tekkinud küsimustele.

SISSEJUHATUS

Elektrimasinaid sisaldavad magnetmaterjale, mille omadused määravad suures osas selle masina töökarakteristiku ja talitluse. Praegused tootmisviisid seavad aga masinatele üsna kindlad piirangud kuju ja omaduste osas. Samuti on klassikalisel meetodil toodetud elektrimasina prototüübi loomine üsna pikk ja kulukas protsess. Seetõttu on väga keeruline kommertsiaalsete magnetmaterjalidega masinaid teha kompaksemaks ja efektiivsemaks sõltuvalt kasutuskohast.

Seoses 3D printimise tehnoloogia arenguga on võimalik lisaks erinevatele plastikutele printida ka metalli. 3D printimise abil saab lihtsasti printida magnetmaterjale otse CAD failist ilma mitmete vahesammudeta nagu klassikalise meetodi puhul. Sarnaselt plastiku printimisele, lisatakse ka metalli printimiseks materjali kiht kihi haaval. Praeguses arengujärgus on aga metalli printerid oluliselt keerukamad ning kallimad kui plastiku printerid. Hetkel on elektrimasinate südameke printimiseks kõige sobivam selektiivse lasersulatuse meetod. Selle meetodi abil saab sulatada suure puhtuse ja täpsusega detaile, mis on elektrimasinate valmistamisel kriitilise tähtsusega [1]. Teiste metalliprintimise meetoditega oleks võimalik detaile valmistada kiiremini, kuid nende abil poleks võimalik printida nii keerukaid struktuure ning detailid vajaksid rohkem järeltöötlust [1].

3D printimise abil saab luua erineva kuju ja sulamiga magnetmaterjale vastavalt täpsele kasutusvajadusele. Näiteks saab printida erikujulisi ja seest õõnsaid detaile. Nii on võimalik teha samade näitajatega kompaksemaid ning kergemaid elektrimasinaid mida saab kasutada näiteks kosmosetööstuses, lennunduses ja meditsiinis. 3D printimine on ka logistiliselt lihtsam, kuna toormaterjaliks on vaja vaid metallipulbrit. Klassikalisel tootmisel on vaja mitmeid pooltooteid, mida tuleb töödelda ja omavahel liita ühe detaili valmistamiseks. Seega 3D printimisel on vaja vähem erinevaid seadmeid ja oskustöölisi keeruliste detailide valmistamiseks. Lisaks tekib 3D printimise käigus vähem jääkmaterjali kui traditsioonilisel töötlemisel, kus materjali lõigatakse vähemaks kuni soovitud kuju saavutamiseni. 3D printimisel on jääkmaterjaliks metallipulber, mida saab peale sõelumist ja osaliselt uue pulbriga segamist uuesti kasutada.

3D printitud materjali omadused sõltuvad tugevalt printimise ja järeltöötamise parameetritest. Seetõttu on vaja uurida erinevate printimisparameetrite, topoloogia ja lõõmutustemperatuuri mõju 3D printitud magnetmaterjalidele, et leida kõige sobivam ja kulutõhusam materjal konkreetsele kasutusale. Elektrimasina projekteerimiseks ja selle töö modelleerimiseks on vaja teada magnetmaterjalide omadusi. Eelnevalt on küll sarnaseid katseid 3D printitud magnetmaterjalidega tehtud kuid kuna teema on üsna

uudne ja printimiseks on võimalik kasutada väga palju erinevaid parameetreid on veel mitmed aspektid põhjalikult uurimata.

Selle töö eesmärkideks on:

- Katseliselt määrata erinevate termotöötluste mõju 3D prinditud magnetsüdamike pehmetele magnetomadustele
- Katseliselt määrata õhupilude mõju 3D prinditud magnetsüdamike pöörisvoolukadudele
- Leida 3D prinditud materjali magneetimiskõverad, selleks et seda materjali saaks kasutada elektrimasinate projekteerimiseks ja modelleerimiseks
- Võrrelda 3D prinditud materjali kommertsiaalsete laminatsioonidega

Selleks prinditakse erineva topoloogiaga katsekehad, ühesuguse topoloogiaga materjalide puhul kasutatakse erinevat termotöötlust. Prinditud toroidide parameetrid määratakse katseliselt vastavalt rahvusvahelistele standarditele elektrimasinate uurimisrühma teaduslaboris. Leitakse magnetsüdamiku kaod ja magnetiline induktioon kindlatel väljatugevustel. Andmetöötlus ja arvutused teostatakse matemaatikapaketi Matlab.

Töö teooria osas uuritakse kõigepealt 3D printimise eeliseid võrreldes klassikaliste tehnoloogiatega. Sealjuures uuritakse ka 3D printimise erinevaid tehnoloogiaid ja nende erinevusi. Teooria teises osas antakse ülevaade juba tehtud katsetest ning võimalustest, kuidas oleks võimalik magnetmaterjali kadusid vähendada. Selle osa lõpus antakse ülevaade magnetmaterjalide füüsikalistest omadustest ning kuidas leitakse magnetmaterjalide parameetreid.

Töö teises osas esitatakse katse skeem ja kirjeldatakse katse käiku. Järgnevalt kirjeldatakse katsekehade printimise ja ettevalmistamise protsessi. Seejärel toimub saadud katsetulemuste põhjal graafikute koostamine ja katsetulemuste analüüs.

Töö tulemusi võrreldakse nii teiste prinditud materjalide (võrdlusandmed teaduslikust kirjandusest), kui ka levinud magnetmaterjalidega, mille andmed leitakse kataloogidest, standarditest ja eelnevatest uurimustöödest. Töö lõpus antakse hinnang uuritud materjalide kasutusvõimaluste kohta elektrimasinates.

1. 3D PRINDITUD MAGNETMATERJALIDE TEOREETILISED ALUSED

1.1 3D printimise tehnoloogia

3D printida saab kõiki keevitatavaid materjale, sealhulgas alumiinium, raud, titaan, kuld ja hõbe. Metallide printimine algab 3D CAD joonisest, mis on jagatud paljudeks õhukesteks kihtideks. Iga järgnev kiht prinditakse eelmise kihi peale järgides eelnevalt printerisse sisestatud 3D mudelit. Metallide printimise ühe meetodina saab kasutada selektiivse sulatuse tehnoloogiat PBF (*Powder Bed Fusion*). Selle tehnoloogia üheks alaliigiks on selektiivse lasersulatuse meetod SLM (*Selective Laser Melting*), mille abil on ka antud töö katsetavad magnetmaterjalid prinditud. SLM meetodi puhul kasutatakse algmaterjaliks metallipulbrit, mis kantakse õhukese kihina tööplatvormile. Järgnevalt sulatakse laseri abil algmaterjali osakesed kokku vastavalt enne printerisse laetud CAD mudeli põhjal. Kui üks kiht on valmis saanud liigub seadme tööplatvorm järgmise kihi jaoks allapoole (umbes 20-75 μm [2]) ja kantakse peale järgmine metallipulbri kiht mis sulatakse eelmise kihi külge laseri abil vastavalt joonisele. Nii jätkatakse kihtidega kuni detaili valmimiseni. Kihi paksus on määratletud laseri sulatussügavusega, iga järgnev kiht peab sulama teise külge, et tekiks ühtne detail. Selektiivse sulatuse meetod on sobilik keerukate ja suure tihedusega detailide tootmiseks [3]. Kuna suure võimsustihedusega elektrimasinate osade tootmine nõuab suurt täpsust ja keerukaid struktuure, sobib see meetod kõige paremini, olenemata tema aeglasest printimiskiirusest [1]. Samuti arvatakse, et selektiivse sulatuse tehnoloogia on parim mitme materjali printimise võimekusega tehnoloogia lähitulevikus [1].

Teiseks metallide printimise meetodiks on materjalide pressimise meetod. Selle meetodi nimeks on FDM (*Fused Deposition Modeling*) või FFF (*Fused Filament Fabrication*) ja toormaterjaliks kasutatakse metallipulbrit koos siduainega. Toormaterjal surutakse läbi printeri pea peene joana printimisalusele või eelnevalt prinditud kihile, järgmise kihi printimiseks tõuseb printeri pea kõrgemale [4]. Protsess kordub kuniks detaili kõik kihid on prinditud. Materjal tuleb peale printimist paagutada, kuna selle käigus eraldub prinditud kihtidest siduaine ning metalli sisalduse protsent materjalis tõuseb. Selle käigus aga materjal tõmbub märkimisväärselt kokku, tavaliselt 15–20 %, mistõttu ei saa väga keerukaid struktuure selle meetodi abil printida [1]. Samuti on printimise kvaliteet kehvem kui PBF meetodil ja keerukamate detailide puhul tuleb kasutada tugistruktuure, mis on vaja käsitsi pärast eemaldada [4]. Võrreldes selektiivse lasersulatuse meetodiga on selle meetodi puhul materjali pind ebaühtlasem ja materjali mõõtmed ebatäpsemad.

Metalli on võimalik veel printida kasutades sideaine pritsimise meetodit BJ (*Binder Jetting*), kus sideaine abil seotakse metallipulber vajaliku kujuga detailiks. Sideaine tahkub toatemperatuuril ja seega on võimalik suur detail korruga valmis printida. Küll aga prinditud detail tuleb paagutada, mille käigus eraldub siduaine. Siudaine eraldumise tõttu detaili mõõtmed kahanevad nagu FDM meetodi puhulgi 15-20 % [1]. Sellisel meetodil toodetud detail on oluliselt suurema poorsusega kui pulbri selektiivse sulatuse tehnoloogial toodetud detail. Seetõttu pole see meetod sobilik suure tihedusega detailide printimiseks.

Metalle saab printida samuti suunatud energia sadestamise DED (*Directed Energy Deposition*) meetodil, kus energiaallikas sulatab traadi või pulbri eelnevale kihile. Energiaallikaks võib olla näiteks laser, kuhu puistatakse otse metallipulber või traat. Tal on sarnaselt FDM meetodile iseseisvalt liikuv printimispea, mis on tihti viieteljeline. Tänu sellele on DED meetodil väga kiire printimis kiirus, umbes 700 cm³/h (traadiga) ja selle abil saab ka parandada katkiseid detaile [1]. Katkine detail asetatakse printerisse ja viieteljelise pea abil on võimalik ära täita katkised kohad. PBF tehnoloogia abil poleks selline parandamine võimalik. Tema miinuseks on printimise ebatäpsus ja seetõttu rohkem jääkmaterjale. Enamasti prinditakse detail suurem ja freesitakse mõõtudesse. Seda meetodit kasutatakse näiteks suurte konstruktsioonide printimisel ehitussektoris ja sõukruvide tootmiseks.

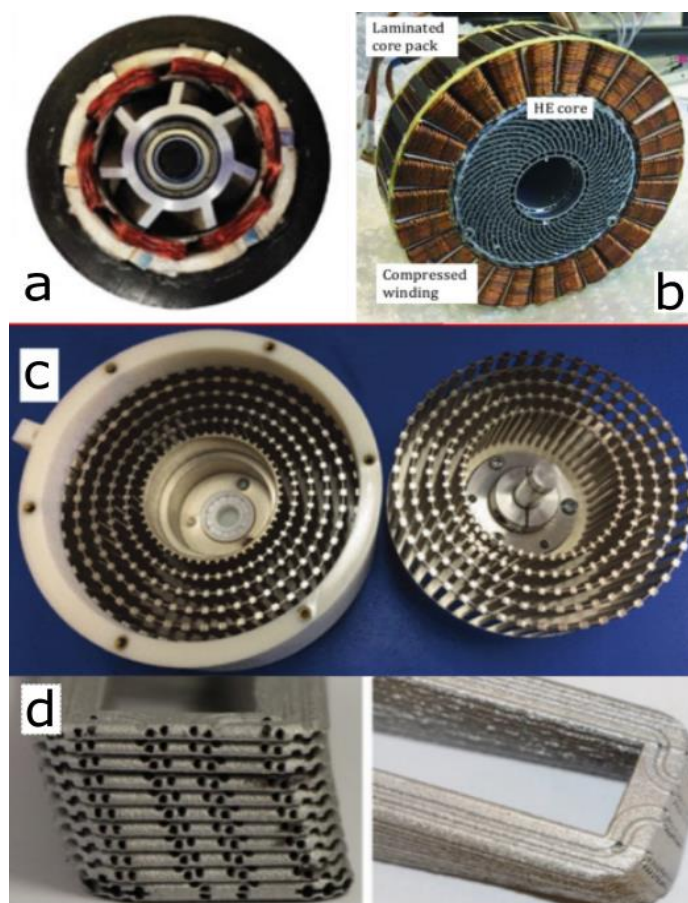
1.2 3D printimise eelised

3D printimise eelisteks võrreldes tavapärase tootmisviisidega on:

- Kiire prototüüpimine
- Võimalus valmistada keeruka kujuga detaile
- Lihtsustatud tootmise logistika, väiksem masinapark
- Väikeseeria tootmine, isikustatud lähenemine toodetele

3D printimine annab võimaluse lihtsasti CAD joonisest detail valmis printida. Kuna detail prinditakse kiht kihi haaval, siis detaili keerukus ei lisa suurt aja ja materjali kulu võrreldes klassikaliste meetoditega. Klassikalise meetodi puhul võib vaja olla erinevate detaili jaoks eraldi vorme, keeruka kujuga detaili puhul võib olla neid vaja kümneid. Kui aga sama detaili toota 3D printimise abil pole vaja lisa vorme ega seadmeid. Seega saab 3D printimise tehnoloogia abil teha kiiremini ja odavamalt prototüüpe ning väikeseeria toodanguid. Seeläbi saab luua just konkreetseks kasutuseks sobiva, keerulise topoloogiaga elektrimasina, millel on suurem võimsustihedus.

3D printimise abil on võimalik printida näiteks keerulise kujuga elektrimasina rootoreid, millega võiks potentsiaalselt saada 40% suurema väljundvõimsuse ja 15% väiksemad kaod [5]. Suurema võimsustiheduse tõttu vajavad masinad paremat jahutust. Traditsioonilisi radiaatorribisid saab asendada keerulisemate kujudega, ja jahutusribisid saab integreerida masinasse minimaalse kaalu saavutamiseks. Näiteks on prinditud ventilaatorimootor, mis sisaldab integreeritud tiivikuga rootorit. Integreeritud tiiviku abil on võimalik saavutada suurema võimsustihedusega vastupidav mootor (vt. joonis 1.1a) [6]. Samuti on prinditud mootor, kus rootor on õõnsa struktuuriga mootori kaalu vähendamiseks ja samuti töötab see soojusvahetina (vt. joonis 1.1b) [6]. 3D printeri abil on võimalik printida ka elektrostaatilisid mootoreid, mis ei sisalda mähiseid (vt. joonis 1.1c) [6]. Vesijahutusega masinal on võimalik luua keerulisemaid jahutusvedeliku teid ja seeläbi juhtida jahutusvedelikku läbi masina kõige kuumemate osade. Praeguseeni klassikaliste meetodite puhul kasutati masina ümber olevat jahutussärki, kuid 3D printimise tehnoloogiaid kasutades saab jahutusvedelikku juhtida näiteks läbi masina mähiste (vt. joonis 1.1d) [6].



Joonis 1.1. 3D prinditud komponendid: a – integreeritud tiivikuga mootor, b – 3D prinditud alumiinium soojusvahetiga mootor, c – 3D prinditud elektrostaatiline mootor, d – otsese vesijahutusega 3D prinditud alumiiniumsulamist mähised [6]

3D printimisel kuluks on printer ja materjal, tööjõu kulu võrreldes klassikalise meetodiga on väiksem, vaja on vaid CAD mudelit ja masina operaatorit. Samuti on võimalik printida väga keerulise kujuga detaile, mille jaoks klassikalisel meetodil tootes oleks vaja erinevaid spetsiaalseid pinke ja oskustöölisi. Küll aga sõltuvalt kasutuselast on detaili siiski vaja järeltöödelda, näiteks lihvimise ja lõõmutamise teel.

Jääkmaterjali on samuti lihtne taaskasutada, kuna jäägiks on sama metallipulber millest toodet prinditi. Jääkmaterjal sõelutakse ja segatakse uue materjaliga ning seda saab kohe ilma ümbertöötlemiseta uuesti kasutada. Klassikalistel meetoditel tootmisel on jääkideks näiteks treimisel ja puurimisel tekkivad laastud, mille uuesti kasutamiseks on need vaja ümber sulatada. Selleks on vaja kõigepealt jääke hoiustada, energiat jääkide ülesse sulatamiseks ja tööjõudu ning seadmeid sula metallist uue toormaterjali valmistamiseks.

