

**Kestomagneettitahtikoneen magneettien käsittely ja
magnetointi**

**Magnets of permanent magnet synchronous motor,
handling and magnetizing**

Topias Hyttinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Topias Hyttinen

Kestomagneetti- ja tahtikoneen magneettien käsittely ja magnetointi

2021

Kandidaatintyö.

26 s.

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Paula Immonen

asia-/hakusanat: Kestomagneetti, PMSM, magnetointi

Tässä kandidaatintyössä tehdään kirjallisuuskatsaus kestopagnetoitujen sähkökoneiden toimintaperiaatteeseen, niiden kestopagneeteilta vaadittaviin ominaisuuksiin sekä magneettien magnetointiin sähkövirralla tuotetulla magneettikentällä. Työssä eritellään magneettien käsittelyssä huomioitavia seikkoja logistiikan, tuotannon sekä suunnittelun kannalta keskeisellä tavalla. Työn tavoitteena on suunnitella ja valmistaa tehdastyöskentelyyn soveltuva, turvallinen magnetointipukki. Tutkielma on tehty yhteistyössä The Switch Drive Systems Oy / Yaskawa Environmental Energy Division:n kanssa.

Generaattorikäytössä kestopagnetoitu tahtikone mahdollistaa hyvän hyötysuhteen jo nimellisyörimisnopeutta pienemmällä kierrosnopeudella. Kestomagnetoitu tahtikone voi olla magneettiselta luonteeltaan avo- tai umpinapainen sen roottorille asennettujen magneettien asennustavan mukaan.

Magneettien asennustapa sähkökoneen roottoriin voi suosia joko magneettien hankkimista magnetoituna tai magnetoimattomana. Yksittäin asennettavat magneetit voivat olla perusteltua hankkia magnetoituna, mutta alikokonpanoa ennen magnetointia vaativiin kokonaisuuksiin magneettiaihiot täytyy hankkia magnetoimattomana. Kestomagneettien kuljettaminen on usein kalliimpaa ja hankalampaa ei-magneettisiin pakkauksiin verrattuna.

Kestomagneettimateriaalista valmistettu kappale voidaan magnetoida viemällä se ulkoiseen magneettikenttään. Magneettikenttä synnytetään yleensä sähkövirralla, siihen tarkoitettua laitteistoa käyttäen. Suuren koersitiivivoiman NdFeB-materiaaleilla magnetoituminen vaatii voimakkaan, jopa yli 1 MA/m vahvuisen, ulkoisen magneettikentän.

Magneettien käsittelyssä tehdasolosuhteissa on ensiarvoisen tärkeää huolehtia työturvallisuudesta ehkäisemällä toisiaan magneettisesti puoleensa vetävien kappaleiden tahatonta kontaktia. Työkalujen ja laitteiston suunnittelussa tämä tarkoittaa, että ferromagneettisten materiaalien käyttö rakenteissa on mahdollista vain poikkeustilanteissa. Nämä seikat huomioiden tämän tutkielman yhteydessä osittain suunniteltu magnetointilaitteisto on ennen tutkielman julkaisua todettu käyttökelpoiseksi ja tuotantoon sopivaksi. Lisäksi sen kehityskohteita ja niiden tarpeellisuutta on arvioitu, eikä tämänhetkiseen laitteistoon ole nähty tarpeelliseksi tehdä muutoksia.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT
School of Energy Systems
Electrical Engineering

Topias Hyttinen

Magnets of permanent magnet synchronous motor, handling and magnetizing

2021

Bachelor's Thesis.

26 p.

Examiner: Associate professor Paula Immonen

This bachelor's thesis includes literary review about fundamentals of permanent magnet synchronous motors, required characteristics of permanent magnets in PMSM's and magnetizing permanent magnets with external magnetic field produced with electrical current. Thesis also includes analyzing of required actions when working with permanent magnets in logistics, production and while designing tools. Object of this thesis is to design and assemble functional and safe magnetizing bench. This thesis has been done together with The Switch Drive Systems Oy / Yaskawa Environmental Energy Division.

PMSM, when used as a generator, can produce electricity with great efficiency before nominal rotational speed is achieved. PMSM's can be divided into two groups: salient pole and non-salient pole machines based on how their magnets are assembled into rotor.

Based on how rotor assembly is done, magnet blanks can be purchased magnetized or unmagnetized. If magnets are assembled one by one, blanks can be purchased magnetized. However, if sub-assembling is required, magnet blanks are purchased unmagnetized and magnetize them after sub-assembling. Transportation expenses of permanent magnets are often higher than transportation expenses of non-magnetic parcels.

Part made from permanent magnet material can be magnetized with external magnetic field. Common way for generating magnetic field is utilizing coil and electrical current. Magnetizing of high-coercivity NdFeB-materials requires strong external magnetic field, often exceeding 1 MA/m.

Handling of magnets in factory circumstances requires extreme caution to avoid unintentional contact between magnetically attracted parts. Therefore, using ferromagnetic structural parts in magnetizing equipment can be done only in exceptional situations. These factors taken into consideration, as a practical partition of this thesis re-designed magnetizing bench has been proved suitable for magnetizing permanent magnets for electrical machines. Future development of magnetizing equipment has been considered, but for the present developing has not been seen necessary.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	6
2.	Kestomagneetin merkitys sähkökoneessa	7
2.1	Kestomagnetoidun tahtikoneen rakenne.....	7
2.2	Sähkömagneettiset ilmiöt sähkökoneen toiminnassa	9
2.3	Sähkökoneessa käytettävien magneettien hankkiminen.....	10
2.3.1	Magneetit logistiikassa	10
2.3.2	Magneettinen vetovoima ja työturvallisuus.....	11
3.	Sähkömagneettiset ilmiöt kappaleen magnetoinnissa	12
3.1	Magneetikentän luominen sähkövirralla	12
3.2	Materiaalin magnetoituminen.....	14
4.	Kestomagneetin magnetointi	16
4.1	Magnetointilaitteiston sähköiset komponentit.....	16
4.1.1	Magnetointikelan magneetikentän voimakkuuden approksimointi	18
4.2	Magnetointipukki	18
4.2.1	Magnetointipukin pneumatiikkainstrumentit	19
4.2.2	Magnetointipukissa käytettävien materiaalien magneettiset ominaisuudet.....	21
4.3	Magnetointitapahtuma	21
4.3.1	Helmholtz-mittaus	22
4.4	Magnetointilaitteiston nykytila ja jatkokehitys	23
5.	Yhteenveto.....	24
	Lähteet	25

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

TS	The Switch Drive Systems Oy / Yaskawa Environmental Energy Division
PMSM	Permanent magnet synchronous machine, kestopagneettitahtikone
NdFeB	Neodyymi-rauta-boori
PA	Polyamidi
POM	Polyoksimetyyli, polyasetaali
α	kulma
μ	permeabiliteetti
φ	magneettivuo
Ψ	käämivuo
ψ	sähkövuo
A	pinta-ala
B	magneettivuon tiheys, remanenssi
D	paksuus
E	jännite (indusoituva)
F	voima
H	magneettikentän voimakkuus, koersitiivoima
I	virta
J	virrantiheys
l	etäisyys
N	lukumäärä
P	teho
r	säde, etäisyys
t	aika

1. JOHDANTO

Sähkökone on yhteinen nimitys sekä sähkömoottoreille että generaattoreille. Lähes poikkeuksetta sähkökoneen toiminta perustuu sähkömagnetismin ilmiöihin, esimerkiksi virrallisen johtimen sekä magneettikentän väliseen vuorovaikutukseen. Usein sama sähkökone voi toimia sekä moottorina että generaattorina. (Korpinen 1998a s. 1.)

Kestomagnetoitu tahtikone (Permanent magnet synchronous machine, PMSM) on sähkökone tyyppi, jonka roottorissa on kestopagneetteja. Tahtikone tarkoittaa, että koneen roottori ja staattorin magneettikenttä pyörivät tismalleen samalla nopeudella. PMSM:n etuja ovat muun muassa korkea, jopa yli 97 %, hyötysuhde (The Switch 2021) sekä induktiomootoriin verrattuna matalampi kierrosnopeus saman tehon saavuttamiseksi (Heikkilä 2002 s. 8). Lisäksi kestopagnetoidun tahtikoneen etu verrattuna roottorivirralla magnetoituun tahtikoneeseen on roottorin magnetointiin käytettävän liukurenkaan puuttuminen. Mekaanisen kontaktin puuttuessa kulumisesta johtuva huollontarve vähenee (Pyrhönen 2006 s. 46). Haittapuolena muihin konetyyppeihin verrattuna on nykyisin yleisesti sähkökoneissa käytettävien NdFeB (Neodyymi-Rauta-Boori) kestopagneettimateriaalien korkea hinta (Heikkilä 2002 s. 13).

The Switch Drive Systems Oy / Yaskawa Environmental Energy Division (myöh. TS) on uusiutuvaan energiaan investoiva sähkökäyttöjä valmistava kansainvälinen yritys. Suomessa TS toimii kolmella paikkakunnalla, Helsingissä, Vaasassa ja Lappeenrannassa. Lappeenrannan tehtaalla tuotetaan muun muassa kestopagnetoituja tahtikoneita, joiden magnetointiin käytettävän laitteiston osittainen kehitystarve toimi tämän kandidaatintyön motivaationa.