1.3 Varasemalt tehtud tööd

Eelnevalt on sarnaseid katseid tehtud ka elektrimasinate uurimisrühma teaduslaboris. On uuritud kuidas selle materjali sarnaste printimisparameetrite juures materjali termotöötlus avaldas mõju hüstereesikadudele. Materjali termotöötlemise puhul selgus, et 1200 °C juures lõõmutatud toroidil olid paremad magnetilised omadused kui 800 °C juures lõõmutatud materjalil, sealhulgas väiksemad hüstereesikaod [7]. Käesolevas töös katsetatakse esimeses osas kuidas mõjub materjali omadustele lõõmutustemperatuuri tõstmine üle 1200 °C.

Lisaks lõõmutamistemperatuuri muutmisele saab kadusid vähendada vahelduvvoolu ahelas, kui materjalile tekitada õhukesed isoleeritud kihid. Tavapäraselt kasutatakse selleks õhukesi materjali lehti, mille vahel on isolatsioonikiht. Prinditud materjalide puhul on võimalus kasutada ära 3D printimise head ruumilist täpsust ja printida materjali kihtidele õhuvahed. Kuna prinditud materjali kihid on omavahel ühendatud väikeste tugevdega ei ole kihid omavahel ideaalselt isoleeritud aga praegused meetodid ei võimalda printida kihtide vahele isolatsioonimaterjali. Eelnevalt tehtud uurimustes on selgunud, et mida rohkem on katsekehal õhuvahesid, seda väiksemad on püsinud ka pöörisvoolukaod [7]. Seega selle töö teises pooles prinditakse erinevas suunas õhupiludega toroide ning hinnatakse nende mõju kadude vähenemisele.

1.4 Magnetmaterjalid

Magnetmaterjalideks nimetatakse materjale, mis magnetväljas magneetuvad ehk omandavad magnetilised omadused. Magnetmaterjalid võimendavad elektrimootoris magnetvoo tihedust. Heal pehmel magnetmaterjali on suur magnetiline läbitavus ja väikesed energiakaod.

Magnetmaterjale iseloomustatakse magnetiliste parameetritega milleks on:

- Magnetiline läbitavus - näitab, mitu korda erineb magnetvootihedus aines magnetvootihedusest vaakumis. [8] Ehk siis ta iseloomustab materjali magneetumisvõimet. Mida suurem on magnetiline läbitavus, seda kergemini materjal magneetub.
- Küllastusinduktsioon - punkt kus magnetvälja tugevuse tõstmisel magnetiline induktsioon enam ei tõuse ehk materjal on jõudnud küllastusse.
- Jääkinduktsioon – suurus, mis näitab magnetilise induktsiooni jääkväärtust kui materjalilt võetakse ära väline magnetväli ehk magnetvälja tugevus on 0.
- Koertsitiivjõud - näitab kui suurt vastupidist magnetvälja tugevust on vaja materjali demagneetimiseks ehk magnetvoo tiheduse 0 punkti viimiseks. [9]

1.4.1 Magnetmaterjalide liigitus

Magnetmaterjalid liigitatakse pehmeteks ja kõvadeks magnetmaterjalideks. Kõvasid magnetmaterjale iseloomustab lai hüstereesisilmus ehk neil on suur koertsitiivsus [9]. Neid on raske magneetida aga kui nad on magnetilised omandused omandanud siis nad säilitavad neid normaalingimustel ehk kui nende temperatuur ei tõuse üle Curie' temperatuuri. Magnetiliselt kõvasid materjale kasutatakse püsimagneetina.

Pehmetel magnetmaterjalidel on kitsas hüstereesisilmus ehk nad magneetuvad ja demagneetuvad kergesti väikese koertsitiivsuse tõttu [9]. Kitsa hüstereesisilmuse tõttu on pehmetel magnetmaterjalidel ka väikesed hüstereesikaod, mis on oluline vahelduvvoolu ahelas. Vahelduvvoolu mõjul toimub magnetmaterjali pidev übermagneetimine, 50 hz puhul 50 korda sekundis. Iga übermagneetimise tsükli käigus tekivad energiakaod, mida nimetatakse rauaskadudeks [9]. Pehmeid magnetmaterjale kasutatakse trafode südame, releede ja elektrimootorite ning teiste elektriseadmete magnetahelates [10].

1.4.2 Magnetiline dipool

Paljude ainete aatomites esinevad väikesed magnetmomendid mida nimetatakse magnetiliseks dipooliks. Magnetilist dipooli illustreerib hästi pulkmagnet, mis on

asetatud rauapulbrisse. Pulbri terakesed teevad magnetvälja nähtavaks, kuna nad joonduvad magnetvälja jõujoonte järgi ja tekitavad joonisel 1.2 kujutatud mustri. Kokkuleppeliselt öeldakse, et magnetvälja jõujooned saavad alguse põhjapooluselt ja neelduvad lõunapoolsusesse. [11]



Joonis 1.2 Pulkmagnet kui magnetiline dipool [12]

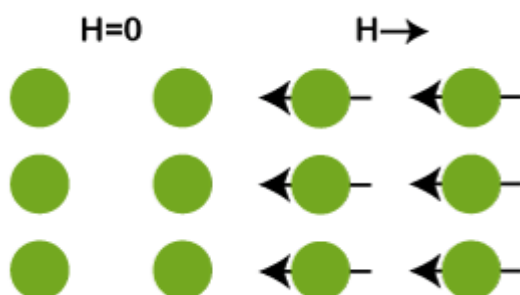
Kui murda pulkmagnet väikesteks tükkeks, võiks oletada, et magnetist on võimalik eraldada põhja või lõunapoolus ehk niinimetatud magnetmonopol. Tegelikult see nii aga pole, igal magnetitükil on olemas nii põhja- kui ka lõunapoolus, isegi kui tükeldada magnet üksikuteks aatomiteks. Seega kõige lihtsam iseseisvalt eksisteeriv magnetiline struktuur on magnetiline dipool, magnetmonopole praeguste teadmiste kohaselt ei eksisteeri [11]. Ainele välist magnetvälja rakendades hakkavad dipoolid magnetvälja toimel ennast keerama. Dipoolide keeramise suund ja intensiivsus olenevad aine ja tema omadustest.

Magnetismi põhiliikideks on diamagnetism, paramagnetism ja ferromagnetism. Kusjuures magnetväli võimendub enim ferromagnetilistes ainetes [11]. Magnetilised dipoolid esinevad igas aines kuid siiski ei ole iga aine magnetiline. Magnetilisi dipooli on ühe aine sees väga palju ning nad on juhuslikult suunatud või ilma algmomentita. Kui aine magnetiliste dipoolmomentide summa on 0 siis magnetvälja ei teki. Magnetiliseks aineks nimetatakse ainet, kus dipoolmomentide summa tekitab magnetvälja.

1.4.3 Diamagnetism

Diamagneetilisel ainel ei ole dipoolmomente, kuna iga aatomi ülespoole suunatud dipoolmoment on võrdne aatomi allapoole suunatud dipoolmomentiga. Rakendades ainele välist magnetvälja tekivad nõrgad magnetilised dipoolmomentid ning aine omandab väga nõrga magnetvälja. Magnetvälja kadumisel kaovad ka magnetilised dipoolmomentid ja sellega ka magnetväli. [11] Välist magnetvälja rakendades tekivad

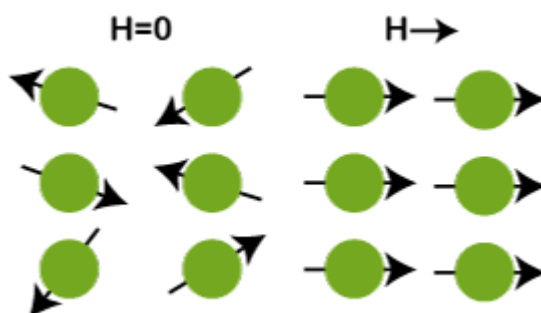
diamagneetikus magnetväljale vastupidise suunaga dipoolid nagu on kujutatud joonisel 1.3. Aines tekib välisele magnetväljale vastassuunaline magnetväli, seetõttu tõukab väline magnetväli diamagneetikut eemale.



Joonis 1.3. Diamagneetiku magnetilised dipoolmomentid [13]

1.4.4 Paramagnetism

Paramagneetilises aines on igal aatomil püsiv summaarne magnetiline dipoolmoment. Ilma välise magnetvälja mõjuta on magnetilised dipoolid suunatud aines juhuslikult nagu võib näha joonisel 1.4 ($H=0$). Seetõttu ainel tervikuna siiski ei ole summaarset magnetvälja. Kui materjalile rakendada välist magnetvälja, pööravad osad dipoolid ennast magnetvälja suunas ning aines tekib välise magnetväljaga samasuunaline magnetväli. Välise magnetvälja kadudes pööravad dipoolid taas ennast juhuslikus suunas ja summaarne magnetiline dipoolmoment on võrdne nulliga ehk magnetväli kaob.



Joonis 1.4. Paramagneetiku magnetilised dipoolmomentid [13]

1.4.5 Ferromagnetism

Ferromagneetikuteks on raud, koobalt, nikkel, gadoliinium, düsproosium ja nende sulamid [11]. Ferromagneetikutes on magnetilised dipoolmomentid, mis on osaliselt samasuunalised. Seetõttu tekivad suure magnetilise dipoolmomentiga piirkonnad, mida nimetatakse domeenideks. Erinevate piirkondade ehk domeenide magnetmomentid

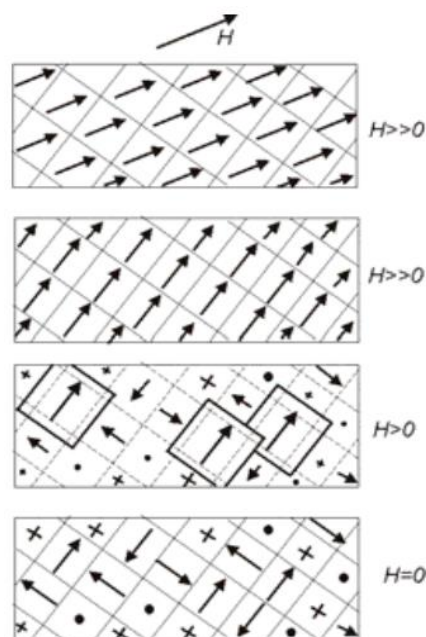
võivad olla eri suundades, mis pöörduvad välise magnetvälja toimetel selle suunas. Nii tekib aines tugev magnetväli, mis osaliselt säilib ka pärast välise magnetvälja kadumist.

Ferromagneetikud kaotavad oma omadused kui nende temperatuur ületab kriitilise punkti, mida nimetatakse Curie temperatuuriks. Curie temperatuuri ületamisel muutuvad enamused ferromagneetikuid paramagneetikuteks [11].

1.4.6 Magnetilised domeenid

Magnetilised domeenid esinevad ferromagnetites. Ferromagneetiline monokristall koosneb teatud arvust magnetilistest domeenidest ehk piirkondadest, kus aatomite dipoolide joondumine on praktiliselt täielik. Küll aga pole domeenid ise omavahel joondunud, vaid orienteeritud suvaliselt nii, et need suures osas tasakaalustavad üksteist (vt. joonis 1.5, $H=0$). Seetõttu on aine magnetilised omadused siiski nõrgad.

Paljud ferromagneetikud pole aga monokristallid, vaid väikeste kristallide kogumid, mida nimetatakse polükristalliliseks tahkiseks. Nii on igal väga väiksel kristallil palju erinevalt orienteeritud domeene. Kui sellisele polükristallisele tahkisele rakendada välist magnetvälja, seda järk-järgult suurendades, tekib kaks efekti. Esiteks hakkavad kasvama domeenide mõõtmed, mis on juba suunatud välise magnetvälja suunas, nende domeenide arvelt, mis seda ei ole. Teiseks toimub dipoolide suuna muutus domeenis kui tervikus, mistõttu domeeni orientatsioon liigub lähemale välise magnetvälja suunale. [11] Nii saavutame joonisel 1.7 kujutatud efekti, kus välise magnetvälja suurendamisel on aina suurem hulk magnetväljaga paralleelseid domeene ja seetõttu aine suurem magneetumine.

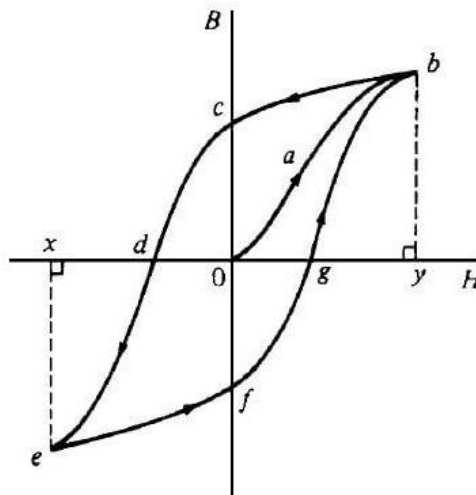


Joonis 1.5. Domeenide orientatsioon sõltuvalt välisest magnetväljast [14]

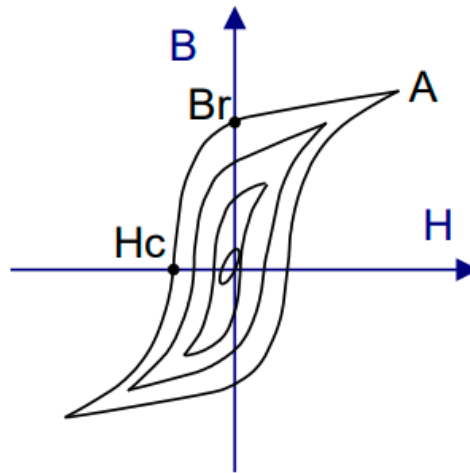
1.4.7 Hüsterees

Ferromagneetilisele materjalile välist magnetvälja rakendades magnetilised domeenid hakkavad pöörduma välise magnetvälja suunas. Olenevalt magnetvälja suurusest ja aine omadustest pöörduvad välise magnetvälja suunas kõik domeenid või siis ainult osad neist. Kui väline magnetväli eemaldada ferromagnetilt siis kõik domeenid enam ei pöördu tagasi oma algsele olekusse, seetõttu jääb ainele jääkmagneetuvus. Sellist omadust aine magnetväljal mitte liikuda mööda ühte kõverat mõlemas suunas nimetatakse hüstereesiks [11].

Tsüklilise magnetvälja tugevuse H muutmisel muutub magnetmaterjalis ka magnetiline induktsioon B . Kui graafiku x – teljele kanda magnetvälja tugevus ja y – teljele magnetiline induktsioon, moodustub übermagneetimist iseloomustav tsükkel, mida nimetatakse hüstereesisilmuseks (vt. joonis 1.6). Hüstereesisilmuse suurus sõltub välise magnetvälja tugevusest, kuna väikest magnetvälja tugevust rakendades ei pöördu kõik aine magnetilised dipoolid magnetvälja suunas (vt. joonis 1.5). Olenevalt välise magnetvälja suurusest saame erineva suurusega hüstereesisilmuse (vt. joonis 1.7). Materjali magnetiline induktsioon ei saa lõpmatult kasvada. Teatud välist magnetvälja tugevust ületades materjal küllastub ehk kõik magnetilised domeenid on pöördunud välise magnetvälja suunas. Seetõttu magnetvälja suuruse tõstmisel magnetiline induktsioon enam ei kasva.



Joonis 1.6. Hüstereesisilmus [15]



Joonis 1.7. Hüsteresisilmuse suuruse sõltuvus rakendatud välisest magnetväljast [16]

Kui ainele rakendatakse suurimat välist magnetvälja jõutakse joonisel 1.6 hüsteresisilmusel punkti b. Kui magnetmaterjalilt eemaldada väline magnetväli siis liigub hüsteresisilmus punkti c. Punkt c iseloomustab olukorda kus väline magnetvälja tugevus on 0 aga materjalil on siiski olemas magnetinduktsioon, seda nimetatakse jääinduktsiooniks. Kui materjali tahta demagnetida ($B = 0$) siis tuleb materjalile rakendada algupärasele vastassuunalist magnetvälja tugevust, millele hüsteresisilmusel vastab punkt d. Sellist magnetvälja tugevust nimetatakse koertsitiivjõuks. Vastupidise sama suure välise magnetvälja rakendamisel jõuab materjal hüsteresisilmusel punkti e. Ehk allapoole x telge tekib täpselt vastupidine kujutis kui eelnevalt. Vahelduvvoolu ahelas toimub pidev übermagneetimine ehk ühe tsükli korral läbitakse terve hüsteresisilmus.