Tässä työssä tutustutaan sähkömagneettisiin ilmiöihin sähkökoneen toiminnassa, magneettikentän luomisessa sähkövirralla sekä eritellään kestopagneetilta vaadittavia ominaisuuksia sähkökonekäytössä. Havaitut ilmiöt yhdistetään käytäntöön, eritellään kuinka kestopagneettien ominaisuudet vaikuttavat niiden soveltuvuuteen sähkökoneeseen ja kuinka ne voidaan saavuttaa. Lisäksi vertaillaan tilanteita, joissa magneettiaihiot hankitaan magnetoituina tai magnetoimattomina ja selvitetään, koska magnetointi on perusteltua tehdä itse.

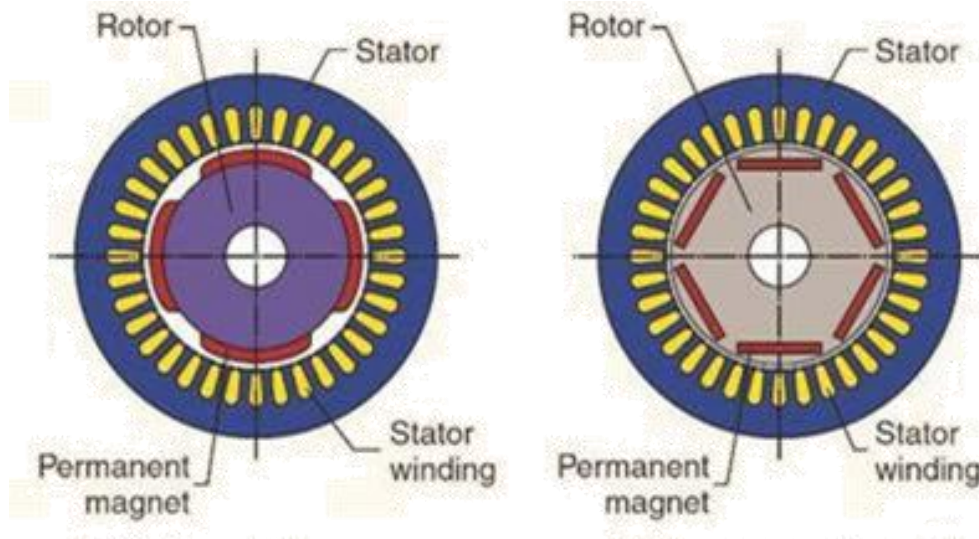
Työn tavoitteena on selvittää, kuinka komponenttien magneettinen luonne vaikuttaa tuotannon toimintatapoihin ja suunnittelun vaatimuksiin sekä lopulta suunnitella magnetointilaitteiston osa, magnetointipukki, vastaamaan tuotannon nykyistä tarvetta. Suunniteltu magnetointipukki kokoonpannaan ja testataan siten että se voidaan luovuttaa tuotannon käyttöön.

2. KESTOMAGNEETIN MERKITYS SÄHKÖKONEESSA

Tässä luvussa tehdään kirjallisuuskatsaus kestopagnetoidun tahtikoneen toimintaperiaatteen ja esitellään eräs menetelmä kestopagneettien asentamiseen roottorin teräslieriön pinnalle. Tutkielmassa viitataan tätä työtä motivoineeseen, TS:n valmistamaan, PMSM:n, jonka mallinimeä tai teknisiä tietoja ei yrityssalaisuuksien varjelemiseksi paljasteta. On olennaista myös huomata, että TS valmistaa runsaasti erilaisia sähkökoneita eivätkä tässä tutkielmassa esitetyt menetelmät ja tekniset tiedot koske kaikkia TS:n konemalleja.

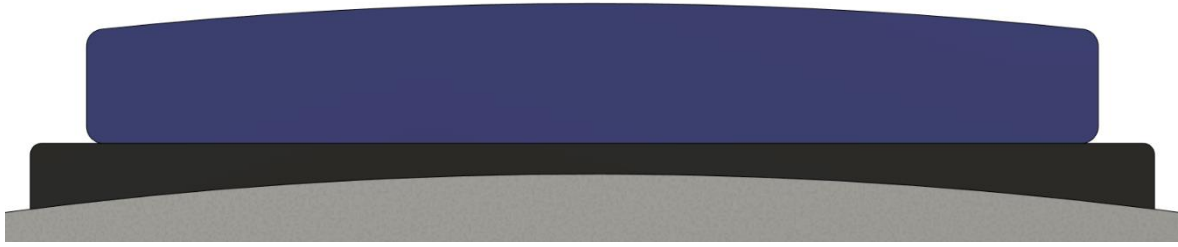
2.1 Kestomagnetoidun tahtikoneen rakenne

Kestomagnetoitu tahtikone voi olla avo- tai umpinapainen sen roottorille asennettujen magneettien asennustavan mukaan. Avonapaisessa koneessa magneetit on asennettu roottorin sisään tai sen pinnalle varustettuna napakengillä. Umpinapaisessa koneessa roottorilla on ainoastaan kestopagneettimateriaalia tai sen roottori on teräslieriö, jonka pinnalle magneetit on asennettu. (Pyrhönen 2006 s. 46). Kuvassa 2.1 on esitetty umpi- ja avonapaisen kestopagneettitahtikoneen roottorin ja staattorin rakenne.



Kuva 2.1. Havainnekuva umpinapaisesta (vasemmalla) ja avonapaisesta PMSM:n roottorista sekä staattorista. Umpinapaisessa kestopagneetit ovat asennettu roottorin pinnalle, kun taas avonapaisessa ne ovat roottorin sisällä. (Control engineering 2021, kuvaa muokattu) TS:n valmistamassa kestopagnetoidussa sähkökoneessa magneetit ovat asennettu teräslieriön pinnalle, jolloin generaattori on magneettisesti umpinapainen.

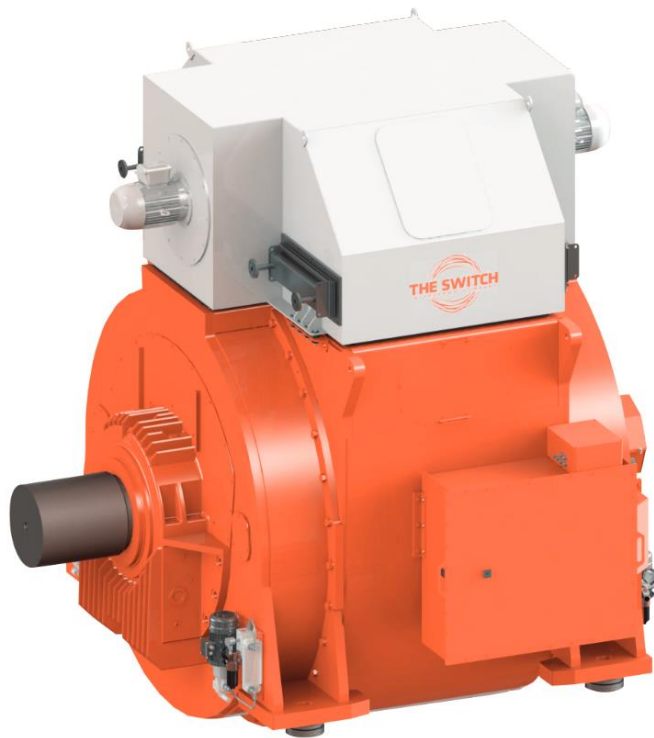
TS:n valmistama PMSM on magneettiselta luonteeltaan umpinapainen. Kokoonpannessa magnetoidut kestopagneetit asennetaan roottorin ulkopintaan niin kutsutuissa magneettimoduuleissa, joiden pinnalle tulee lopuksi suojaava, paramagneettinen suojapelti. Kuvassa 2.2 on havainnollistettu magneettimoduulin rakenne.



Kuva 2.2. Läpileikkaus erään TS:n valmistaman kestopagneettitahtikoneen magneettimoduulia havainnollistavasta mallista. Kuvassa musta vastaa ferromagneettista pohjalevyä, sininen kestopagneettimateriaalia ja harmaa roottorin teräslieriötä. Lisäksi magneettien päälle asennetaan paramagneettinen suojapelti. Magneettimoduuli sisältää pohjalevyn sekä kestopagneettimateriaalin ja se kokoonpannaan ennen asennusta roottoriin.

TS:n valmistamissa kestopagneettigeneraattoreissa on mallin mukaan 4–48 napaparia (Härkänen 2021). Magneettimoduulit asennetaan roottorin pinnalle siten, että niiden magneettinen N-kohtio on vuorotellen poispäin roottorin akselista ja kohti roottorin akselia, jolloin kaksi magneettimoduulia muodostaa yhden napaparin. Magneettimoduulit voivat sisältää yhden tai useamman kestopagneetin koneen osapakkojen lukumäärän mukaan.

Kuva 2.3 on havainnekuva TS:n valmistamasta PMM 1500 kestopagneettigeneraattorista. PMSM, johon tässä tutkielmassa viitataan, on vastaavan kokoluokan kestopagneettigeneraattori kuin PMM 1500.



Kuva 2.3. Havainnekuva PMM 1500 kestopagneettigeneraattorista. Generaattorin teho vaihtelee mallin mukaan välillä 2600–6300 kW 100 rpm kierrosnopeudella (The Switch 2021, kuvaa muokattu).