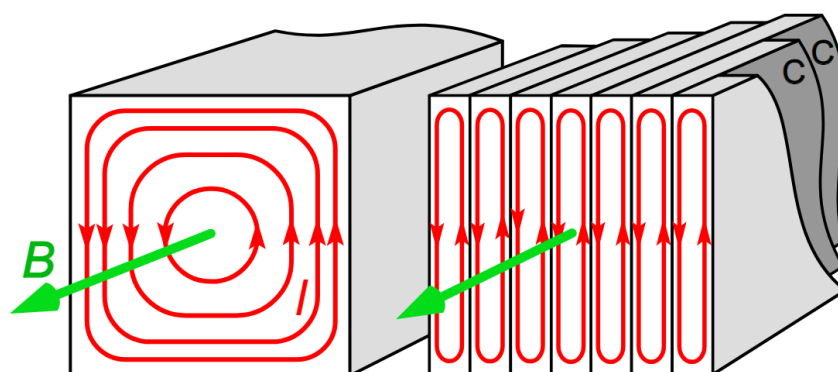
Hüsteresisilmusel joonisel 1.6 tekib magneetimiskõver 0-b, mis saadakse kui erinevatel magnetväljatugevustel tekkinud hüsteresisilmuste (nagu on kujutatud joonisel 1.7) tipud joonega ühendada. Magneetimiskõver näitab, kui suure magnetilise induktsiooni materjal saavutab konkreetse magnetvälja tugevuse juures.

Hüsteresisilmuseid liigitatakse kvaasistaatilisteks ja dünaamilisteks [16]. Dünaamiline hüsteresisilmus saadakse vahelduvvoolu ahelas, kus toimub pidev aine übermagneetimine ja esinevad nii hüsteresi- kui pöörisvoolukaod. Kvaasistaatiline hüsteresisilmus saadakse magnetilise induktsiooni väga aeglasel muutumisel, mille puhul pöörisvoolu kaod on väga väikesed. Seega kvaasistaatiline hüsteresisilmuse pindala loetakse võrdseks hüsteresikadudega ja dünaamilise hüsteresisilmuse pindala on võrdeline hüsteresi- ja pöörisvoolukadude summaga.

1.4.8 Magnetmaterjali energiakaod

Magnetmaterjalides esinevad alati energiakaod, milleks on hüstereesi- ja pöörivoolukaod. Hüsteresikaod tekivad materjali ümbermagneetimise käigus. Materjali ümbermagneetimisel hakkavad magnetilised domeenid pöörduma magnetvälja suunas aga see nõuab energiat. See energia muutub soojuseks ja seetõttu tekib selle protsessi käigus kaod, mida nimetatakse hüstereesikadudeks.

Faraday seaduse järgi indutseeritakse vahelduva magnetvoo korral igas kontuuris, mida magnetvoog läbib, elektromotoorjõud. Juhtivas materjalis tekib vool igas kontuuris, mis asub selle magnetahela sees (vt. joonis 1.8). Kui magnetahel on suur, siis tal on suur ristlõige, väike takistus ja seetõttu suur pöörivool. Pöörivoolukaod sõltuvad materjali eritakistust ja kihi paksusest. Kui magnetahel valmistada õhukestest, omavahel isoleeritud lehtedest, siis vool saab tekkida ainult kontuurides, mis asuvad üksikute lehtede sees (vt. joonis 1.8). Õhukese lehe puhul on voolukontuur väikese ristlõikega, suure takistusega ja seal tekib väike pöörivool. Seetõttu kasutatakse klassikalistes magnetmaterjalides õhukestest kihtidest koosnevaid materjale, kuna nii tekivad pöörivoolud igas kihis eraldi, mis summaarselt on tunduvalt väiksemad kui monoliitmaterjali puhul. Pöörivoolukadusid saab määrata valemiga 1.1 [17].



Joonis 1.8. Pöörivoolu tekkimine monoliitmaterjalis (vasak) ja laminatsioonidega materjalis (parem) [18]

$$P_e = V * K_e * f^2 * d^2 * B_m^2 \quad (1.1)$$

- kus P_e – pöörivoolu kaod (W),
 V – magnetahela ruumala (m³)
 K_e – mõõtühikuid ja magnetahela materjali eritakistust arvestav tegur,
 f – sagedus (Hz),
 d – teraslehe paksus (m),
 B_m – magnetvoo tiheduse amplituud (T).

Pöörisvoolukaod vähenevad õhupiludega materjalis, kuna valemis 1.1 on näha, et üheks teguriks on ka materjali lehe paksus. Pöörisvoolukadu kasvab võrdeliselt lehe paksusega. Kui materjal valmistakse mitmest eraldiseisvast teraslehest, siis nende kaod summeeruvad, kuid on siiski oluliselt väiksemad kui täismaterjalis tekkinud kaod. Nii hüstereesi- kui ka pöörisvoolukadusid saab määrata katseliselt kvaasistaatilise ja dünaamilise hüstereesisilmuse abil.

2. 3D PRINDITUD MAGNETMATERJALIDE OMADUSTE MÄÄRAMINE

2.1 Meetodid

Ferromagneetilise aine magnetilisi omadusi uuritakse toroidi meetodil, järgides standardeid EN 60404-6 ja EN 60404-4 [19] [20]. Selleks valmistatakse uuritavast materjalist ringikujuline toroidtrafo, millele mähitakse primaarmähis N_1 ja sekundaarmähis N_2 . Primaarmähist läbiv vool määrab ära magnetvälja tugevuse katsekehas, mis on leitav valemiga 2.1 [20].

$$H = \frac{N_1 * I}{l} \quad (2.1)$$

kus I – primaarvoolu hetkväärtus (A),
 N_1 – primaarmähise keerdude arv,
 l – keskmine magnetahela pikkus (m).

Keskmise magnetahela pikkus on toroidi ringjoone keskmine pikkus ehk kasutatakse valemit 2.2.

$$l = \frac{d_v + d_s}{2} * \pi \quad (2.2)$$

kus d_v – toroidi välimine diameeter (m),
 d_s – toroidi sisemine diameeter (m).

Magnetilise induktsiooni väärtus leitakse sekundaarmähise abil. Selleks mõõdetakse sekundaarmähisesse indutseeritud pinget ja kasutatakse valemit 2.3.

$$B = \frac{1}{N_2 * S} \int_t v(t) dt \quad (2.3)$$

kus N_2 – sekundaarmaarmähise keerdude arv,
 S – katsekeha magnetahela ristlõikepindala (m²).

Kuna toroid on ristlõikelt ristküliku kujuline siis kasutatakse ristlõike pindala leidmiseks valemit 2.4.

$$S = \frac{(d_v - d_s)}{2} * h * F \quad (2.4)$$

kus h – toroidi kõrgus (m),
 F – materjali täitetegur

Mõõdetud magnetväljatugevuse H ja magnetvoo tiheduse B põhjal saab iga mõõtmise kohta joonistada hüstereesisilmuse. Igalt hüstereesisilmuselt saab lugeda koertsitiivsuse ja remanentsi selles mõõtepunktis.

Sama toroidiga, samal sagedusel kuid erinevatel magnetvälja tugevustel tehtud mõõtmistel tekkinud hüstereesisilmuste tippude abil saab välja joonistada selle materjali magneetimiskõvera (vt joonis 1.6 ja 1.7).

Magnetmaterjali suhteline läbitavus leitakse valemi 2.5 abil.

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 * H} \quad (2.5)$$

kus μ_r – magnetmaterjali suhteline läbitavus
 $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$ H/m, mis on vaakumi magnetiline läbitavus.

Magnetmaterjali kogukaod on võrdelised hüstereesisilmuse pindalaga, mida saab leida integreerimise teel valemiga 2.6.

$$P = \int H * dB \quad (2.6)$$

kus P – magnetmaterjali kogukaod (J/m³).

Hüstereesisilmuse pindalaga võrdelise magnetmaterjali kao ühikuks on J/m³ kohta, kuna H (T) ja B (A/m) korrutamisel saadakse:

$$T * \frac{A}{m} = \frac{N}{A * m} * \frac{A}{m} = \frac{N}{m^2} = \frac{N * m}{m^3} = \frac{J}{m^3}$$

Materjali erikao arvutamiseks kasutatakse valemit 2.7. Töös kasutatakse numbrilist integreerimist, kus hüstereesisilmus jagatakse ülemiseks ja alumiseks jooneks. Seejärel leitakse ülemise ja alumise joone pindala vahe ning kasutatakse valemis 2.7.

$$P_s = \frac{1}{T * \rho} \left(\int_0^T H_1 * dB_1 - \int_0^T H_2 * dB_2 \right) \quad (2.7)$$

kus P_s – magnetmaterjali erikao (W/kg),
 T – periood (s),
 ρ – materjali keskmine tihedus (kg/m³).

Materjali erikao ühikuks on W/kg kuna kogukaod jagatakse tihedusega ja korrutatakse sagedusega:

$$\frac{J}{m^3} * \frac{m^3}{kg} * \frac{1}{s} = \frac{J}{kg * s} = \frac{W}{kg}$$

Materjali hüstereesi erikao P_h arvestamiseks kasutatakse valemit 2.8, mida saab kasutada vaid 25 mHz katsete puhul. Valem on sarnane materjali erikao valemile 2.7, kuid valemis 2.8 ei arvestata perioodi. Perioodi ei arvestata, kuna väga madalal sagedusel on lihtsustatult tegu kvaasistaatilise hüstereesisilmusega. Niisiis hüstereesisilmuse pindala on võrdeline vaid hüstereesikadudega, mis jagatakse läbi tihedusega.

$$P_h = \frac{1}{\rho} \left(\int_0^T H_1 * dB_1 - \int_0^T H_2 * dB_2 \right) \quad (2.8)$$

Materjali hüstereesi erikao ühikuks on J/kg, sest hüstereesikaod jagatakse tihedusega:

$$\frac{J}{m^3} * \frac{m^3}{kg} = \frac{J}{kg}$$

Hüstereesikaod esinevad igal ümbermagneetamise tsüklil ja sageduse tõustes materjali re-magneetitakse rohkem kordi. Seetõttu tuleb summaarne hüstereesikadu suurem, 50 Hz juures tekkivaid hüstereesikadusid saab arvutada, kui korrutada valemi 2.8 tulemused 50ga.

Materjali tiheduse leidmiseks kasutatakse valemit 2.9.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.9)$$

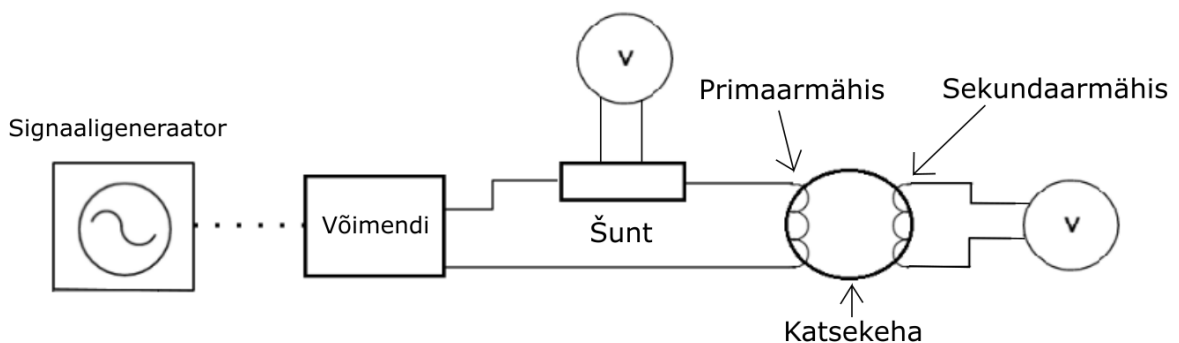
kus m – katsekeha mass (kg),
 V – ruumala (m^3).

Rõngastoroidi ruumala leidmiseks kasutatakse valemit 2.10.

$$V = S * l \quad (2.10)$$

2.2 Katse

2.2.1 Katseskeem



Joonis 2.1 Katseskeem

Katses kasutati järgnevaid seadmeid:

- Signaaligeneraator Rigol DG1022Z
- Võimendi Omicron CMS 356
- Andmetekoguja Dewetron DEWE2-M
- Šunt 15A/ 75mv

Toroidi meetodil katsete tegemiseks mähiti peale lõõmutamist ümber toroidi kaks mähist. Selleks kaeti kõigepealt toroidi pind isoleerpaelaga, et vältida sekundaarmähise traadi kattekihi vigastamist ja lühiskeerdude teket. Järgnevalt mähiti käsitsi peenemast traadist sekundaarmähis ümber toroidi ja selle peale primaarmähis. Mõlema mähise keerud loeti üle ning kanti tabelisse 2.3 ja 2.4.

Kui katsekehad olid ette valmistatud sai katseseadmete abil mõõta katseliselt toroidide andmed. Selleks rakendati joonisel 2.1 olevat skeemi, kus signaaligeneraatoriga genereeriti soovitud sagedusega signaal, mille pinge võimendi abil katse jaoks sobivaks võimendati. Edasi liikus signaal läbi šundi trafo primaarmähisele. Andmekoguja abil mõõdeti šundilt pinge, mis oli võrdeline primaarmähise vooluga. Samuti mõõdeti sekundaarmähisesse indutseeritavat pinget. Katse käigus mõõdeti andmed sagedusega 10 000 korda sekundis, mis salvestati tabelarvutusprogrammi Excel faili.

Iga toroidiga sooritati mõõtmisi magnetvälja tugevusel 100 – 9000 A/m. Vastava magnetvälja tugevuse tekitamiseks toideti toroidide primaarmähiseid voolu efektiivväärtusel 0,3 – 20 A. Mõõtmised toimusid 22 °C juures ning jälgiti, et katsekehad katse käigus liigselt ei soojeneks.

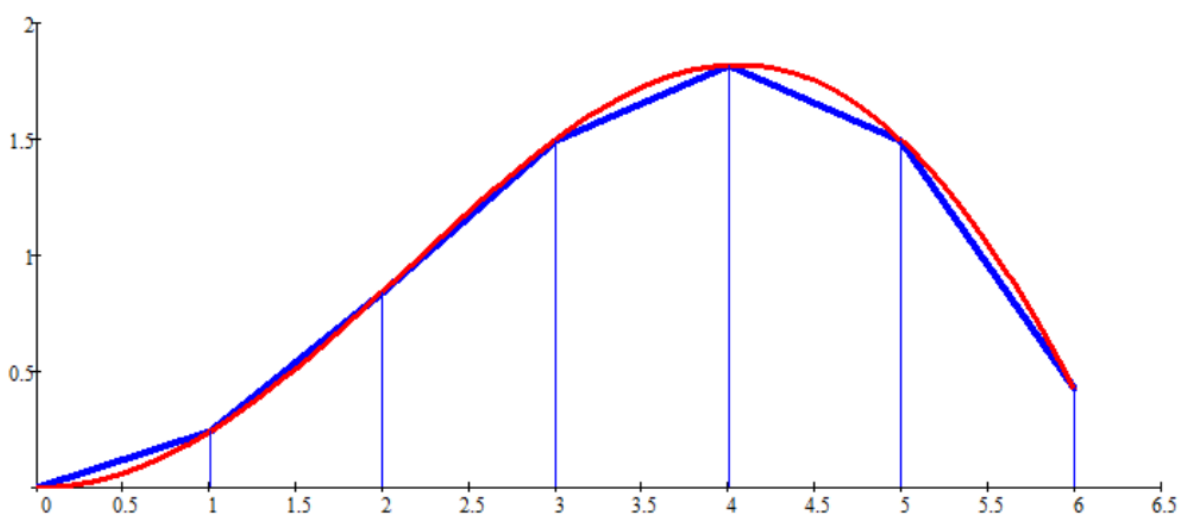
Esimesteks katsekehadeks olid täistoroidid ehk ilma õhupiludeta toroidid. Nendega sooritati katseid sagedustel 25 mHz, 1 Hz ja 50 Hz. Madalama sagedusega katsetused kui 50 Hz on vajalikud magnetmaterjalide kadude määramisel, kuna väiksel sagedusel on materjali ümbermagneetimine väga aeglane. 25 mHz juures on pöörivoolu kaod pea olematud ning tekib kvaasistaatiline hüstereesisilmus. Seeläbi saab edaspidises analüüsis eraldada hüstereesikaod magnetsüdamiku rauaskadudest.

Peale täistoroidide mõõtetulemuste analüüsimist leiti optimaalseim lõõmutustemperatuur, kus ümbermagneetimiskaod püsisid madalaimad. Järgnevalt oli eesmärk alandada pöörivoolukadusid. Selleks prinditi samast materjalist erinevas suunas õhupiludega toroidid.

Õhupiludega toroide katsetatati ainult 50 Hz juures, kuna nende toroidide materjali hüstereesikadude suurus oli juba eelnevalt teada. Hüstereesikaod sõltuvad materjali omadustest ehk õhupiludega toroidil on sama suured hüstereesikaod kui toroidil, millel õhupilusid pole. Nii on juba eelnevalt teada materjali omadustest sõltuvad hüstereesikaod ning sellel katsel on eesmärgiks leida, kuidas sõltuvad magnetsüdamiku omadused toroidi struktuurist.

Peale katseandmete salvestamist analüüsiti neid matemaatikapaketi Matlab. Täistoroididel leiti esmalt materjali tihedus, keskmine magnetahela pikkus ja seejärel magnetilise induktsiooni ning magnetvälja tugevus igas mõõtepunktis. Õhupiludega toroididel leiti materjali täitetegur metalli tomograafia, kuna nii sai kõige täpsema ülevaate materjali tühimike suurustest. Kuna õhupiludega toroidid olid prinditud samadel parameetritel, mis täistoroidid, siis arvutustes kasutati täistoroidide keskmist materjali tihedust. Toroidide ristlõike pindala parandati täiteteguriga, st. arvutustes kasutati ainult magnetmaterjali ruumala.

Arvutatud magnetvälja tugevuse ja magnetilise induktsiooni väärtuste põhjal joonestati välja hüstereesisilmused. Hüstereesisilmuste analüüsil leiti magnetmaterjali erikaod, koertsitiivsus ning remanents sõltuvalt materjalile rakendatud magnetväljatugevusest. Materjali koertsitiivsuse ja remanentsi saab lugeda otse materjali hüstereesisilmuse lõikepunktidelt H ja B telgedega. Materjali kadude arvutamiseks on vaja leida silmuse pindala, milleks kasutati Matlabis numbrilist integreerimist, mille käigus leiti hüstereesisilmuse ülemise joone alumine pindala ja lahutati sellest hüstereesisilmuse alumise joone alumine pindala. Joone alused pindalad leiti numbriliselt läbi kvadratuurvalemi nagu on kujutatud joonisel 2.2. Edasi koostatati magnetmaterjalide iseloomustamiseks vajalike andmetega graafikud tabelarvutusprogrammis Excel ning võrreldi neid nii teiste selles lõputöös katsetatud magnetmaterjalidega kui ka kommertsiaalsete magnetmaterjalidega.



Joonis 2.2 Kvadratuurvalemi näide [21]

2.2.2 Toroidide printimine

3D printimiseks kasutati Tallinna Tehnikaülikooli U05-B korpuse laboris asuvat metalliprinterit SLM-280. Konkreetne metalliprinter kasutab selektiivse lasersulatuse meetodit SLM (*Selective Laser Melting*). Printeriga on võimalik printida detaili mõõtmetega 280x280x365 ja ühe printitava kihi paksuseks on 20 – 75 μm .

Printimisel kasutati ettevõtte Sandvik Group poolt toodetud Fe-Si pulbrit, mille keemiline koostis on eelnevates uurimustes kindlaks määratud ja leitav tabelist 2.1.

Tabel 2.1. Pulbri keemiline koostis [7]

Element	Fe	Si	Mn	Cr	Ni	C
Sisaldus, %	95,91	3,7	0,2	0,16	0,020	0,01

Eelneva majasisese optimeerimisprotsessi tulemusena määratud parameetrid valiti näidiste printimise parameetriteks. Need parameetrid, millega saavutati 99,86 % suhteline materjali tihedus, on välja toodud tabelis 2.2 [7].

Tabel 2.2. Printimise parameetrid

Parameeter	Väärtus
Kihi paksus	50 μm
Kahe prinditud raja vaheline kaugus	120 μm
Laseri võimsus	350 W
Laseri liikumiskiirus	750 mm/s
Printimise strateegia	Vöötidena
Energiatihedus	77,77 J/mm ³
Laseri fookuse diameeter	$\sim 120 \mu\text{m}$
Eelsoojendus	Ei kasutatud
Printimise keskkond	Lämmastik
Hapniku sisaldus	$\sim 0,1 \%$

Printimise energiatihedus E (J/mm³) arvutati valemi 2.10 järgi ja kanti tabelisse 2.2 [22].

$$E = \frac{P}{v * h * t} \quad (2.11)$$

kus, P – laseri võimsus (W)

v – laseri kiirus (mm/s)

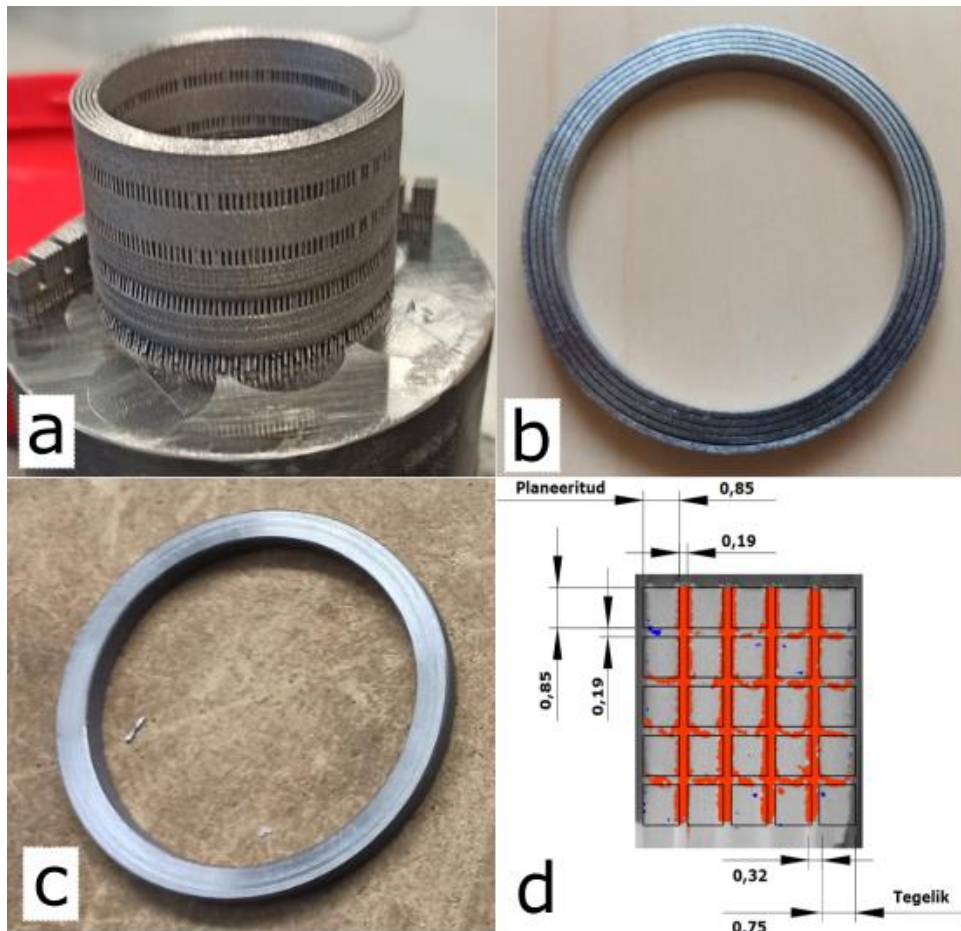
h – kahe prinditud raja vaheline kaugus (mm)

t – kihi paksus (μm)

$$E = \frac{P}{v * h * t} = \frac{350}{750 * 120 * 10^{-3} * 50 * 10^{-3}} = 77,77 \text{ J/mm}^3$$

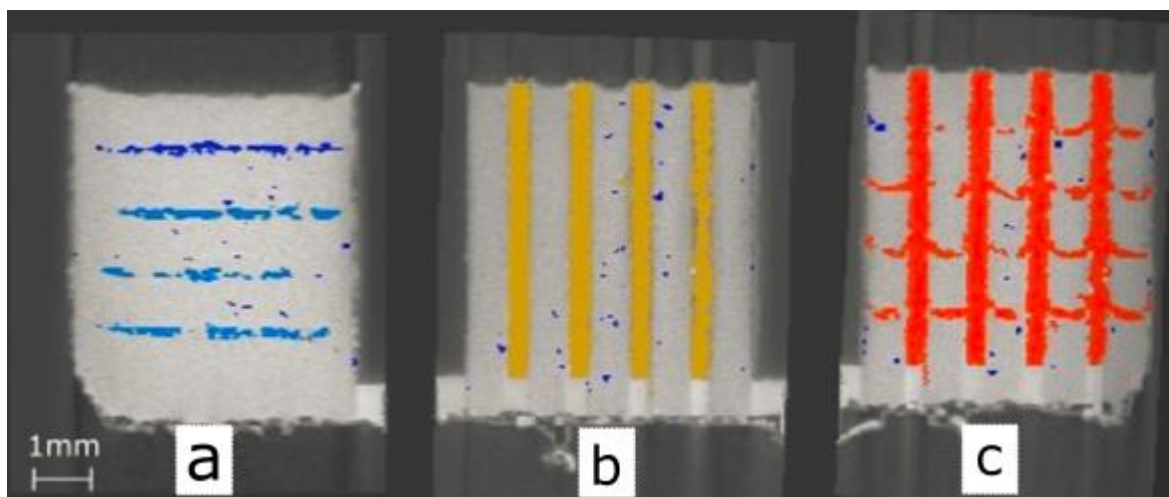
Kokku prinditi kaheksa toroidi, millest viis olid täistoroidid ehk neil puudusid õhupilud (vt. joonis 2.3c). Täistoroide kasutati 3D prinditud magnetsüdamike omaduste sõltuvuse uurimiseks nende termotöötlustest ehk lõõmutamise temperatuurist.

Prinditud magnetmaterjalide magnetiliste parameetrite määramiseks oli vaja nad peale printimist mehaaniliselt töödelda. Kuna prinditi aja kokkuhoiu mõttes mitu toroidi korraga, siis toroidid olid omavahel ühendatud väikeste tugegedega (vt. joonis 2.3a). Peale printimist tuli toroidid omavahel lahti lõigata ja pealmised pinnad lihvida. Seejärel kõik toroidid mõõdeti ja täistoroidid ka kaaluti töö edasises käigus tehtavate arvutuste tarbeks.



Joonis 2.3. 3D printitud näidised: a – töötlemata näidised, b - vertikaalsete õhupiludega 3D printitud toroid (peale töötlemist), c – ilma õhupiludeta 3D printitud toroid (peale töötlemist), d – õhupiludega toroidi ristlõige

Töö teise osa ehk pöörivoolukadude vähendamise jaoks printiti erineva sisestruktuuriga toroide. Kuna eelnevatest töödest on selgunud, et vertikaalsete õhupilude lisamine katsekehale aitab vähendada pöörivoolukadusid, printiti esimene katsekeha vertikaalsete õhupiludega (vt. joonis 2.3b) [7]. Kõikidel õhupiludega toroididel olid õhupilude vahel väikesed toed, mis hoidsid erinevaid kihte üksteisest eemal ja takistas toroidi kihtide omavahelist liikumist. Toroidi kihtide paksus oli planeeritud 0,85 mm ja õhupilude laiuks valiti 0,19 mm. Tegelikult kihi paksuseks peale printimist oli 0,75 mm ja õhupilude laius jäi toroididel 0,32mm (vt. joonis 2.3d). Toroidi printimisel on oluline, et printimise käigus ei jääks pulbri jäägid õhupiludesse. Kui pulbri jäägid jäävad kihtide vahele, siis võivad nad lõõmutamisel sulada ja kihid ei ole enam omavahel eraldatud õhuga. Sellise õhupilude valiku korral õnnestus vertikaalsete õhupilude korral kogu ülejääk kihtide vahelt eemaldada.



Joonis 2.4. Õhupilud toroidides: a - horisontaalsete-, b - vertikaalsete-, ja c - nii horisontaalsete kui vertikaalsete õhupiludega toroid

Teiseks toroidi struktuuriks valiti ainult horisontaalsed õhupilud, et hinnata õhupilude suuna mõju printimise kvaliteedile ja katse tulemustele. Kolmanda toroidi puhul prinditi nii horisontaalsed kui ka vertikaalsed õhupilud. Metalli tomograafia uurides selgus, et horisontaalsete õhupilude printimine nii hästi ei õnnestunud kui vertikaalsete õhupilude printimine. Nii hübriidse toroidi korral, kus olid nii horisontaalsed kui ka vertikaalsed pilud ning ainult horisontaalsete õhupiludega toroidil olid horisontaalsed vahed tunduvalt väiksemad võrreldes vertikaalsete vahedega (vt. joonis 2.4). Horisontaalsed vahed olid tõenäoliselt väiksemad, kuna horisontaalsete õhupilude jaoks on vaja tulenevalt printimise tehnoloogiast rohkem tugesid kihtide vahele printida. Seetõttu on kahe õhupilu vahel rohkem juhtivat materjali ja lisaks ei tule horisontaalsetest õhupiludest üleliigne pulber nii lihtsasti välja. Lõõmutades sulab kihtide vahele jäänud pulber ülesse ja paagutab kihid osaliselt omavahel kokku.

Mõõtmiseks ettevalmistatud toroidide mõõtetulemused on kantud tabelisse 2.3 ja 2.4, iseloomustades katsekehade kaalu, mõõtmeid, ning mähiste keerdude arvu.

Tabel 2.3. Täistoroidide andmed

Lõõmutamis temperatuur	Lõõmutamata	1200	1250	1300	1350
Kaal m, g	31,55	31,72	31,54	30,9	30,7
Kõrgus h, mm	4,89	4,92	4,87	4,82	4,9
Sisemine läbimõõt d_s, mm	49,79	49,8	49,78	49,82	49,95
Välimine läbimõõt d_v, mm	59,82	59,9	59,8	59,75	59,7
Sekundaarmähise keerdude arv N_2	259	253	243	245	255
Primaarmähise keerdude arv N_1	121	120	117	116	121

Tabel 2.4. Õhupiludega toroidide andmed

Õhupilude tüüp	Horisontaalne	Vertikaalne	Hübriid
Kõrgus h, mm	4,93	4,83	4,84
Sisemine läbimõõt d_s, mm	49,76	49,89	49,86
Välimine läbimõõt d_v, mm	59,79	59,75	59,76
Sekundaarmähise keerdude arv N_2	235	234	237
Primaarmähise keerdude arv N_1	113	113	112

2.2.3 Toroidide lõõmutamine

Katsekehade magnetiliste omaduste parendamiseks viidi läbi printimise järgselt nende termiline töötlus. Lõõmutamise mõjul suureneb materjali kristallstruktuuri tera suurus ja väheneb defektide (tera piiride) sisaldus. Seeläbi suureneb magnetiline vastuvõtlikkus ja väheneb koersitiivjõud. Katsekehade lõõmutamiseks asetati nad lõõmutusahju, kus 0,1 mbar vaakumi keskkonnas tõsteti katsekehade temperatuuri 300 °C tunnis, kuniks soovitud temperatuuri saavutamiseni. Ettenähtud temperatuuri saavutamisel hoiti katsekehasid tund aega sellel temperatuuril. Peale seda jahutati katsekeha aeglaselt maha 24 tunni jooksul. Peale lõõmutamist tekkis täistoroididele silmnähtav teraline struktuur nagu on näha joonisel 2.5.



Joonis 2.5. Lõõmutatud täistoroid (peale lõõmutamist)

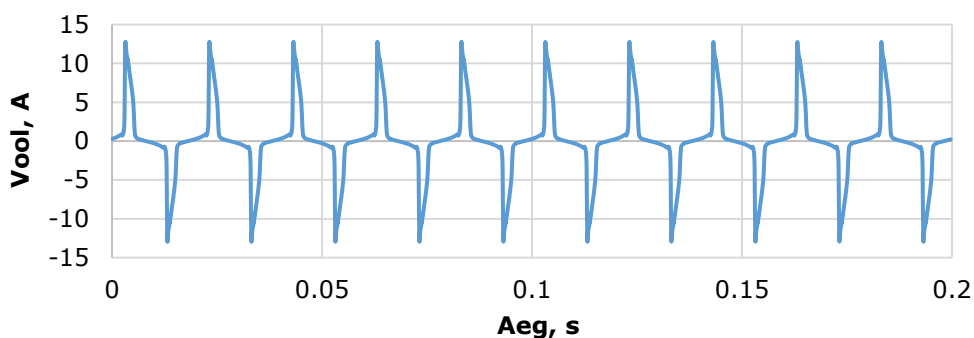
Täismaterjalist toroidid lõõmutati erinevatel temperatuuridel. Üks näidis jäeti lõõmutamata, et hinnata magnetiliste omaduste muutust enne ja pärast töötlust. Lõõmutustemperatuurideks valiti 1200 °C, 1250 °C, 1300 °C ja 1350 °C. Lõõmutamise temperatuurid valiti sellised, kuna kirjanduses on tehtud peamiselt katseid lõõmutamistemperatuuridel kuni 1200 °C. Selles töös hinnati kuidas mõjub materjali omadustele lõõmutustemperatuuri tõstmine üle 1200 °C.