2.2 Sähkömagneettiset ilmiöt sähkökoneen toiminnassa

Kun roottoria pyöritetään, roottorin pinnalla olevat magneetit liikkuvat staattorin käämitykseen nähden, jolloin staattorin vaiheet kokevat muuttuvan magneettikentän. Muuttuva magneettikenttä, tarkemmin magneettivuon, indusoi johtimeen jännitteen Faradayn induktiolain mukaan. Faradayn induktiolaki voidaan esittää muodossa

$$E = -\frac{d\phi}{dt}, \quad (2.1)$$

jossa E on virtasilmukkaan indusoitunut jännite ja $-d\phi/dt$ on magneettivuon muutos ajan suhteen. Faradayn induktiolaki käsittelee tilannetta, jossa johdin kiertää muuttuvaa magneettikenttää. Lenzin lain mukaan, mikäli jännite indusoituu suljettuun virtapiiriin, on siitä syntyvän virran suunta siten että virrasta syntyvä magneettivuon on ulkoiseen magneettivuohon nähden vastakkaisuntainen. Jos magneettivuota kiertävää johdinta on kierretty useita kierroksia, se muodostaa käämin. Tällöin voidaan Faradayn induktiolaki esittää käämivuon Ψ avulla muodossa

$$E = -N \frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt}, \quad (2.2)$$

jossa N on johdinkierrosten lukumäärä. Sähkökoneen staattorikäämitys koostuu yleensä useasta johdinkierroksesta, jolloin indusoituva jännite on verrannollinen myös kierrosten lukumäärään.

Magneettivuon tietyn pinta-alan läpi voidaan esittää muodossa

$$\phi = BA, \quad (2.3)$$

jossa B on magneettivuon tiheys ja A on virtasilmukan tai käämin pinta-ala. Yhtälössä 2.3 oletetaan vuontiheyden olevan vakio koko pinta-alalla. Yhtälö 2.2 voidaan siten esittää muodossa

$$E = -NA \frac{dB}{dt}, \quad (2.4)$$

Yhtälöstä 2.4 havaitaan indusoituneen jännitteen suuruuden riippuvan magneettivuon tiheyden muutosnopeudesta johdinsilmukan tai käämin pinta-alan ja johdinkierrosten lukumäärän pysyessä vakiona. Sähkökonetta tarkastellessa vuon muutosnopeuteen vaikuttaa roottorin pyörimisnopeus, staattorin käämityksen rakenne sekä kestmagneettien synnyttämän magneettivuon tiheys.

Generaattorikäytössä kestmagneettitahtikoneen roottoria pyöritetään ulkoisella voimakoneella, esimerkiksi laivan moottorilla. Staattoriin indusoituvaa jännitettä ja siten generaattorin tehoa voidaan kasvattaa käytön aikana nostamalla roottorin pyörimisnopeutta tai kokoonpanovaiheessa asentamalla roottoriin magneetteja, joiden remanenssi B_r on suurempi.

2.3 Sähkökoneessa käytettävien magneettien hankkiminen

NdFeB-kestomagneettimateriaalissa käytettävä neodyymi on harvinainen maametalli. Vuonna 2013 Kiina vastasi maametallien globaalista tuotannosta 90 % ja samaan aikaan arvioitiin Kiinassa olevan noin 50 % maailman maametallivaroista (Lucas 2015 s. 27). Vuonna 2016 maametalleja tuotettiin globaalisti 126 000 tonnia, joista Kiinan osuus oli 105 000 tonnia (Marx ym. 2018 s. 1). Johtuen Kiinan vahvasta asemasta niin kestomagneeteissa käytettävien materiaalien kuin valmiiden kestomagneettienkin tuotannossa, myös TS hankkii suurimman osan käytettävistä magneeteista Kiinasta.

Eräissä TS:n kestomagnetoiduissa generaattoreissa magneetit asennetaan kuvan 2.2 kaltaisen magneettimoduulin sisällä, jolloin magneettimoduulit täytyy kokoonpanna ennen magnetointia ja asennusta. Jotta laaduntarkkailu tuotannon kaikissa vaiheissa on mahdollista, on tarkoituksenmukaista hankkia magneettiaihiot sekä moduulin muut osat erikseen, ja kokoonpanna moduulit yhtenä tuotannon vaiheista valmiiden moduulien alihankkimisen sijaan. Varkoitunut työvaihe on kustannustehokas, jolloin magnetointilaitteiston hankintakustannukset saadaan kompensoitua. Edellä mainitut seikat huomioiden TS on päätenyt ratkaisuun, jossa tämän tyyppinen asennusratkaisu kokoonpannaan ja magnetoidaan kokonaisuudessaan omana tuotantona. (Härkänen 2021.)

Joissain tilanteessa on perusteltua hankkia magneetit myös valmiiksi magnetoituina. Eräissä TS:n valmistamassa kestomagneettigeneraattorissa magneetit asennetaan suoraan roottorin ulkopinnalle, eikä niitä tarvitse merkittävästi käsitellä ennen asennusta. Yksittäisiä magneetteja asennettaessa magnetointi ja magneettisuuden mittaus lisäävät yksittäisen koneen kausaika, jolloin suurina määrinä hankittuna magnetoidut kestomagneetit ovat perusteltu ratkaisu.

2.3.1 Magneetit logistiikassa

Mikäli magneettiaihiot hankitaan valmiiksi magnetoituina, logistiikasta aiheutuvat kustannukset kasvavat muun muassa suuremmasta pakkauskoosta, pakkausmateriaaleista sekä magneettisesta luonteesta johtuen. Magneettien kuljettamiseen lentoteitse sovelletaan Kansainvälisen ilmakuljetusliiton (IATA, International Air Transport Association) vaarallisten aineiden määräyksiä. Edellä mainittujen määräysten mukaan magneettiseksi luokiteltavat kuljetusyksiköt tulee merkitä erikseen ja niitä käsitellään vaarallisina aineina, jolloin niiden kuljetuskustannukset ovat suuremmat. Kuljetusyksikkö luokitellaan magneettiseksi, mikäli siitä aiheutuvan magneettivuon tiheys ylittää 0.002 gaussia (20 μT) 7 jalan (noin 2,13 m) etäisyydellä yksiköstä. Mikäli edellä mainittu magneettivuon tiheys ylittää 0.00525 gaussia (52,5 μT) 15 jalan (noin 4,57 m) etäisyydellä, ei kuljetusyksikköä saa kuljettaa ilmateitse. (Intermag 2021.)

Teollisuuden tarpeisiin tyypillisemmälle meriteitse tapahtuvalle kuljetukselle ei ole asetettu kansainvälisiä määräyksiä magneettisten materiaalien osalta. Magneettisia kappaleita kuljettaessa on ne kuitenkin pakattava niin kauas toisistaan, että niiden käsittely turvallisesti, tavanomaisia menetelmiä käyttäen on mahdollista. Tällöin pakkauskoosta kasvaa verrattuna tilanteeseen, jossa magneettiaihioiden pakkaus suojaa niitä ainoastaan korroosiolta ja iskuilta.

Magneettien maateitse kuljettamisessa Suomessa noudatetaan kuljetusyhtiöiden ohjeistuksia. Suomessa toimivista kuriiripalveluista ainakin Posti sekä DB Schenker veloittavat vaarallisten aineiden kuljetuksesta lisämaksua sekä ylimääräisiä merkintöjä pakkauksessa. Postin ohjeistuksen mukaan voimakkaat magneetit luokitellaan vaaralliseksi aineeksi. (Posti 2021) (DB Schenker 2021.)

2.3.2 Magneettinen vetovoima ja työturvallisuus

Magneetti vetää puoleensa ferromagneettista materiaalia tai toisen magneetin erimerkkistä kohtiota. Näiden kappaleen välistä vetovoimaa F voidaan approksimoida yhtälöllä

$$F = \frac{B^2 A}{\mu_0 \mu_r}, \quad (2.5)$$

jossa B on magneettivuon tiheys kontaktipinnalla, A kontaktipinta-ala, μ_0 tyhjiön permeabiliteetti ($4\pi \cdot 10e-7$ H/m) ja μ_r väliaineen suhteellinen permeabiliteetti (Puranen 2021). Yhtälössä 2.5 oletetaan magneettivuon tiheyden olevan homogeeninen koko kontaktipinta-alalla.

Välittömässä kontaktissa vuontiheyden voidaan olettaa olevan kontaktipinnalla magneetin remanenssin suuruinen. Mikäli magneetin ja sen puoleensa vetämä ei-kestomagneettinen kappale eivät kosketa toisiaan, vaan kappaleiden välissä on väliainetta, voidaan vuontiheys B kohdekappaleen pinnalla approksimoida yhtälöllä

$$B = B_r \frac{D}{D + l}, \quad (2.6)$$

jossa B_r on magneetin remanenssi, D magneetin paksuus ja l kappaleiden välinen etäisyys (Puranen 2021). Yhtälössä 2.6 väliaine oletetaan tyhjiöksi ($\mu_r = 1$).

Taulukossa 2.1 on listattu eri kokoisten, homogeenisten, suorakulmaisten magneettien ($B_r = 1,25$ T) ja ferromagneettisen, magneettisesti kyllästämättömän materiaalin välisiä, yhtälön 2.5 mukaan laskettuja vetovoimia tilanteessa, jossa väliaine oletetaan tyhjiöksi ($\mu_r = 1$). On olennaista huomata, että taulukossa 2.1 lasketut voimat ovat approksimoitteja, eivätkä yleensä vastaa todellisuutta magneetin geometrian ja siten kontaktipinta-alan tai väliaineen osalta.

Taulukko 2.1. Kestomagneetin ja sen magneettisesti puoleensa vetämän kappaleen välinen vetovoima erikoisilla magneeteilla sekä välittömässä kontaktissa että ilmaraolla.