Õhupiludega toroidide lõõmutustemperatuur valiti täistoroidide katsetulemuste põhjal, parimaid pehmeid magnetomadusi vaadates. Kuna täistoroididel olid kõige väiksemad hüstereesikaod 1200 °C juures, lõõmutati kõik õhupiludega toroidid temperatuuril 1200 °C.

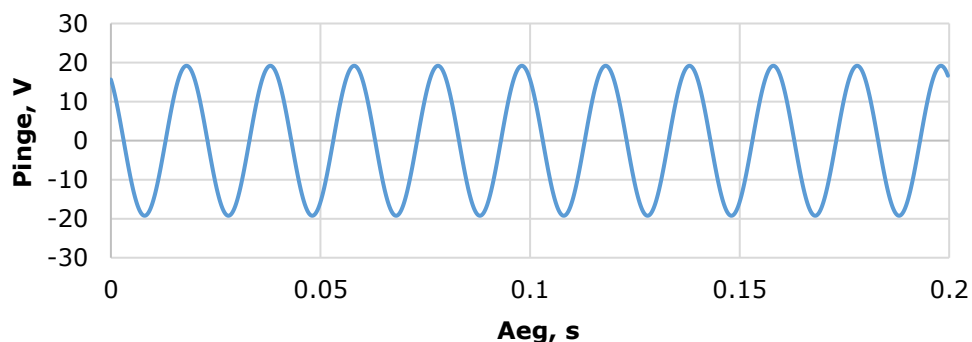
2.3 Katsetulemused

2.3.1 Täistoroidide tulemused

Igal mõõtmisel jälgiti primaarmähise toitava voolu suurust ja kuju. Samuti jälgiti sekundaarmähise pinget suurust ja kuju. Joonisel 2.6 on toodud sekundaarmähise pinget ja joonisel 2.7 primaarmähise vool ühes mõõtepunktis. Oluline oli jälgida nii primaarmähise voolu, kui ka sekundaarmähise pinget kuju, et vältida valesid mõõtetulemusi. Näiteks kui sekundaarmähise pinget mõõtetulemus ületab andmekogujal seatud mõõtepiirkonda, lõigatakse pinget väärtuse tipud ära. Seega oleks selle mõõtepunkti arvutused olnud kõik valed, kuna pinget tipu väärtused jäänuks fikseerimata.

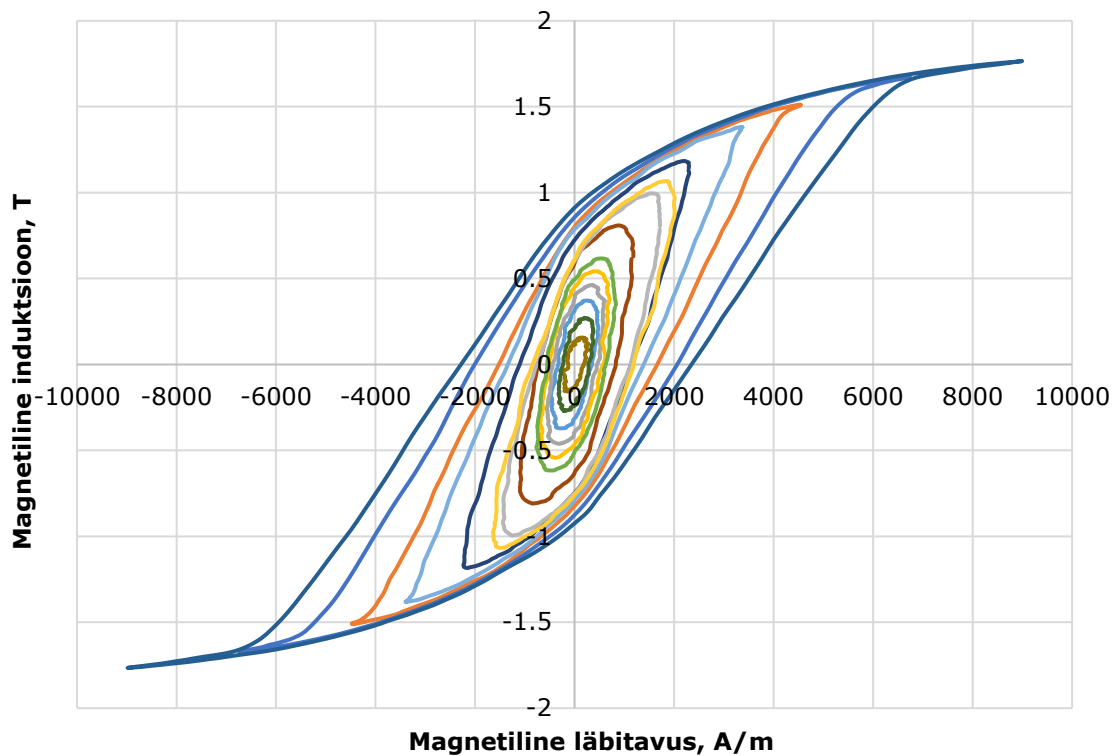


Joonis 2.6. Sekundaarmähise pinget



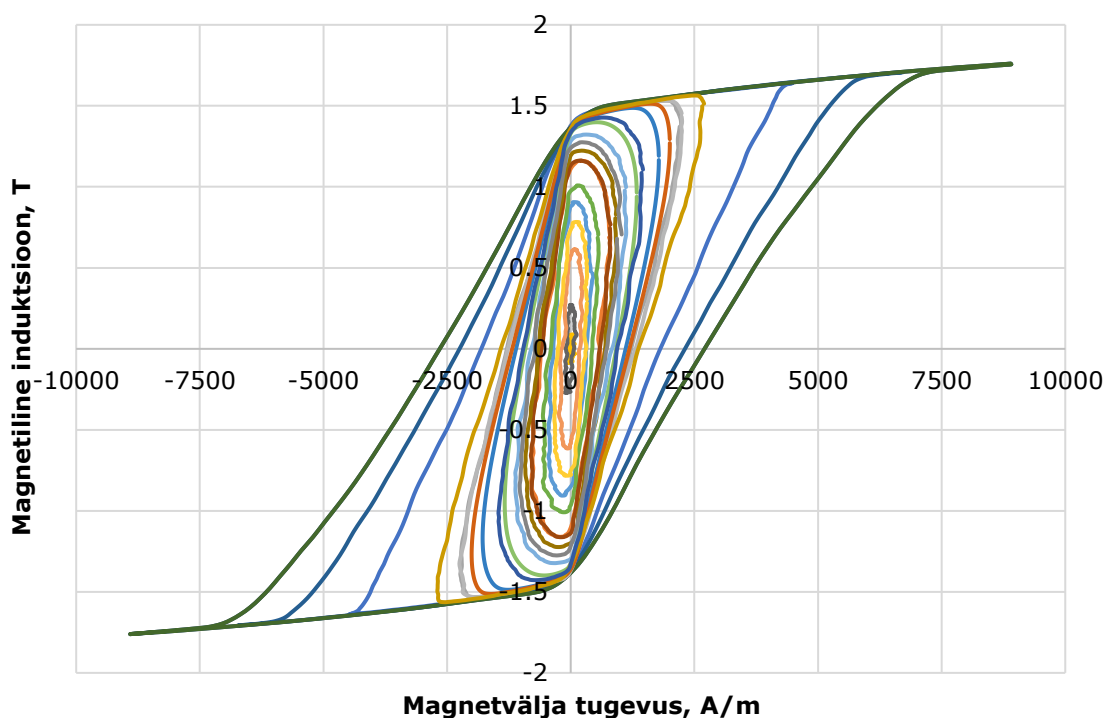
Joonis 2.7. Primaarmähise vool

Joonisel 2.8 on toodud 0,15 T – 1,76 T juures katseliselt leitud lõõmutama materjali hüstereesisilmused 50 Hz juures. Nende põhjal leiti materjali magneetumiskõver, kogukaod, koertsitiivsus ja remanents erinevate magnetvälja tugevuste juures sagedusel 50 Hz.



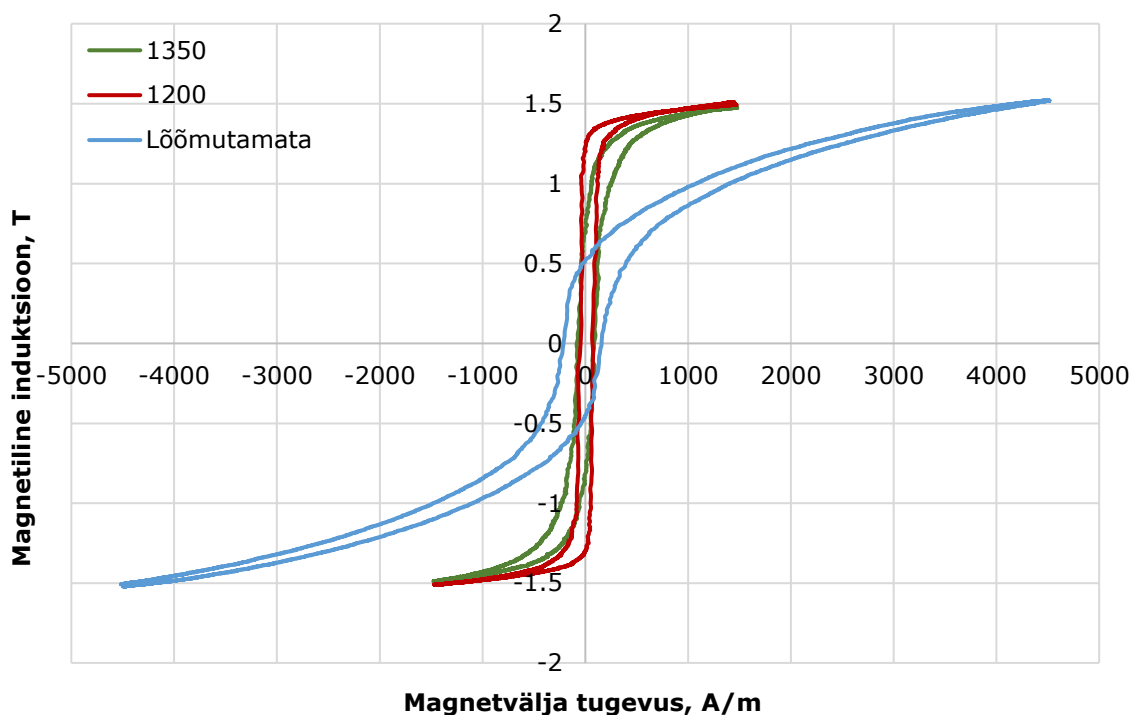
Joonis 2.8. Lõõmutamata materjali 0,15 T – 1,76 T hüstereesisilmused 50 Hz juures

Joonisel 2.9 on toodud 1200 °C juures lõõmutatud toroidi 0,1 T – 1,76 T hüstereesisilmused 50 Hz puhul. Märkata on oluliselt suurem silmuste tõus. Sarnaselt joonistele 2.8 ja 2.9 leiti igale täistoroidile hüstereesi silmused nii 50 Hz, 1 Hz, kui ka 25 mHz juures.



Joonis 2.9. 1200°C juures lõõmutatud materjali 0,3 T – 1,76 T hüstereesisilmused 50 Hz juures

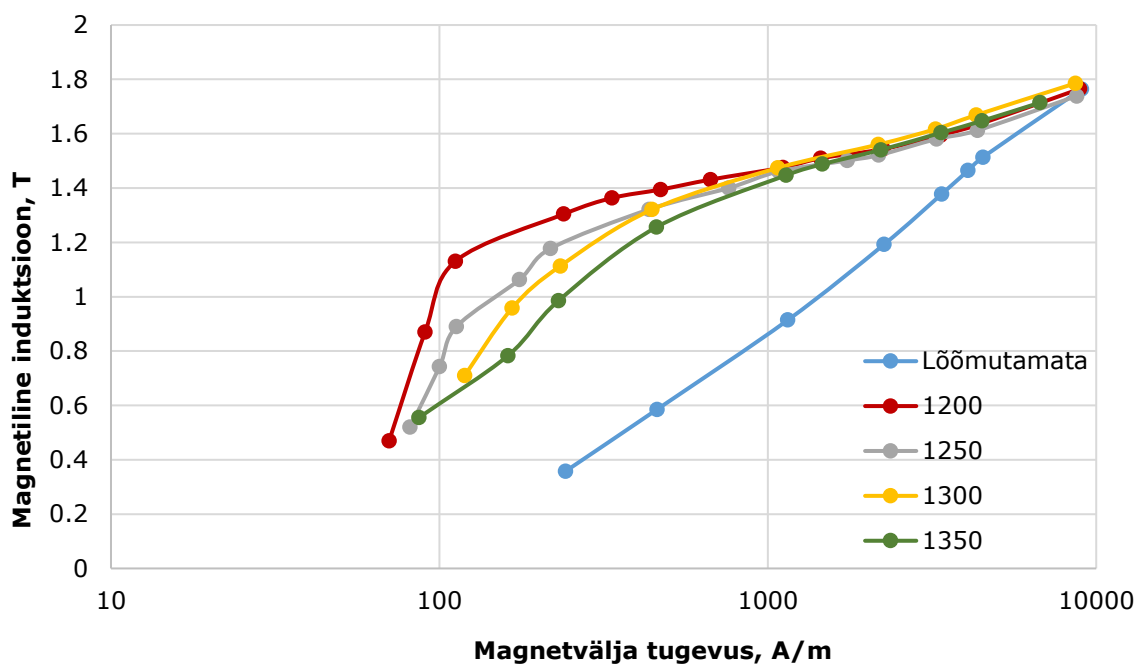
Joonisel 2.10 on välja toodud lõõmutamata, 1200 °C ja 1350 °C juures lõõmutatud materjalide hüstereesisilmused, kui magnetiline induktsioon on ~1,5 T ja sagedus 25 mHz. Hüstereesisilmuseid võrreldes on selgelt näha lõõmutamise mõju materjali omadustele. Lõõmutamata materjali hüstereesisilmus on lai ja madala tõusuga, seega on lõõmutamata materjalil suuremad kaod, koertsitiivsus ja väiksem remanents. 1200 °C juures lõõmutatud materjali hüstereesisilmus on palju kitsam ja järsema tõusuga, seega materjalil on väiksem hüstereesisilmuse pindala (väiksemad kaod), suurem remanents ja väiksem koertsitiivsus. Seda materjal on kerge magneetida ja übermagneetida. 1350 °C juures lõõmutatud materjali hüstereesisilmus on küll palju kitsam ja suurema tõusuga kui lõõmutamata toroidi oma aga siiski on laugem, kui 1200 °C juures lõõmutatud toroidi hüstereesisilmus. Seega on 1350 °C juures lõõmutatud toroidil suuremad kaod, väiksem remanentsus ja suurem koertsitiivsus kui 1200 °C juures lõõmutatud toroidil.



Joonis 2.10. Lõõmutamata, 1200 °C ning 1350 °C juures lõõmutatud toroidide hüstereesisilmused ~1,5 T 25 mHz juures

Joonisel 2.11 on näha täistoroidide magneetimiskõverad 25 mHz puhul. Kuna magneetimiskõvera moodustavad erineva magnetvälja tugevuse juures tekkinud hüstereesisilmuste maksimumpunktid, on magneetmiskõverate puhul näha samasugust seaduspärasust nagu joonisel 2.10. Lõõmutamata toroidi magneetimiskõver on laugem kui lõõmutatud toroidide oma ning vajab enim magnetvälja tugevust materjali magneetimiseks. Kuna kirjanduses on tavaliselt toodud erinevatele magnetmaterjalide

magnetiline induksioon magnetvälja tugevusel 2500 A/m ja 5000 A/m, siis kanti iga magneetimiskõvera vastavad tulemused tabelisse 2.5.



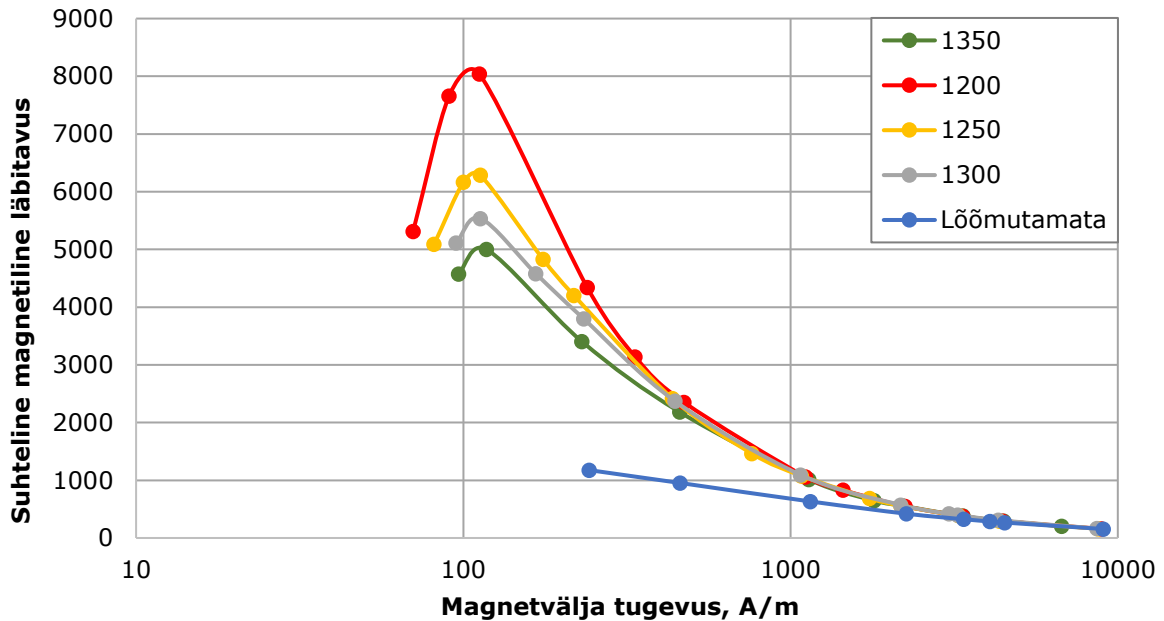
Joonis 2.11. Täistoroidide magneetimiskõverad, 25 mHz

Tabel 2.5 Täistoroidide magneetimiskõvera tulemused

Toroidi lõõmutus-temperatuur °C	Lõõmutamata	1200	1250	1300	1350
Magnetiline induksioon (T), kui $H=2500$ A/m	1,24	1,55	1,54	1,58	1,55
Magnetiline induksioon (T), kui $H=5000$ A/m	1,54	1,65	1,62	1,69	1,66

Joonisel 2.12 on toodud prinditud magnetmaterjali suhteline läbitavus. Suhteline läbitavus muutub sarnaselt joonisele 2.10, mida laugema tõusuga on materjali hüstereesisilmus, seda väiksem on selle materjali magnetiline suhteline läbitavus. Kõige suurem suhteline magnetiline läbitavus, 8050, on 1200 °C juures lõõmutatud toroidil. Temale järgneb 1250 °C juures lõõmutatud toroid suhtelise magnetilise läbitavusega 6290. 1300 °C juures lõõmutatud toroidil oli suhteline magnetiline läbitavus 5540 ja 1350 °C juures lõõmutatud toroidil 5000. Lõõmutamata toroidi puhul jäi suurimaks

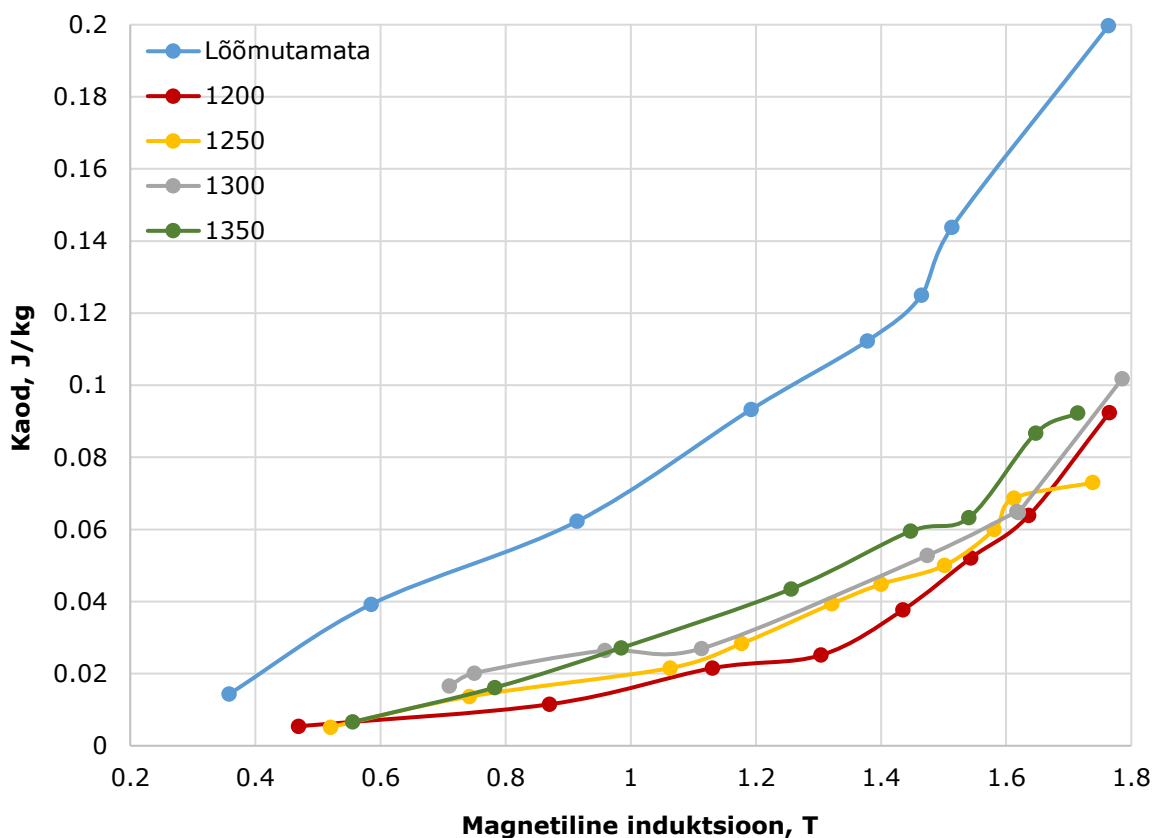
suhteliseks magnetiliseks läbitavuseks vaid 1180, kuna madalamatel magnetvälja tugevustel ei õnnestunud mõõtmisi teha. Madalamatel magnetväljatugevustel indutseeriti sekundaarmähisesse nii väike pinge, et müra tõttu polnud seda enam võimalik täpselt mõõta.



Joonis 2.12. Prinditud magnetmaterjali suhteline magnetiline läbitavus

Suhteline magnetiline läbitavus on laugema tõusuga hüstereesisilmuse puhul väiksem, seda saab põhjendada valemi 2.5 abil. Valemit 2.5 vaadates selgub, et mida suurem magnetiline induksioon saavutatakse samal magnetvälja tugevusel, seda suurem on valemi vastus. Seega mida suurem on materjali suhteline magnetiline läbitavus, seda lihtsamini materjal magneetub ja seda lihtsam on materjali ümber magneetida.

Joonisel 2.14 on leitud toroidide kaod sõltuvalt magnetilisest induksioonist 25 mHz juures. Kuna sagedus on väga madalal, võib kadudeks lugeda vaid hüstereesikadusid. Sellel joonisel on hästi näha lõõmutustemperatuuri mõju toroidi hüstereesikadudele. Lõõmutamata materjali hüstereesikaod on märkimisväärselt suuremad lõõmutatud materjalide kadudest, olles 1 T juures 0,071 J/kg kohta ja 1,5 T juures 0,14 J/kg. Lõõmutatud materjalidel on kõige väiksemad kaod 1200 °C juures lõõmutatud toroidil, jäädes 1 T juures 0,017 J/kg ja 1,5 T juures 0,046 J/kg. Kõikide täistoroidide hüstereesikaod 1 T ja 1,5 T juures kanti tabelisse 2.6.



Joonis 2.14. Magnetmaterjali kaod erinevatel lõõmutustel 25 mHz juures

Tabel 2.6. Täistoroidide hüsteresikaod

Toroidi lõõmutus-temperatuur °C	Lõõmutamata	1200	1250	1300	1350
Hüsteresikaod (J/kg), kui $B=1\text{ T}$	0,071	0,017	0,020	0,026	0,029
Hüsteresikaod (J/kg), kui $B=1,5\text{ T}$	0,14	0,046	0,050	0,055	0,061

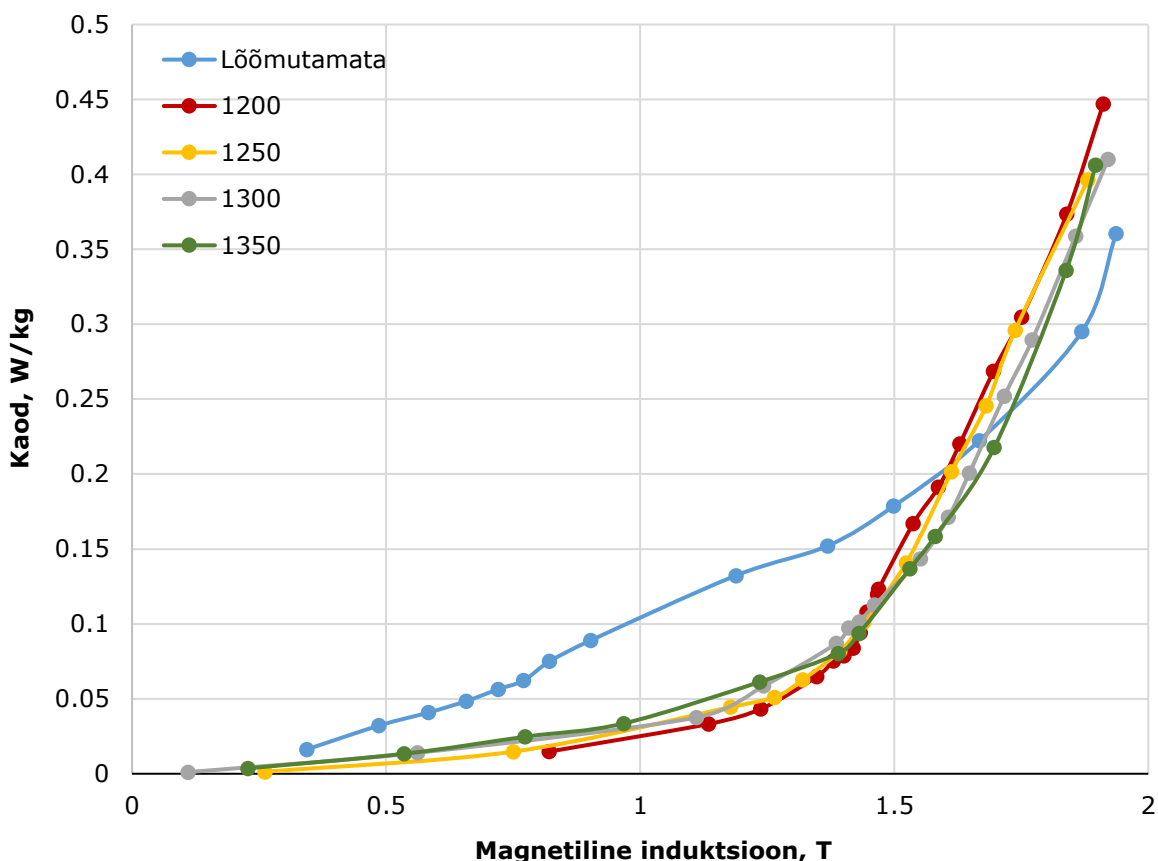
Joonisel 2.15 on näha, et võrreldes 25 mHz juures tehtud katsega on materjali kaod 1 Hz juures tehtud katsel tõusnud. Kaod suurenevad sageduse tõstmisel kuna kõrgemal sagedusel suurenevad magnetsüdamiku pöörivoolu kaod. Tabelisse 2.7 kanti kõikide täistoroidide kaod 1 T ja 1,5 T juures sagedusel 1 Hz.

Kuni 1,6 Teslani selgelt suuremad kaod lõõmutamata toroidil, 1 T juures 0,105 W/kg ja 1,5 T juures 0,18 W/kg. Peale 1,8 T on lõõmutamata materjali kaod väiksemad kui lõõmutatud materjalidel.

Lõõmutatud materjalide kaod on üksteisega sarnased, kuid alates 1,45 T püsivad 1200 °C juures lõõmutatud toroidi kaod kõige suuremad. 1 T juures on kaod kõige madalamad 1200 °C juures lõõmutatud toroidil, jäädes 0,025 W/kg juurde ja 1,5 T juures kõige madalamad kaod on 1350°C juures lõõmutatud toroidil, 0,121 W/kg.

1 Hz juures hüstereesikadude leidmiseks, tuleb korrutada materjali hüstereesikaod läbi 1ga, mille tulemused kantakse tabelisse 2.7. Võrreldes 25 mHz selgub, et lõõmutamata toroidil tõusid kaod 1 Hz puhul 1 T juures 0,071 W/kg pealt 0,105 W/kg peale. 1,5 T juures tõusid kaod 0,14 W/kg pealt 0,18 W/kg peale. Kuna materjali hüstereesikaod ei muutu sageduse tõstmisel, siis hüstereesikaod moodustasid lõõmutamata materjalil 1 Hz juures 1 T juures ligi 67,6 % ja 1,5 T juures ligi 77,8 % kogukadudest.

1200°C juures lõõmutatud toroidil tõusid kaod 1 Hz juures 1 T juures 0,017 W/kg pealt 0,025 W/kg peale ja 1,5 T juures 0,046 W/kg pealt 0,141 W/kg peale. Hüsteresikaod moodustasid 1 T juures 68,0 % ja 1,5 T juures 32,6 % kogukadudest.



Joonis 2.15. Magnetmaterjali kogukaod erinevatel lõõmutustel 1 Hz juures

Tabel 2.7. Magnetmaterjali kaod 1 Hz juures erinevatel lõõmutustel

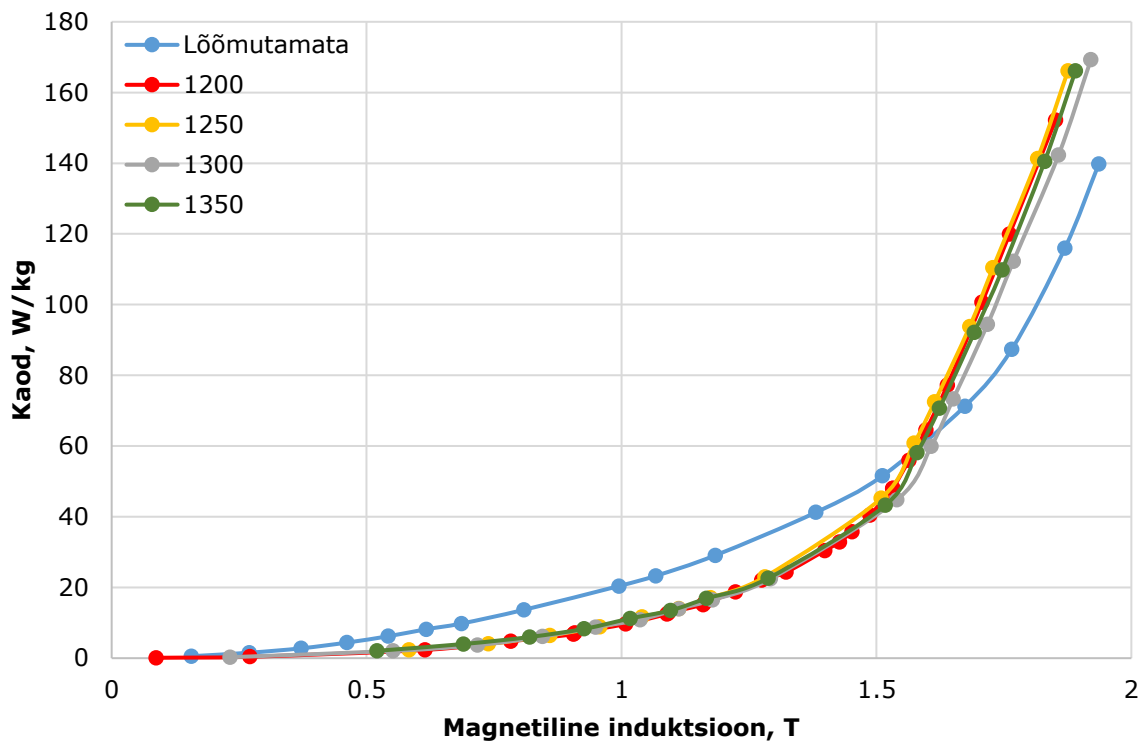
Toroidi lõõmutus-temperatuur °C	Lõõmutamata	1200	1250	1300	1350
Hüstereesikaod (W/kg), kui B=1 T	3,55	0,85	1	1,3	1,45
Hüstereesikaod (W/kg), kui B=1,5 T	7	2,3	2,5	2,75	3,05
Kogukaod (W/kg), kui B=1 T	0,105	0,025	0,031	0,041	0,036
Kogukaod (W/kg), kui B=1,5 T	0,180	0,141	0,129	0,125	0,121

Joonisel 2.16 on toodud magnetmaterjali kogukaod sagedusel 50 Hz. 1,5 Teslani on kõige suuremad kaod lõõmutamata toroidil. Kui magnetiline induksioon on tõusnud üle 1,65 T jäävad kaod kõige madalamaks lõõmutamata toroidil, temale järgnevad 1300, 1350, 1200 ja 1250 kraadi juures lõõmutatud toroidid. Tabelisse 2.8 kanti kõikide täistoroidide kaod 1 T ja 1,5 T juures sagedusel 50 Hz.