Magneetin mitat [mm]	Magneetin pinta-ala [mm ²]	Ilmaraon pituus [mm]	Magneettivuon tiheys kontaktipinnalla [T]	Voima [kN]
100x200x20	20000	0	1,25	24,9
100x200x20	20000	15	0,71	8,12
200x200x20	40000	0	1,25	49,7
200x200x20	40000	15	0,71	16,2

Magneetin tarttuessa toiseen magneettiin tai esimerkiksi paksuun teräslevyyn, voi kappaleiden erottaminen toisistaan edellyttää merkittävää voimaa. Käden tai muun ruumiinosan puristuminen näiden kahden kappaleen väliin on myös merkittävä työturvallisuusriski, joka tulee ottaa huomioon magneettien turvallisessa käsittelyssä ja laitteiston materiaalivalinnoissa suunnittelun aikana.

3. SÄHKÖMAGNEETTISET ILMIÖT KAPPALEEN MAGNETOINNISSA

Tässä luvussa esitellään kestopagneetin magnetoituminen tilanteessa, jossa magneettisesta materiaalista valmistettu kappale magnetoidaan viemällä se ulkoiseen, sähkövirralla synnytettyyn magneettikenttään.

3.1 Magneettikentän luominen sähkövirralla

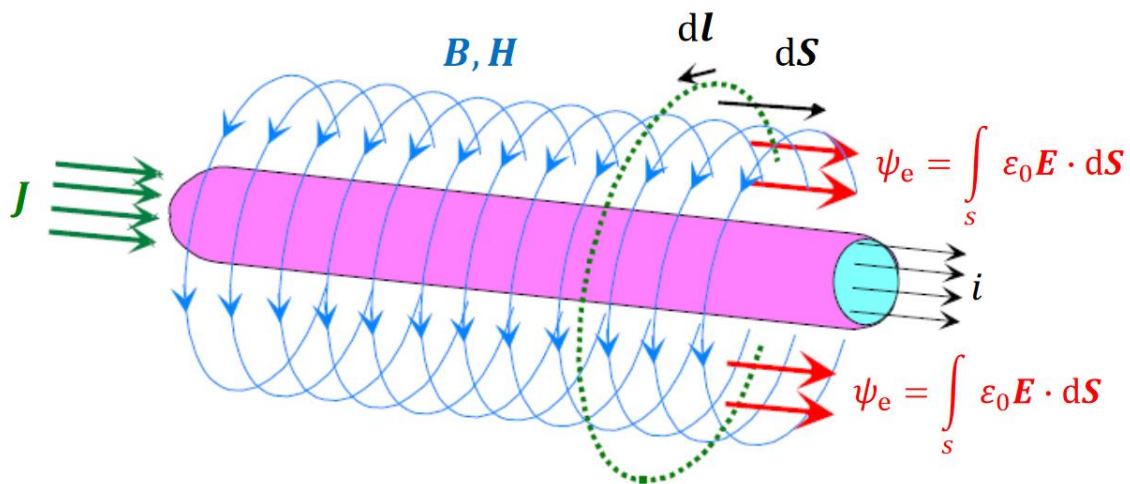
Ampèren lain mukaan virrallinen johdin aiheuttaa ympärilleen magneettikentän. Ampèren laki voidaan esittää integraalimuodossa yhtälön 3.1 mukaan

$$\oint_l H dl = \int_A J dS + \frac{d}{dt} \int_A D dS = i(t) + \frac{d\psi_e}{dt} \quad (3.1)$$

jossa l on magneettikentän rajaavan käyrän pituus, H magneettikentän voimakkuus, J virrantiheys, A virrantiheyden läpäisemä johtimen poikkipinta-ala, $i(t)$ virta ajan funktiona sekä ψ_e sähkövuo (Pyrhönen ym. 2004 s. 202). Integraalimuotoinen Ampèren laki voidaan myös yksinkertaistaa muotoon

$$\oint_l H dl = \int_A J dS = \sum i. \quad (3.2)$$

Yhtälön mukaan johdinta kiertävän magneettikentän käyräintegraali on johtimessa kulkevien virtojen summa. Kuvassa 3.1 on esitetty Ampèren laki havainnekuvan avulla.



Kuva 3.1. Virrallisen johtimen ympärille Ampèren lain mukaan muodostuva magneettikenttä (Pyrhönen ym. 2004 s. 203).

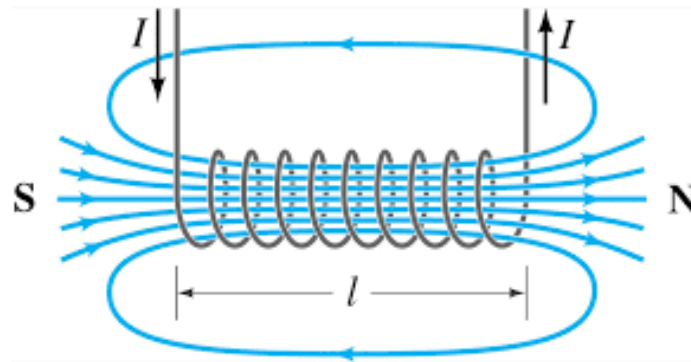
Johtimessa kulkevan sähkövirran ja magneettikentän voimakkuuden välistä yhteyttä mieltä valtaisessa pisteessä kuvaa Biot'n ja Savartin laki yhtälön

$$dH = \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{dl \cdot \sin\alpha}{r^2} \quad (3.3)$$

mukaan, jossa H on magneettikentän voimakkuus, I virta, r etäisyys tarkasteltavaan pisteeseen ja α johtimen ja pisteeseen piirretyn janan välinen kulma (Mäkelä ym. 2019 s. 122). Pitkän johtimen tapauksessa magneettikentän voimakkuus voidaan esittää muodossa

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (3.4)$$

(Mäkelä ym. 2019 s. 122). Magneettikentän voimakkuus on tällöin suoraan verrannollinen johtimessa kulkevan virran suuruuteen. Magneettikentän voimakkuutta voidaan myös kasvattaa kiertämällä johdin kelaksi, tarkemmin solenoidiksi. Kuvassa 4.2 havainnollistetaan solenoidissa kulkevan virran ja siitä aiheutuvan magneettikentän yhteys.



Kuva 3.2. Havainnekuva solenoidista. Kuvassa merkinnät N ja S merkkavat syntyvän magneettikentän pohjois- ja eteläkohtioita. (JustScience 2021.)

Pitkän solenoidin sisällä magneettikentän voidaan olettaa olevan lähes vakio (Hyperphysics 2021a). Magneettikentän voimakkuus H solenoidin keskellä voidaan ratkaista yhtälöstä

$$H = \frac{NI}{l}, \quad (3.5)$$

jossa N on solenoidin johdinkierrosten lukumäärä. (Mäkelä ym. 2009 s. 122.)

Käytännön sovelluksissa, tässä tutkielmassa magnetointilaitteistossa, on olennaista huomata, että johdinkierrosten lukumäärän N nostaminen kasvattaa magneettikentän voimakkuutta H virran I pysyessä vakiona. Vastaavasti solenoidin pituuden kasvattaminen laskee magneettikentän voimakkuutta. Myöhemmin tässä tutkielmassa esiteltävä magnetointilaitteisto hyödyntää sähkömagneettiselta rakenteeltaan solenoidia muistuttavaa ratkaisua magneettikentän luomiseen.

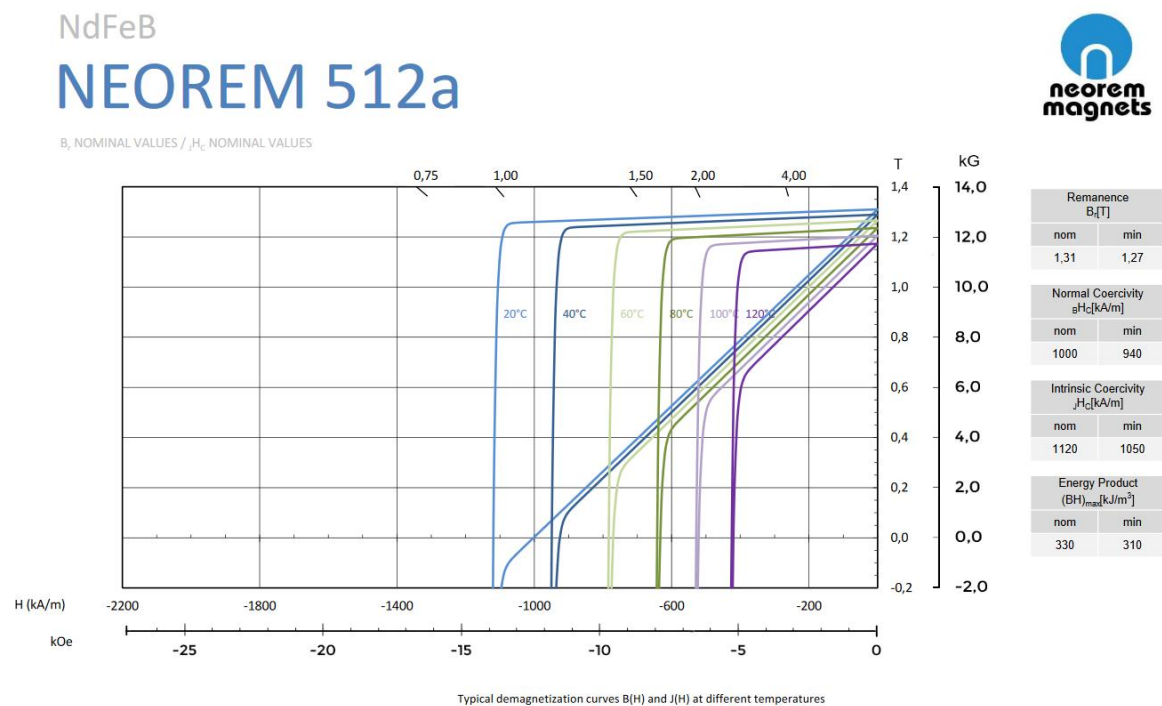
3.2 Materiaalin magneitoituminen

Materiaalit voidaan jakaa kolmeen luokkaan, dia-, para- ja ferromagneettisiin aineisiin sen perusteella, kuinka ne käyttäytyvät ulkoisessa magneettikentässä. Diamagneettiset aineet heikentävät ulkoista magneettikenttää. Paramagneettiset aineet taas vahvistavat ulkoista magneettikenttää vain hieman, mutta ne eivät jää pysyvästi magneettisiksi ulkoisen magneettikentän poistuttua. Ferromagneettiset aineet vahvistavat ulkoista magneettikenttää, ja voivat jäädä pysyvästi magneettisiksi ulkoisen kentän poistuttua.

Kestomagneetille tyypillisiä tunnuslukuja ovat koersitiivivoima H_c sekä remanenssi B_r . Remanenssi kuvaa kappaleeseen jäämää magneitoitumaa, toisin sanoen magneetin voimakkuutta, kun se poistetaan ulkoisesta magneettikentästä. Koersitiivivoima kuvaa magneetin kykyä ylläpitää magneettikenttäänsä, kun se viedään ulkoiseen vastakkaissuuntaiseen magneettikenttään. Materiaalia, jonka koersitiivivoima on suuri ($H_c > 1$ kA/m), sanotaan magneettisesti kovaksi (Immonen 2019). (Hyperphysics 2020b.)

Lisäksi eräs magneettimateriaalin tunnusluku on sisäinen koersitiivivoima H_{Ci} [A/m] joka kertoo sen kestomagneetin magneettikenttää vastakkaissuuntaisen magneettikentän voimakkuuden, joka demagnetoi alkuperäisen kappaleen (MCE 2020).

Magneettimateriaalin käyttäytymistä ulkoisessa magneettikentässä voidaan lukea sitä vastaavalta demagnetoitumiskäyrältä. Kuvassa 3.3 on esitetty Neorem 512a kestomagneettimateriaalin tyypilliset demagnetoitumiskäyrät eri lämpötiloissa.



Kuva 3.3. Neorem 512a kestomagneettimateriaalin valmistajan ilmoittama demagnetoitumiskäyrä (Neorem Magnets 2021a).

Valmistajan kuvassa käyttämät merkinnät: koersitiivivoima BH_c , sisäinen koersitiivivoima $j_c H_c$ sekä remanenssi B_r . Kuvaajaa tulkittaessa materiaalin remanenssin arvo luetaan käyrän ja pysty akselin leikkauskohdasta. Koersitiivivoima sekä sisäinen koersitiivivoima luetaan vaakaa-akselin leikkauskohdasta siten, että sisäinen koersitiivivoima on kauempana origosta.

Kappaleen magneettisuus voidaan poistaa lämmittämällä kappale yli sen materiaalikohtaisen Curie-pisteen, joka on NdFeB-magneettimateriaalilla noin 310 celsiusastetta (Neorem Magnets 2021b). Myös aiemmin mainittu sisäisen koersitiivivoiman suuruinen vastakkaissuuntainen magneettikenttä demagnetoi magneetin.

Sähkökoneissa voi esiintyä komponenttien lämpiämistä, joten koneeseen asennettavat magneetit tulee valita siten, ettei niiden magneettiset ominaisuudet merkittävästi heikkene koneen roottorissa esiintyvien käytönaikaisten lämpötilojen seurauksena. Lisäksi magneettimateriaali tulee valita siten, että sen sisäinen koersitiivivoima on suurempi kuin koneen käytönaikaisten vastakkaissuuntaisten magneettikenttien voimakkuus. Tällöin kestopagneetit säilyttävät alkuperäisen remanenssinsa, eivätkä ne käytön aikana demagnetoidu edes osittain. (Härkänen 2020.)

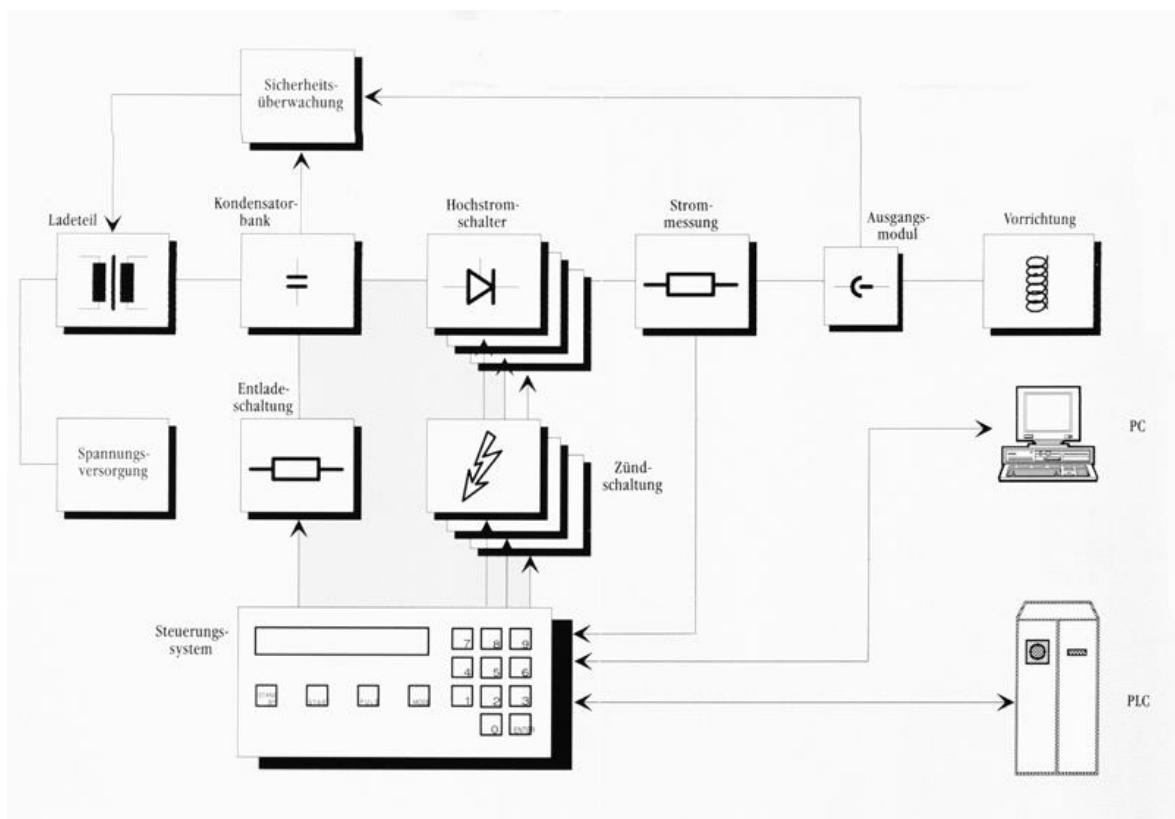
4. KESTOMAGNEETIN MAGNETOINTI

Tässä luvussa esitellään TS:n käyttämä magnetointilaitteisto pääpiireittään. Lisäksi kuvataan käytönaikainen tilanne ja arvioidaan, vastaako tämän tutkielman käytännön osuutena suunniteltu magnetointipukki alkuperäistä tarvetta.

Esiteltävää magnetointilaitteistoa on käytetty TS:llä jo ennen tämän kandidaatintyön aloittamista. Tämän työn motivaationa toimi tuotantoon otettu uusi konemalli, jonka magneetti-moduulien magnetointi ei onnistunut muokkaamalla vanhaa laitteistoa. Tätä tutkielmaa varten osa laitteistoa suunniteltiin uusiksi soveltumaan nykyiseen tarpeeseen. Suunnittelussa otettiin huomioon työskentelymukavuuden parantaminen, edellistä versiota kestävämpi rakenne sekä muokattavuus muiden konemallien tuotantoon.

4.1 Magnetointilaitteiston sähköiset komponentit

TS käyttää saksalaisen Sinus Magnettechnik GmbH:n valmistamaa magnetointilaitteistoa. Valmistajan verkkosivulta saatavilla oleva lohkokaavio on esitelty kuvassa 4.1.



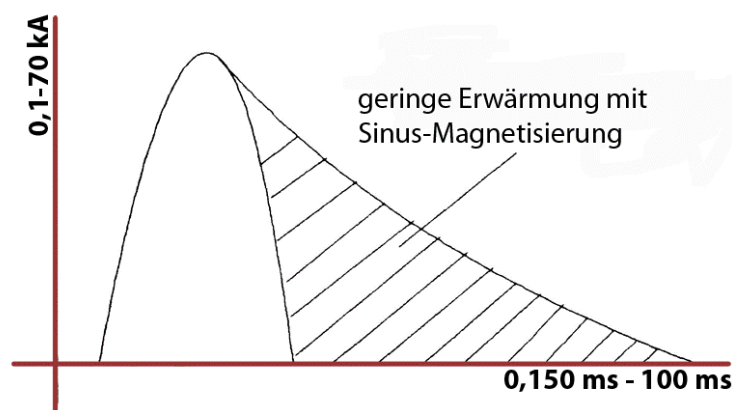
Kuva 4.1 Modulaarisen magnetointilaitteiston lohkokaavio (Sinus Magnettechnik 2021). TS:n laitteisto ei sisällä kaikkia kuvassa esitettyjä komponentteja.