Kõige suuremad kaod on lõõmutamata toroidil, olles 1 T juures ligi 21 W/kg kohta ja 1,5 T juures 50 W/kg. Kõige madalamad kaod 1 T juures on 1200 °C juures lõõmutatud toroidil, jäädes 9,5 W/kg juurde. 1,5 T juures on kõige madalam kadu 1300 °C juures lõõmutatud toroidil, 41 W/kg.

Võrreldes joonist 2.20 joonisega 2.18 on näha, et materjali kaod on tõusnud hüppeliselt kõikide katsekehade puhul. Lõõmutamata toroidil olid hüstereesikaod 1 T juures 3,55 W/kg ja 1,5 T juures 7 W/kg ning 50 Hz juures on kogukaod vastavalt 21 W/kg ja 50 W/kg. Selgub, et hüstereesikaod moodustavad kogukadudest 50 Hz puhul 1 T puhul vaid 16,9 % ja 1,5 T puhul 14 %.

1200 °C lõõmutatud toroidi hüstereesikaod olid 1 T juures 0,85 W/kg ja 1,5 T juures 2,3 W/kg, 50 Hz juures on kogukaod tõusnud 1 T juures 9,5 W/kg ja 1,5 T puhul 43 W/kg. Siin moodustavad hüstereesikaod 1 T juures 8,95 % ja 1,5 T juures 5,35 % kogukadudest.



Joonis 2.16. Magnetmaterjali kogukaod erinevatel lõõmutustel 50 Hz juures

Võrreldes erinevatel sagedustel tehtud täistoroididega katseid, selgub et kõige väiksemad hüstereesikaod on võimalik saavutada lõõmutades toroidi 1200 °C juures. Kui tõsta sagedust 1 Hz peale suurenevad pöörivoolukaod ja seetõttu ka materjali kogukaod igal katsekehal, kuid lõõmutamata katsekehal moodustavad hüstereesikaod veel üsna suure osa kogukadudest. 50 Hz puhul selgub, et lõõmutamata ja lõõmutatud materjalide kogukadude vahe väheneb võrreldes 1 Hz ja 25 mHz juures tehtud katsetega. Vahe väheneb, kuna 50 Hz juures moodustavad materjalide hüstereesikaod väga väikese osa materjalide kogukadudest, alla 10 %. Seetõttu on sellise magnetmaterjali kasutamiseks vahelduvvoolu ahelas vaja vähendada materjali pöörivoolukadusid.

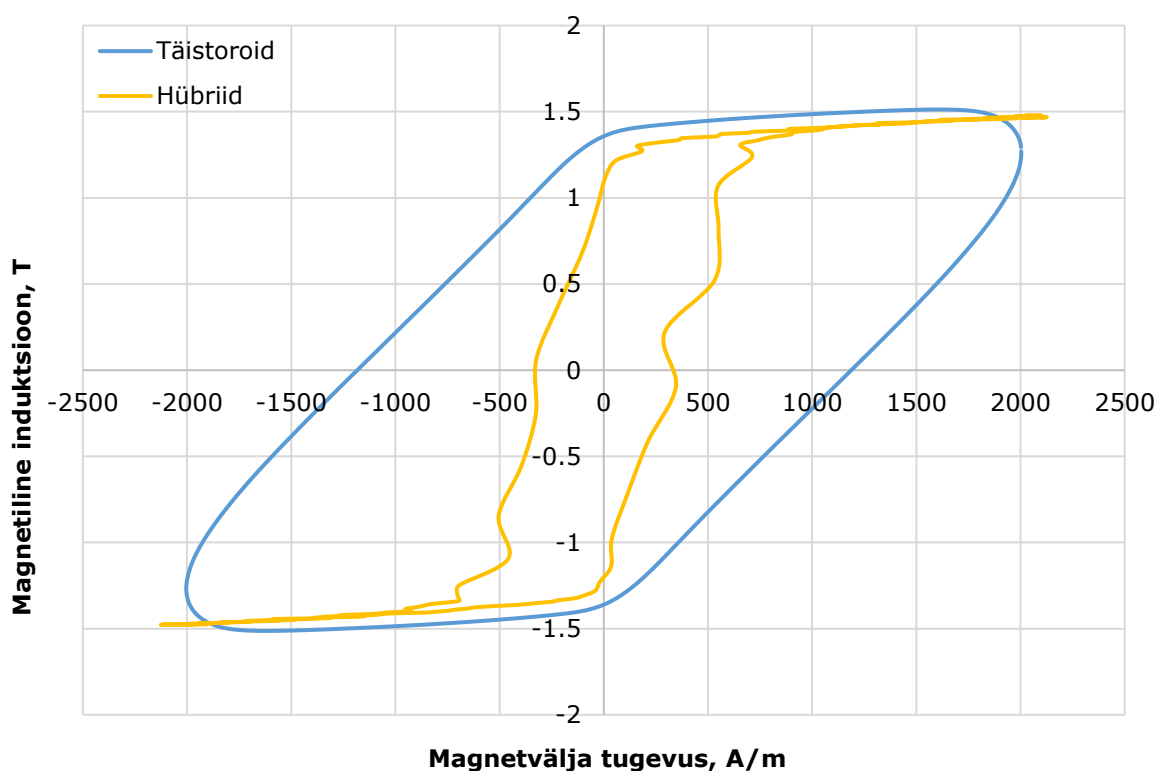
Tabel 2.8. Magnetmaterjali kaod 50 Hz juures erinevatel lõõmutustel

Toroidi lõõmutus-temperatuur °C	Lõõmutamata	1200	1250	1300	1350
Hüstereesikaod (W/kg), kui $B=1$ T	3,55	0,85	1	1,3	1,45
Hüstereesikaod (W/kg), kui $B=1,5$ T	7	2,3	2,5	2,75	3,05
Kogukaod (W/kg), kui $B=1$ T	21	9,5	10	10	11
Kogukaod (W/kg), kui $B=1,5$ T	50	43	44	41	41,5

2.3.2 Õhupiludega toroidide tulemused

Vastavalt eelmise peatüki mõtetulemustele lõõmutati õhupiludega toroidid 1200 °C juures. See termiline töötlus andis parimad pehmed magnetilised omadused.

Joonisel 2.17 on välja toodud täistoroidi ja hübriidsete õhupiludega toroidi hüstereesisilmused sagedusel 50 Hz kui magnetiline induksioon on ~1,5 T. Hübriidse toroidi hüstereesisilmus on palju kitsam kui 1200 °C juures lõõmutatud täistoroidi puhul. Seega on õhupiludega toroidil väiksema pindalaga hüstereesisilmuse tõttu väiksemad kaod ning tal on väiksem koertsitiivsus ning suurem remanents. Seetõttu on seda materjali lihtsam ümber magneetida ning ta on sobilikum vahelduvvoolu elektrimasinates kasutamiseks kui materjal millel õhupilusid pole. Väiksemad kaod saavutatakse, kuna õhupilud materjalis suurendavad magnetsüdamiku elektrilist takistust.



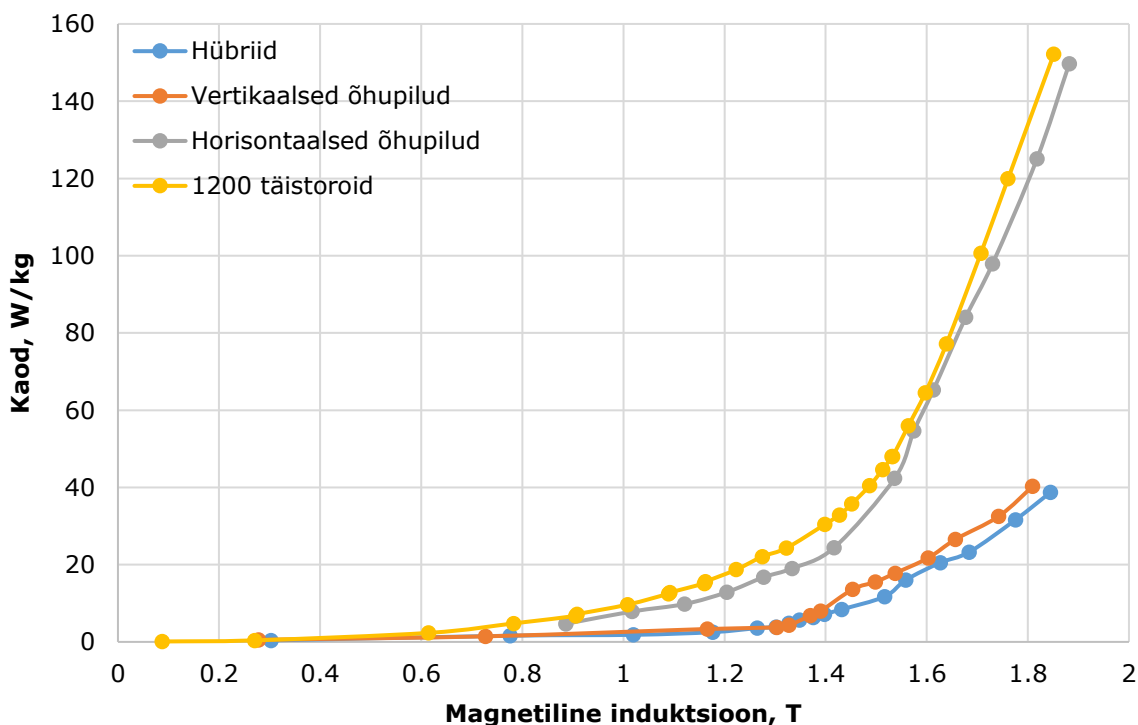
Joonis 2.17. Hüsteresisilmused 50 Hz, $H \sim 1,5$

Joonisel 2.18 on toodud erineva topoloogiaga toroidide kogukaod. Katsekehade hulgas on erinevate õhupiludega toroidid ja täistoroid, mis kõik on lõõmutatud 1200 °C juures. Tabelisse 2.9 kanti katetatud toroidide kaod 1 T ja 1,5 T juures sagedusel 50 Hz. Kõige suuremad kaod on täistoroidil, 1 T juures 9,5 W/kg ja 1,5 T juures 42 W/kg. See oli ka oodatav tulemus, kuna täistoroidil on kõige suuremad pöörivoolu kaod.

Kõige madalamad kaod saavutati nii vertikaalseid kui horisontaalseid õhupilusid omavahel kombineerides, nii jäi 1 T juures hübriidtoroidi kaoks 1,8 W/kg ja 1,5 T juures 11 W/kg.

Vertikaalsete õhupilude kasutamisel langesid kaod 1 T juures 80 % ja 1,5 T juures 64 %. Horisontaalsete õhupilude kasutamisel langesid kaod 1 T juures 31 % ja 1,5 T juures 15 %. Kasutades nii vertikaalseid kui ka horisontaalseid õhupilusid langesid kaod 1 T puhul 81 % ja 1,5 T puhul 74 %.

Eelnevalt on teada, et hüsteresikaod 1200 °C juures lõõmutades olid 1 T juures 0,85 W/kg ja 1,5 T juures 2,3 W/kg. Kuna hüsteresikaod ei muutu materjali topoloogiast siis arvutati, kui suure osa kogukadudest moodustavad hüsteresikaod õhupiludega toroididel. Tulemused kanti tabelisse 2.9. Tabeli 2.9 andmetel selgub, et hüsteresikaod moodustasid kõige suurema osa kogukadudest hübriidtoroidil, mis oli ka oodatav tulemus. Kuna hübriidtoroidil on kõige väiksemad kogukaod võrreldud katsekehade seast ja hüsteresikaod ei muutu, siis järelikult on temal kõige väiksemad pöörivoolukaod.

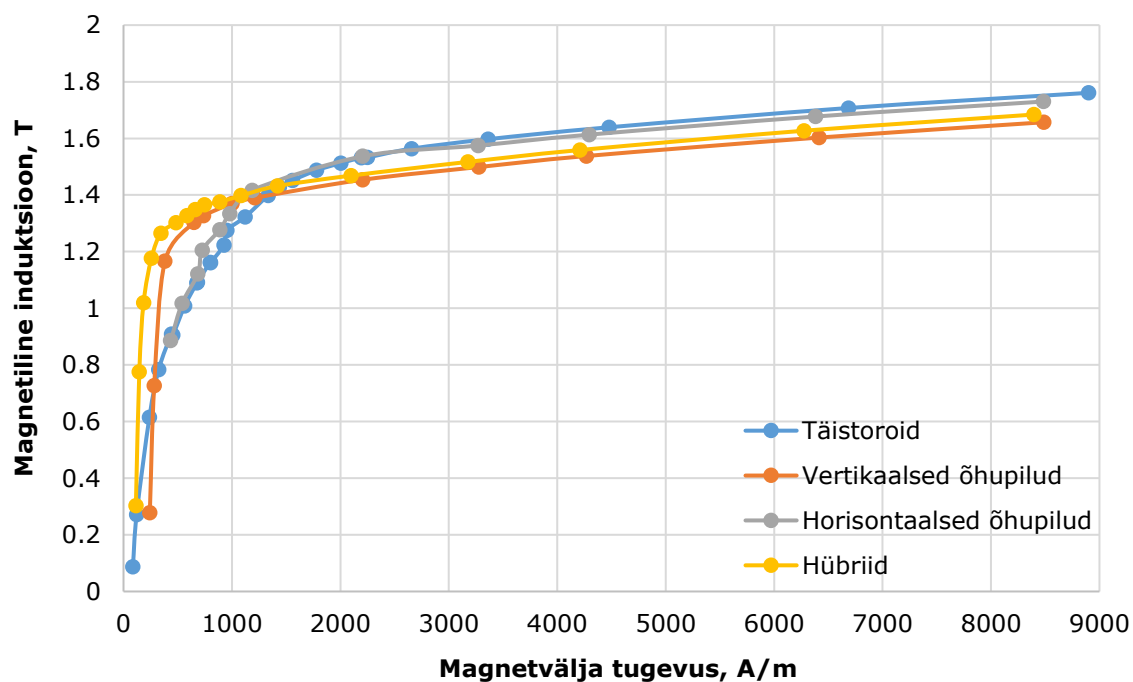


Joonis 2.18. Toroidide kaod sõltuvalt topoloogiast, 50 Hz

Tabel 2.9. Magnetmaterjali kaod 50 Hz juures erinevate topoloogiate korral

Toroidi topoloogia	Täistoroid	Horisontaalsete õhupiludega toroid	Vertikaalsete õhupiludega toroid	Hübriidsete õhupiludega toroid
Kogukaod (W/kg), kui $B=1\text{ T}$	9,5	7,5	1,9	1,8
Kogukaod (W/kg), kui $B=1,5\text{ T}$	43	36,5	15,5	11
Hüstereesikadude hulk kogukadudest (%), kui $B=1\text{ T}$	8,95	11,33	44,74	47,22
Hüstereesikadude hulk kogukadudest (%), kui $B=1,5\text{ T}$	5,35	6,30	14,84	20,91

Joonisel 2.19 on toodud hübriidtoroidi (horisontaalsete ja vertikaalsete õhupiludega toroid) magneetimiskõver. Selgub, et 50 Hz juures saavutati hübriidse toroidi puhul suurim magnetiline induksioon kuni 1000 A/m magnetvälja tugevustel. Üle 2500 A/m magnetvälja tugevusel oli suurim magnetiline induksioon täistoroidil aga tema suurte kadude tõttu ei ole ta siiski vahelduvvoolu ahelates efektiivne kasutada. Iga katsekeha magnetiline induksioon magnetvälja tugevusel 2500 A/m ja 5000 A/m esitati tabelis 2.10.



Joonis 2.19. Erineva topoloogiaga toroidide magneetimiskõverad, 50 Hz

Tabel 2.10 Erineva topoloogiaga toroidide magneetimiskõverate tulemused

Toroidi topoloogia	Täistoroid	Horisontaalsete õhupiludega toroid	Vertikaalsete õhupiludega toroid	Hübriidsete õhupiludega toroid
Magnetiline induktsioon (T), kui $H=2500$ A/m	1,55	1,55	1,45	1,49
Magnetiline induktsioon (T), kui $H=5000$ A/m	1,65	1,63	1,55	1,59

Võrreldes erineva topoloogiaga toroidide katseid, selgub et kõige väiksemad kogukaod on võimalik saavutada printides katsekehale nii horisontaalsed kui vertikaalsed õhupilud. Kuna erineva topoloogiaga toroidid olid prinditud ja töödeldud ühtedel tingimustel, siis nende hüstereesikaod püsisid muutumatuna. Järelikult õnnestus madalamad kaod saavutada pöörivoolu kadusid vähendades. Siiski moodustasid pöörivoolukaod 1 T juures 52,88 % ja 1,5 T juures 79,09 % kogukadudest.

2.4 Katsetulemuste võrdlus

Katsetulemusi võrreldi nii klassikaliselt kasutatavate magnetmaterjalidega, kui ka eelnevates uurimustes 3D prinditud magnetmaterjalidega. Klassikaliste materjalide andmed saadi standardist EN-10106:2015. Tulemuste analüüsiks koostati tabel 2.11 kuhu kanti klassikalistel meetoditel toodetud magnetmaterjalide parameetrid, tabel 2.12 kuhu lisati selle töö tulemused ja tabel 2.13 kuhu lisati eelnevalt tehtud sarnase töö tulemused.

Tabel 2.11. Kommertsiaalsetel meetoditel toodetud magnetmaterjalide parameetrid [23]

Magnetmaterjal	Laminatsiooni paksus (mm)	Kaad 1 T, 50 Hz (W/kg)	Kaad 1,5 T, 50 Hz (W/kg)	Magnetiline induktsioon (T), kui $H=2500$ A/m	Magnetiline induktsioon (T), kui $H=5000$ A/m
M250-35A	0,35	1,0	2,5	1,49	1,6
M270-50A	0,5	1,1	2,7	1,49	1,6
M400-50A	0,5	1,7	4,0	1,53	1,63
M700-65A	0,65	3	7	1,57	1,67
M1000-100A	1,0	4,4	10	1,58	1,68

Tabel 2.12. 3D prinditud ja 1200 °C juures lõõmutatud magnetmaterjalide katsetulemused

Toroidi topoloogia	Täistoroid	Horisontaalsete õhupiludega toroid	Vertikaalsete õhupiludega toroid	Hübriidsete õhupiludega toroid
Hüstereesi- kaod 1 T, 50 Hz (W/kg)	0,85			
Hüstereesi- kaod 1,5 T, 50 Hz (W/kg)	2,3			
Kogukaod (W/kg), kui $B=1$ T	9,5	7,5	1,9	1,8
Kogukaod (W/kg), kui $B=1,5$ T	43	36,5	15,5	11
Magnetiline induktsioon (T), kui $H=2500$ A/m	1,55	1,55	1,45	1,49
Magnetiline induktsioon (T), kui $H=5000$ A/m	1,65	1,63	1,55	1,59

Tabel 2.13. Eelnevas uurimustöös 3D prinditud magnetmaterjalide katsetulemused [7]

Katsekeha	Hüstereesikaod 1 T, 50 Hz (W/kg)	Hüstereesikaod 1,5 T, 50 Hz (W/kg)	Kaod 1 T, 50 Hz (W/kg)	Kaod 1,5 T, 50 Hz (W/kg)
Täistoroid (800 °C)	2,6	5,3	15,3	30,5
Ühe õhupiluga toroid (800 °C)			7,5	18,3
Nelja õhupiluga toroid (800 °C)			3,3	6,6
Täistoroid (1200 °C)	0,61	1,7	10,4	28,3
Ühe õhupiluga toroid (1200 °C)			3,6	11,7
Nelja õhupiluga toroid (1200 °C)			1,2	5,5

Tabeleid 2.12 ja 2.13 võrreldes selgub, et eelnevalt tehtud sarnases töös saavutati väiksemad hüstereesikaod, kui käesolevas töös. Selle põhjuseks võis olla, et eelnevas töös kaks korda prinditud (laser re-melting) ja lõõmutatud materjali kristallstruktuur võis tulla paremate pehmete magnetiliste omadustega. Pöörivoolukaod olid eelnevas töös madalamad, kuna seal kasutati õhemaid laminatsioone ja väiksemaid toroide kui käesolevas töös.

Võrreldes selles töös 3D prinditud katsekehade tulemusi kommertsmaterjalidega (vt. tabel 2.11 ja tabel 2.12), selgub et 1 T juures on võrreldavatest kommertsmaterjaldest üsna sarnaste kadudega magnetmaterjal M400-50A. Materjali M400-50A kogukadu on 0,1 W/kg madalam võrreldes 3D prinditud materjaliga. Materjali M700-65A kogukadu 1 T juures ületab 66,7 % ja materjali M1000-100A kogukadu lausa 144,4 % 3D prinditud magnetmaterjali kogukadusid.

1,5 T juures on aga 3D prinditud materjali kaod tunduvalt suuremad ja isegi kõige paksema laminatsiooni magnetmaterjal M1000-100A kogukadu jääb 3D prinditud 1 W/kg võrra madalamaks. Võrreldes materjaliga M400-50A oli 3D prinditud materjali erikadu 1,5 T juures 175% suurem.

Võrreldes tabelleid 2.11 ja 2.12, selgub et 3D prinditud hübriidsete õhupiludega toroidi magnetilise induktsiooni väärtused on 2500 A/m ja 5000 A/m juures väga sarnased materjalidele M250-35A ja M270-50A. 3D prinditud toroidil on 2500 A/m juures täpselt sama suur magnetiline induktsioon, kui klassikalisel magnetmaterjalil ja 5000 A/m juures jääb see vaid 0,1 võrra madalamaks.

2.5 3D prinditud materjali kasutusvõimalused

3D prinditud magnetmaterjalidel on üsna suured pöörivoolukaod, kuna ei ole võimalik printida mitut materjali korraga. Seetõttu on keerukas luua materjali kihtidele laminatsioone, mis aitavad vähendada pöörivoolukadusid. Laminatsioone saab luua 3D prinditud materjalis printides sinna õhupilud, siiski olid prinditud materjalis üsna paksud laminatsioonid, 0,75 mm, ja samuti on toroidi osad omavahel ühendatud peenikeste tugedegaga. Seetõttu pole kihid omavahel ideaalselt isoleeritud ja pöörivoolukaod on suuremad kui ideaalselt isoleeritud õhemate laminatsioonide puhul.

Preagune 3D printimise tehnoloogia sobib väga hästi kasutusaladele, kus ei ole vaja materjali ümber magneetida. PBF meetodil on võimalik toota suure täpsusega detaile, mistõttu saab luua keeruka kujuga mootori struktuure, mis varem polnud mõeldavad. Näiteks saab toota sünkroonmasina rootoreid, mis on kergemad ja suurema võimsustihedusega [1]. Kuigi tavapäraselt esineb sünkroonmasinate rootorites siiski pöörivoolukadu, on seda võimalik vähendada tunduvalt muutes rootori topoloogiat [1]. Samuti saab toota rootoreid, millel on sees soojusvaheti, või on sinna integreeritud ventilaator. Ventilaatori integreerimine või alumiiniumist kärgstruktuuri printimine mootori sisse aitab mootoreid paremini jahutada, mis on eriti vajalik kompaksemate ja suurema võimsustihedustega mootorite saavutamiseks [6].

KOKKUVÕTE

Töös uuriti kuidas sõltuvad 3D prinditud magnetmaterjali omadused katsekeha topoloogiast ja termotööstusest. Töö eesmärgiks oli leida katsekehade seast kõige väiksemate hüstereesi- ja kõige väiksemate pöördvoolukadudega katsekehad. Selleks prinditi kaheksa toroidi, millest viis olid täistoroidid ehk neil puudusid õhupilud ja kolm olid õhupiludega toroidid. Mõõtmisi tehti magnetvälja tugevusel 100 – 9000 A/m. Täistoroide katsetati sagedustel 25 mHz, 1 Hz ja 50 Hz. 25 mHz juures uuriti hüstereesikadusid, kõrgematel sagedustel mõõtmisi tehti hindamaks, kuidas kogukaod tõusevad sageduse suurenemisel täistoroidil.

Selle töö eesmärkideks oli:

- Katseliselt määrata erinevate termotööstuste mõju 3D prinditud magnetsüdamikute pehmetele magnetomadustele
- Katseliselt määrata õhupilude mõju 3D prinditud magnetsüdamike pöörisvoolukadudele
- Leida 3D prinditud materjali magneetimisikõverad, selleks et seda materjali saaks kasutada elektrimasinate projekteerimiseks ja modelleerimiseks
- Võrrelda 3D prinditud materjali kommertsiaalsete laminatsioonidega

Kõik töö eesmärgid said täidetud. Selgus, et kõige optimaalsem lõõmutustemperatuur oli 1200 °C ja pöörisvoolu kaod olid väikseimad magnetsüdamikul, millel kasutati nii vertikaalseid- kui horisontaalseid õhupilusid. Katse tulemused olid oodatavad, ning need olid võrreldavad kommertsiaalsete laminatsioonidega ja nende põhjal oli võimalik välja joonestada materjali magneetimisikõverad.

Termotööstuse mõju 3D prinditud magnetsüdamikute pehmetele magnetomadustele uuriti 1200 °C, 1250 °C, 1300 °C ja 1350 °C juures lõõmutatud täistoroidide abil. Lõõmutamistemperatuuri tõstmisel üle 1200 °C materjali kogukaod kasvasid. 1200 °C lõõmutatud toroidil hüstereesikadu oli 1 T juures 0,017 J/kg ja 1,5 T juures 0,046 J/kg. 50 Hz juures hüstereesikaod tõusid, see tähendab hüstereesikadusid 1 T juures 0,85 W/kg ja 1,5 T juures 2,3 W/kg.

Õhupilude mõju uurimiseks prinditi vertikaalsete-, horisontaalsete- ja nii horisontaalsete kui vertikaalsete õhupiludega toroid. Õhupilude kasutamisega alandati pöörisvoolukadusid märkimisväärselt. Kõige efektiivsem oli kasutada nii vertikaalsete- kui horisontaalsete õhupiludega ehk hübriidset struktuuri. 50 Hz puhul olid selle toroidi kogukaod 1 T juures 1,8 W/kg ja 1,5 T juures 11 W/kg.

Materjali magneetimiskõverad koostati andmete analüüsil madalal sagedusel välja joonistatud hüstereesisilmuste põhjal. Magneetimiskõverad esitati 25 Hz puhul kõikidele erinevate löömutustega toroididele, mille seas on ka parimate pehmete magnetomadustega 1200 °C juures löömutatud katsekeha. Esitatud magneetimiskõvera saab sisestada elektrimootori projekteerimise käigus vastavasse programmi ning modelleerida selle abil elektrimootori tööd ja parameetreid.

Selles töös 3D prinditud vertikaalsete- ja horisontaalsete õhupiludega katsekeha oli 2500 A/m ja 5000 A/m magnetilise induksiooni väärtuse poolest võrreldav klassikaliste materjalidega. Samuti olid selle südamikuga kaod 50 Hz, 1 T juures vaid 0,1 W/kg suuremad kui elektrimasinates laialt kasutataval M400-50A kaubanduslikul laminatsioonil.

Õhupilude lisamisega saavutati märkimisväärne kogukadude langus võrreldes täistoroidiga aga siiski moodustavad ka hübriidtoroidil 1 T juures 52,88 % ja 1,5 T juures 79,09 % kogukadudest pöörivoolukaod. Kuna oli näha, et õhuvahede lisamine vähendab pöörivoolukadusid, siis edaspidiselt tasuks katsetada veelgi rohkemate õhuvahedega ja õhemate laminatsioonidega toroidi printimist.

Tulevikutöodes saab magnetsüdamike edasi optimeerida, katsetades erinevaid topoloogiaid ning optimeerida kristallstruktuuri loomist läbi printimis parameetrite muutmise. Antud töö tulemusi saab kasutada edasistel töödel, uudsete lahendustega elektrimasinate projekteerimisel. Elektrimasinatele plaanitakse printida erinevaid soojusvaheteid, optimeeritud magnetahelate kujusid ja samuti ka elektrit juhtivaid materjale. Revolutsiooniline samm edasi tulevikus oleks mitme materjali printimise võimalus. See võimaldaks printida isolatsioonikihte, mille abil oleks võimalik vähendada magnetsüdamike pöörivoolukadusid läbi õhemate laminatsioonide. Samuti oleks võimalik printida elektrimasina mähiseid, magnetosasid ja korpust üheaegselt. See avaks täiesti uue võimaluse printida terviklik elektrimasin korruga, ilma vahe etappideta.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] H. Tiismus, A. Kallaste, T. Vaimann ja A. Rassõlkin, „State of the art of additively manufactured electromagnetic materials for topology optimized electrical machines,” ScienceDirect, 2022.
- [2] SLM Solutions, „SLM 280,” SLM Solutions, 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/machines/slm-280/>. [Kasutatud 10 märts 2022].
- [3] C. Buchanan ja L. Gardner, „Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges,” ScienceDirect, 2019.
- [4] Tallinna Tehnikaülikool, „Tõenduspõhine ülevaade efektiivsuse, ohutuse ja kulutõhususe kohta 3D printimise kasutamisel,” Tallinn, 2020.
- [5] J.-M. Lamarre ja F. Bernier, „Permanent Magnets Produced by Cold Spray Additive Manufacturing for Electric Engines,” 19 september 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11666-019-00917-6>. [Kasutatud 10 märts 2022].
- [6] M. Sarap, A. Kallaste, P. S. Ghahfarokhi, H. Tiismus ja T. Vaimann, „Utilization of Additive Manufacturing in the Thermal Design of Electrical Machines: A Review,” Mdpi, 2022.
- [7] H. Tiismus, A. Kallaste, B. Anouar, M. Tarraste, T. Vaimann, A. Rassõlkin, B. Asad ja P. S. Ghahfarokhi, „AC Magnetic Loss Reduction of SLM Processed Fe-Si for Additive Manufacturing of Electrical Machines,” 2021.
- [8] G. Karu, Füüsika lühikursus gümnaasiumile. VII, Gümnasisti A&O, Tallinn: Koolibri, 2002.
- [9] R. Lahtmets, „Elektrotehnika alused,” Tallinn, 2001.
- [10] „Magnetmaterjalid,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://sites.google.com/site/terased/2-mustad-metallid-ja-nendesulamid/2-3-magnetmaterjalid>. [Kasutatud 10 märts 2022].
- [11] J. Walker, D. Halliday ja R. Resnick, Füüsika põhikursus, kd. 2, Canada: John Wiley & Sons, 2008.
- [12] J. Lucas ja P. Sutter, „What is magnetism? Facts about magnetic fields and magnetic force,” 2 veebruar 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.livescience.com/38059-magnetism.html>. [Kasutatud 30 märts 2022].

- [13] JavaTpoint, „Difference between paramagnetic and diamagnetic,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.javatpoint.com/paramagnetic-vs-diamagnetic>. [Kasutatud 30 märts 2022].
- [14] Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, „Magnetmaterjalid,” 2020.
- [15] „DIY Electrical Electronics Projects,” [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.electricalbasicprojects.com/what-is-hysteresis-loss-hysteresis-loop/>. [Kasutatud 10 märts 2022].
- [16] Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, „Laborijuhend nr.4 "Magnetmaterjalid",” 2021.
- [17] K. Janson ja A. Kallaste, „Elektrimasinate alused,” TTÜ Kirjastus, 2017.
- [18] Chetvorno, „Wikimedia Commons,” 3 veebruar 2016. [Võrgumaterjal]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laminated_core_eddy_currents_2.svg. [Kasutatud 11 mai 2022].
- [19] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, „EVS-EN IEC 60404-6:2018,” 1 august 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iec-60404-6-2018>. [Kasutatud 19 aprill 2022].
- [20] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, „EVS-EN 60404-4:2002,” 1 jaanuar 2003. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-60404-4-2002>. [Kasutatud 19 aprill 2022].
- [21] M. Kolk, „Kvdratuurvalemite meetod Fredholmi integraalvõrrandi jaoks,” 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <https://kodu.ut.ee/~mkolk243/2011/DifInt/loeng11/DIVNL-11.pdf>. [Kasutatud 13 mai 2022].
- [22] M. Garibaldi, „Laser additive manufacturing of soft magnetic cores for rotating electrical machinery: materials development and part design,” ResearchGate, 2018.
- [23] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, „<https://www.evs.ee/et/evs-en-10106-2015>,” 3 detsember 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-10106-2015>. [Kasutatud 7 mai 2022].