Magnetointilaitteiston tehonsyöttö on toteutettu sähköverkon 3-vaiheisella 400 voltin liitännällä. Ohjauspaneelista (kuvassa 4.1 ”Steuerungssystem”) valitaan magnetointiin käytettävät asetukset, muun muassa jännite, johon kondensaattorit varataan. Kondensaattoreiden jännite voi olla jopa 4 kV. Käytettävien komponenttien pysyessä samoina kondensaattoreiden jännite alussa vaikuttaa magnetointi-impulssin suurimpaan virtaan, joka voi olla TS:n laitteistolla jopa 10 kA.

Magnetointikela (kuvassa 4.1 ”Vorrichtung”) vastaa sähköiseltä rakenteeltaan solenoidia. Magneettikentän syntyminen virrallisen johtimen ja solenoidin ympärille on esitelty luvussa 3.1. Magnetointitilanteessa laukaisumoduulilla (kuvassa 4.1 ”ausgangsmodul”) annetaan kytkimestä ohjaussignaali järjestelmälle siten että aluksi kondensaattorit varataan haluttuun jännitteeseen. Varaamisen jälkeen toista kytkintä käyttäen kondensaattoreihin varattu energia puretaan magnetointikelaan tyristoreilla (SinusMagnettechnik 2021). Tällöin kelan keskiöön syntyy kelaan nähden aksiaalinen magneettikenttä.

Magnetointivirran kasvattaminen kasvattaa kelaan syntyvän magneettikentän voimakkuutta. Työn jatkuvuuden kannalta magnetointivirta on syytä säätää pienimmilleen siten, että syntyvän magneettikentän voimakkuus on kuitenkin magneettimoduulin magneettimateriaalin koersitiivivoimaa suurempi. Epäideaalisena komponenttina kelassa on resistanssi, jolloin magnetointitilanteessa kelassa tapahtuu resistiivisiä, lämpenemisenä ilmeneviä häviöitä. Kela jäädytetään ilmavirralla käytön aikana, jolloin sen käyttöikä pitenee ja tuotanto voi olla jatkuvaa. (Sinus Magnettechnik 2021.)

NdFeB-magneettimateriaalien korkean koersitiivivoiman takia niiden magnetoituminen vaatii voimakkaan, usein yli 1000 kA/m suuruisen, ulkoisen magneettikentän. Luomalla magneettikenttä nopealla virtaimpulssilla voidaan komponenttien lämpenemistä ehkäistä jatkuvaan virran käyttöön verrattuna. Erään magnetointi-impulssin käyrämuoto on esitetty kuvassa 4.2.



Kuva 4.2. Eräs magnetointi-impulssin käyrämuoto. (Sinus Magnettechnik 2021, kuvaa muokattu.)

Esimerkiksi sinimuotoiseen impulssiin verrattuna kuvassa 4.2 esitetty käyrämuoto soveltuu paremmin metallikuorisien magneettien magnetointiin, sillä kuorissa esiintyvät pyörrevirrat vähenevät. Käyrämuodon haittapuolena on pidempi impulssi, jolloin myös komponentit lämpenevät enemmän. (Sinus Magnettechnik 2021.)

4.1.1 Magnetointikelan magneettikentän voimakkuuden approksimointi

Pitkän solenoidin sisällä olevan magneettikentän voimakkuus voidaan laskea luvussa 3.1 esitetyllä yhtälöllä 3.5.TS:llä käytössä olevan magnetointikelan induktanssi ja resistanssi on ilmoitettu, mutta kelan johdinkierrosten lukumäärää N ei. Myöskään kelan solenoidin pituuteen l verrattavaa mitta ei ole ilmoitettu. Pituuden l voidaan kuitenkin arvioida olevan noin 280 mm magnetointikelan fyysisten mittojen, magneettisen keskikohdan sijainnin ja tehonsyötön johtimien poikkipinta-alan perusteella. Johdinkierrosten lukumääräksi N arvioidaan tässä esimerkissä edellä mainittujen tekijöiden perusteella 30. Kokeellisesti on havaittu, että noin 10 kA virta riittää TS:n laitteistolla magnetoimaan erään tyypillisen sähkökoneissa käytettävän kestopagneettimateriaalin.

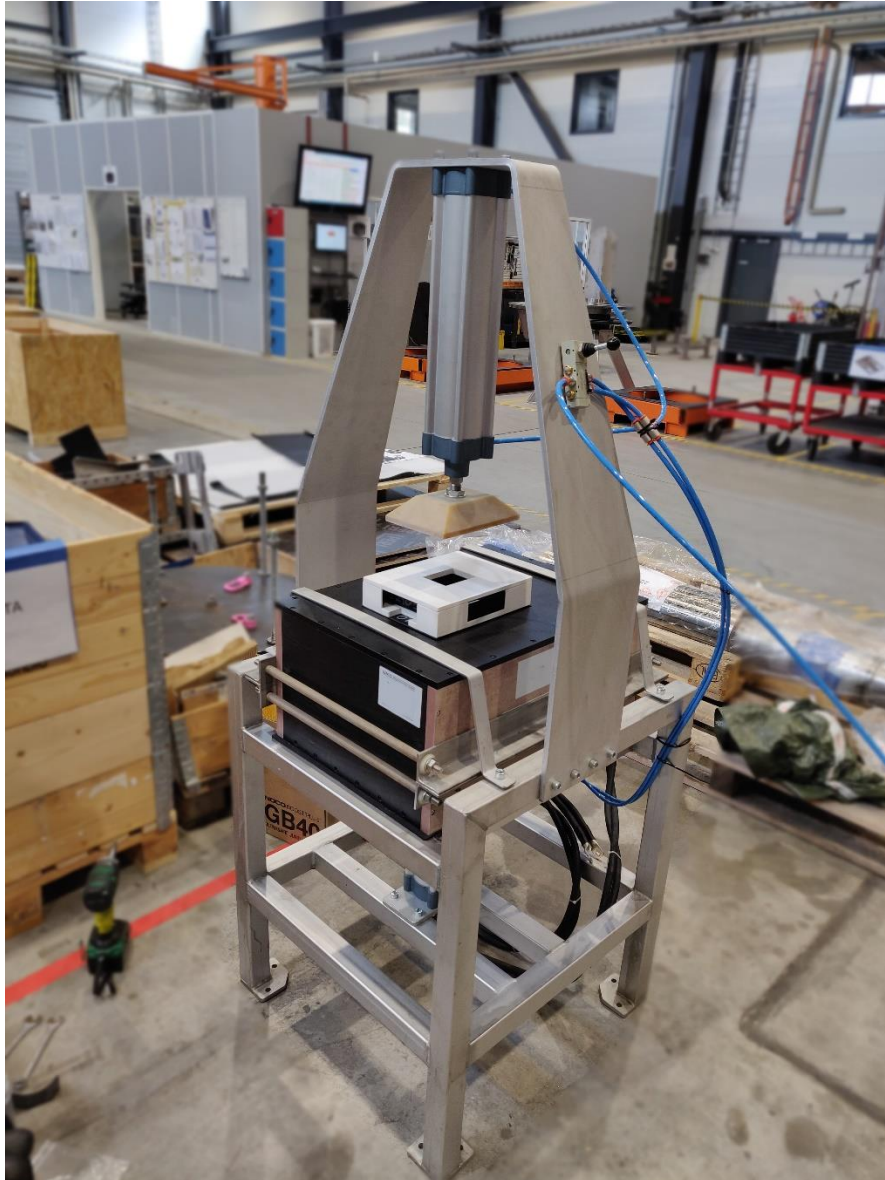
Jos kelan pituudeksi l oletetaan 280 mm, magnetointivirraksi 10 kA ja kelan johdinkierrosten lukumääräksi 30, saadaan yhtälön 3.5 mukaan magnetointikelan sisällä olevan magneettikentän voimakkuudeksi

$$H = \frac{30 \cdot 10000 \text{ A}}{0,28 \text{ m}} \approx 1007 \frac{\text{kA}}{\text{m}}.$$

Neorem 512a kestopagneettimateriaalin nimelliseksi koersitiivivoimaksi on kuvassa 3.3 ilmoitettu 1000 kA/m, joten on perusteltua olettaa, että esimerkiksi ks. magneettimateriaalista valmistettuja magneettiaihioita voisi magnetoida myös TS:n laitteistolla.

4.2 Magnetointipukki

Magnetointikelan ympärille rakennettavan kokonaisuuden, niin sanotun magnetointipukin, suunnittelussa määräävänä tekijänä oli työturvallisuus, helppokäyttöisyys ja kestävä rakenne. Pukin suunnittelun ja kokoonpanon kiireellisen aikataulun takia valittavien materiaalien ja osien geometrian soveltuvuudet arvioitiin tapauskohtaisesti, eikä esimerkiksi valmiin pukin rasitusanalyysiä tehty. Kuvassa 4.3 on esitetty kokoonpantu magnetointipukki.

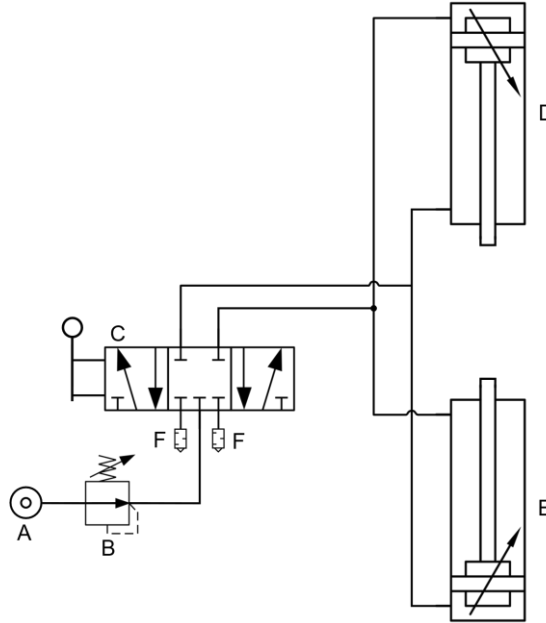


Kuva 4.3. Kuva kokoonpannusta magnetointipukissa TS:n tehtaalla.

Valmis magnetointipukki koostuu rungon teräsosista, magnetointikelasta, pneumatiikkainstrumenteista sekä muovi- ja kuituvalmisteisista osista. TS:n tietosuojavaatimusten mukaan tässä tutkielmassa ei esitetä valmistuspiirustuksia, 3D-malleja eikä tarkkoja mittoja muille kuin standardiosille.

4.2.1 Magnetointipukin pneumatiikkainstrumentit

Magnetointipukin pneumatiikkainstrumentit valittiin mukailien aiemmin käytössä ollutta magnetointipukin versiota, kuitenkin työskentelymukavuutta parantaen. Käytännössä tämä tarkoitti yksivaiheista käyttöä siten, että pukin molempia sylintereitä ohjataan samalla vipuventtiilillä erillisten vipuventtiilien sijaan.



Kuva 4.4. Magnetointipukin pneumatiikkakaavio. Kuvassa A ja B vastaavat paineilmajärjestelmän lähtöä ja paineregulaattoria, C ja F vipuventtiiliä äänenvaimentimiseen, D magnetointipukin ylempää paineilmasylinteriä (iskunpituus 320 mm) ja E alempaa sylinteriä (iskunpituus 200 mm).

Paineilmasylinterit ovat standardin ISO 15552 -mukaisia vakiosylintereitä säädettävällä paluuvaimennuksella. Molempien sylintereiden männän halkaisija on 80 mm sekä männänvarren paksuus 25 mm. Mikäli ei oteta huomioon sylinterissä tapahtuvia häviöitä, voidaan männänvarren aksiaalinen staattinen voima $F_{\text{sylinteri}}$ laskea paineen määritelmällä

$$p = \frac{F_{\text{sylinteri}}}{A} = \frac{F_{\text{sylinteri}}}{\pi r_{\text{mäntä}}^2} \Rightarrow F_{\text{sylinteri}} = p\pi r_{\text{mäntä}}^2, \quad (4.1)$$

jossa p on paineilmalinjaston paine ja A männän pinta-ala ja $r_{\text{mäntä}}$ on männän säde. TS:llä käytetään paineilmalinjaston paineena noin 7 bar tai 700 kPa painetta. Tällöin sylinterien välissä olevaan kappaleeseen vaikuttavan voima on suurimmillaan

$$F_{\text{sylinteri}} = 700 \cdot 10^3 \text{ Pa} \cdot \pi \cdot (0.04 \text{ m})^2 \approx 3,5 \text{ kN}.$$

Magnetointipukin aiemmassa versiossa havaittiin, että tämänkokoisten sylintereiden voima riittää pitämään moduulin magnetointitilanteessa lähes staattisena. Käytännössä pukin komponenteissa voi esiintyä magneettikentän ja magneettimoduulin välisen voiman vaikutuksesta hetkellisiä muodonmuutoksia, jolloin magneettimoduuli voi liikahtaa magnetointitilanteessa.

Työturvallisuuslaissa määrätään työnantajan velvollisuudeksi huolehtia, että vaara- ja haittatekijöiden syntyminen estetään tai ne korvataan vähemmän vaarallisilla tekijöillä (L. 738/2002, 8 §). Työturvallisuuden takaamiseksi magnetointipukin pneumatiikkajärjestelmässä käytettävä paine ja siten sylinterien männänvarren aksiaalinen voima on alennettu paineregulaattorilla tasolle, jossa ei arvioida aiheutuvan merkittävää puristusvaaraa. Lisäksi työntekijöiden perehdytyksestä magnetointipukin käyttöön on huolehdittu.

4.2.2 Magnetointipukissa käytettävien materiaalien magneettiset ominaisuudet

Magnetointipukissa käytettävien materiaalien tuli olla kulutuskestäviä, helposti saatavia sekä ei-magneettisia. Suuret ferromagneettiset osat voisivat aiheuttaa merkittävän puristusvaaran tilanteessa, jossa magnetoitua magneettimoduulia käsitellään niiden lähellä. Tällöin magneettinen luonne oli määräävä tekijä lähes kaikissa materiaalivalinnoissa.

Rungon osien materiaalivalinnassa määrääviä tekijöitä olivat saatavuus, materiaalikustannukset ja työstömahdollisuudet paikallisilla metallityöstöä tarjoavilla yrityksillä. Magnetointipukin teräsosissa valittiin käytettäväksi EN 1.4301 ja EN 1.4401 rakenneteräksiä, jotka tunnetaan myös ruostumattomana ja haponkestävänä teräksenä. Molemmat edellä mainitut teräkset ovat austeniittisiä (SFS EN 10088-1:2014, taulukko 2) jolloin ne eivät vedä magneettia puoleensa. Teräsosien lujuustekniset ominaisuudet arvoitiin yhdessä TS:n mekaniikkasuunnittelijan kanssa pukkiin soveltuviksi, kun ainevahvuudeksi valittiin 50x50 mm neilöputkessa 3 mm sekä levystä valmistettavista osissa 10 mm. Kasaukseen käytettävät pultit, mutterit ja aluslevyt valittiin myös haponkestävästä EN 1.4401 materiaalista valmistettuna.

Pukin koneistettaviin muoviosiin materiaalivaihtoehtoina olivat tekniset muovit kuten nailon / PA (polyamidi) sekä POM (polyoksimetyyli, polyasetali). Kumpaakin edellä mainituista muoveista oli laajasti saatavilla. Magnetointipukin materiaaliksi valittiin POM sen teknisten ominaisuuksien takia. POM on helposti työstettävissä ja lujuustekniset ominaisuudet arvioitiin käyttökohteeseen soveltuvaksi. Toisin kuin nailoniin, POM:in ei sitoudu kosteutta eikä veden sitoutumisesta osiin ilmene mittojen muutosta. (Vink 2021a ja 2021b)

Lujuusteknisesti vaativimmissa, koneistettavissa, ei-metallisissa osissa materiaaliksi valittiin eräs epoksilujitteinen lasikuitumateriaali. Vastaavaa kuitumateriaalia voidaan käyttää muun muassa sähkökoneiden eristeissä, mutta mekaanisesti lujana se arvioitiin ja myöhemmin todettiin soveltuvaksi myös tämän tutkielman magnetointipukin osiin.

Saatavuuden perusteella valittujen paineilmasylinterien männänvarren materiaali on C45 / EN 1.0503 hiiliterästä (IKH 2021). Kyseisen teräs havaittiin ferromagneettiseksi, mutta magneettimoduulin ja männänvarren välisistä vetovoimista johtuvat työmukavuuteen ja -turvallisuuteen vaikuttavat tekijät arvioitiin ja todettiin riittävän pieniksi. Normaalisissa käyttötilanteissa, jossa käsitellään magnetoitua magneettimoduulia, männänvarsi on kokonaisuudessaan sylinteriputken sisällä eikä välitöntä puristumista varren ja magneettimoduulin väliin pääse tapahtumaan. Myös pneumatiikkaosien liitinrunkojen havaittiin olevan magneettisia, mutta niiden sijainnin ja fyysisen koon perusteella niiden vaikutus työmukavuuteen ja -turvallisuuteen todettiin merkityksettömäksi.

4.3 Magnetointitapahtuma

Aiemmin luvuissa 4.1 sekä 4.2 esitelty laitteisto on sijoitettu TS:n Lappeenrannan tehtaalla erilliseen huoneeseensa siten, että materiaalivirta huoneen läpi on sujuvaa. Lisäksi esteetön magneettimoduulin kuljetus asennussoluun magneettisuuden mittauksen jälkeen on työturvallisuuden kannalta ensiarvoisen tärkeää (Härkänen 2020).

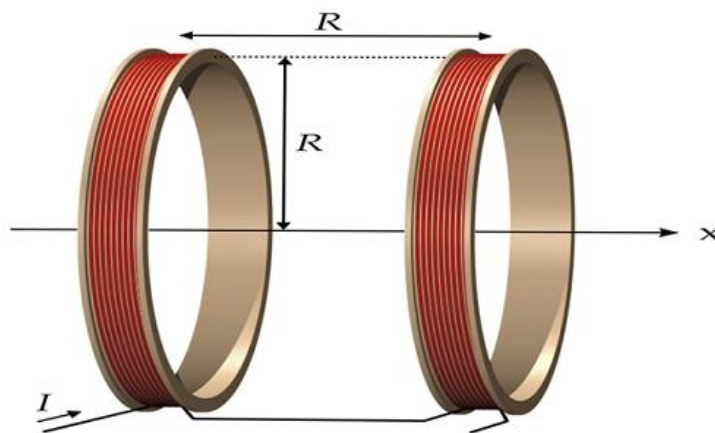
Kuten luvussa 2.2 todettiin, magneettimoduulien magneettinen N-kohtio osoittaa vuorotellen pois päin roottorin keskikohdasta ja roottorin keskikohtaan päin. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että riippuen magneettimoduulin asennuskohdasta se magnetoidaan pohjalevy ylös tai alas päin magnetointipukissa.

Magnetointitilanteessa magnetoimaton moduuli asetetaan pukissa olevaan moduulin pidikkeeseen (kuvassa 4.3 näkyvä valkoinen osa magnetointikelan yläpuolella). Kun pidikkeen kansi on asetettu paikalleen, painetaan moduuli magnetointikelan valmistajan ilmoittamaan magneettiseen keskikohtaan paineilmasylintereillä käyttäen vipuventtiiliä. Kun paineilmasylinterit ovat staattisessa tilassa puristaen magneettimoduulin pidikettä käämin sisällä, voidaan riittävän turvaetäisyyden päästä laukaisumoduulia käyttäen ohjata magnetointikelaan virtaimpulssi. Magnetoitu moduuli poistetaan magnetointipukista tuomalla moduulin pidike vipuventtiilillä työskentelykorkeudelle pois käämistä, jonka jälkeen sen magneettisuus mitataan Helmholtz-mittauksella. Välittömästi mittauksen jälkeen magneettimoduuli asennetaan roottoriin, eikä magnetoituja magneettimoduuleita varastoida irrallisena.

4.3.1 Helmholtz-mittaus

Magneettimateriaalille ilmoitetaan tyypillisesti valmistajan toimesta nimellinen remanenssi B_r . Aiemmin esitellyn magnetoinnin aikana magneettimateriaali kyllästetään ulkoisella magneettikentällä, jolloin kappaleen remanenssi vastaa ainakin teoriassa sille ilmoitettua nimellistä remanenssia. Luvussa 2.2 esitellyn yhtälön 2.4 mukaan magneettivuon muutosnopeus vaikuttaa johtimeen indusoituvaan jännitteeseen. Generaattorina toimivassa sähkökoneessa roottorin kestopagneettien remanenssi vaikuttaa suurimpaan tehoon, jonka generaattori voi tuottaa. Jotta varmistutaan tuotettavan kestopagneettigeneraattorien tasalaatuisuudesta ja halutunlaisesta toiminnasta, on olennaista varmistaa magneettimoduulien remanenssin täyttävän sille asetetun minimiraja-arvon. Remanenssin minimiraja-arvona voidaan käyttää joko valmistajan ilmoittamaa tai itse määriteltyä pienintä sallittua arvoa.

Magneettisuuden mittaamiseen voidaan käyttää Helmholtz-kelaa ja vuo- tai jännitemittaria. Helmholtz-kela koostuu kahdesta identtisestä, pyöreästä kelasta, jotka ovat niiden säteen etäisyydellä toisistaan. (Trout 1988). Kuvassa 4.5 on havainnollistettu Helmholtz-kelan rakenne.



Kuva 4.5. Helmholtz-kelaa kuvaava malli. (EMWORKS 2021).

Magneetin magneettisuuden mittaamiseksi se asetetaan kelojen keskelle siten, että sen magneettiset kohtiot ovat kuvassa 4.5 esitetyn vektorin x suuntaisesti. Mittauksessa magneettia joko käännetään 180 astetta tai se poistetaan kelojen keskeltä aksiaalisesti, jolloin keloihin indusoituu jännite. Kun tunnetaan magneetin tilavuus ja mittausjärjestelmän parametrit, voidaan magneetin remanenssi B_r laskea indusoituneen jännitteen suuruudesta. (Trout 1988.)

Remanenssin mittauksessa toistettavuuden ja mittaustulosten luotettavuuden kannalta on olennaista, että magneettimoduuli on tarkasti kohtisuorassa kelaan nähden ja se poistetaan kelasta vakionopeudella (Kurronen 2020).

4.4 Magnetointilaitteiston nykytila ja jatkokehitys

Ennen tämän tutkielman julkaisua aiemmin esitelty magnetointilaitteisto on kokonaisuutena havaittu sähkökoneen tuotantoon soveltuvaksi. Magnetointipukin edelliseen versioon nähden työskentelymukavuus, työturvallisuus sekä muokattavuus aiempien ja tulevien konemallien tuotantoon on havaittu paremmaksi. Suunnittelun aikaiset arvioinnit sopivista materiaalivalinnoista ja työturvallisuustekijöistä ovat osoittautuneet paikkansa pitäviksi.

Mikäli tässä tutkielmassa viitattua konemallia esimerkiksi suuren tilauskannan takia ryhdytään sarjatuottamaan, on magnetointilaitteiston osittaisen tai täydellisen automatisoinnin tarve syytä arvioida (Härkänen 2020). Sähköteknisestä näkökulmasta magnetointipukkiin voisi automatisointia ennakoiden vaihtaa vipuventtiilin tilalle solenoidiohjatun pneumatiikkaventtiilin sekä sen ohjauskomponentit esimerkiksi erillisellä ohjainyksiköllä. Lisäksi paineilmasylintereiden tilatieto on automatisoinnin kannalta tarpeellinen tieto, jotta magnetointikelan tehonsyöttö ei kytkeydy ennen kuin magneettimoduuli on oikeassa kohdassa magnetointikelaa. Tilatiedon saamiseksi voisi hyödyntää paineilmasylinteriä, joka on varustettu rajakytkimellä.

5. YHTEENVETO

Työssä tehtävän kirjallisuuskatsauksen aikana havaitut ilmiöt ja niiden seuraukset yhdistettiin käytännön työskentelyyn kestopagneettien kanssa. Käytännössä ilmiöihin varautuminen voi tarkoittaa esimerkiksi tehdastilojen järjestelyn muutoksia, muutoksia itse suunniteltavien työvälineiden materiaalivalinnoissa ja koneessa käytettävien magneettien hankkimista tapauskohtaisesti joko magnetoituna tai magnetoimattomina.

Kestomagnetoidun sähkökoneen tuotannossa, tarkemmin magneettien hankkimisessa ja käsittelyssä, on olennaista vertailla asennusmenetelmien eroja, magneettien hankkimisesta aiheutuvia kustannuksia sekä mahdollisuutta hankkia valmiita alikokoonpanoja puolivalmistaiden sijaan. Riippuen tuotettavan sähkökoneen mallista, edellä mainitut seikat huomioiden, TS on päättänyt hankkimaan valmiita kestopagneetteja sekä magnetoimattomia aihioita kuhunkin tilanteeseen tapauskohtaisesti paneutuen. Sähkökoneeseen asennettavien magneettien tyyppi tulee valita konemallikohtaisesti, esimerkiksi koneen halutun tehon saavuttamiseksi. Koneen tasalaatuisuuden varmistamiseksi magneettien remanenssi on syytä mitata aina ennen kokoonpanoa.

Laitteiston suunnittelussa ja työskennellessä tulee suunnittelijan sekä työntekijän varautua inhimilliseen virhetilanteeseen ja pyrkiä minimoimaan riskit. Kestomagneettien käsittelyssä tulee ottaa huomioon magneetin ja ferromagneettisen aineen väliset vuorovaikutukset, jotta puristusvaaraa ei pääse syntymään. Sähkökoneissa käytettävän kokoluokan NdFeB-magneettien ja ferromagneettisen kappaleen välinen puristusvoima voi olla jopa kymmeniä kilonewtoneita, jolloin niiden käsittelyssä tulee noudattaa erityistä varovaisuutta.

Käytännön osuutena uusiksi suunniteltu magnetointipukki on todettu tuotannon aikana tarkoituksen sopivaksi, joten työn tavoitteeseen päästiin. Työskentelymukavuus on tuotannon henkilöiden mukaan parantunut, magnetointipukki toimii odotetulla tavalla eikä sen käytössä ole havaittu merkittäviä riskejä. Pukin jatkokehityskohteita on arvioitu, ja ne keskittyvät lähinnä automatisoinnin mahdollistavaan tilatietoon ja sähköiseen ohjaukseen. Tois-
taiseksi ei kuitenkaan ole tarpeellista muuttaa olemassa olevaa laitteistoa.

LÄHTEET

Control engineering 2021. Understanding permanent magnet rotors. Verkkosivu. Viitattu 23.1.2021.

Saatavilla: <https://www.controleng.com/articles/understanding-permanent-magnet-motors/>

DB Schenker 2021. Vaaralliset aineet ja jätejakeet. Operatiivinen ohje. Viitattu 11.1.2021

Saatavilla: <https://www.dbschenker.com/fi-fi/tuotteet/operatiivisia-ohjeita/vaaralliset-aineet>

EMWORKS 2021. Numerical simulation of Helmholtz coil. Viitattu 11.1.2021

Saatavilla: <https://www.emworks.com/application/numerical-simulation-of-helmholtz-coil>

Heikkilä, T. 2002. Permanent magnet synchronous motor for industrial inverter applications – analysis and design. Väitöskirja. Acta Universitatis Lappeenrantaensis 134. Lappeenranta University of Technology. Tukholma.

Saatavilla: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/31173/TMP.objres.359.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Hyperphysics 2021a. Solenoid. Verkkomateriaali. Viitattu 7.1.2021

Saatavilla: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/solenoid.html>

Hyperphysics 2021b. Coercivity and Remanence in Permanent Magnets. Verkkomateriaali. Viitattu 7.1.2021

Saatavilla: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/magperm.html>

Härkänen, J. 2020. Keskustelu TS tehtaalla 23.11.2020.

Härkänen, J. 2021. Keskustelu TS tehtaalla 13.1.2021.

Immonen, P. 2019. Magneettimateriaalit ja magneettiipiirit. Luentomateriaalia.

Intermag 2021. Shipping Magnets by Air. Verkkosivu. Viitattu 11.1.2021

Saatavilla: <https://www.intemag.com/magnet-tips-for-shipping-by-air>

JustScience, 2021. “How does a solenoid work?” Verkkoartikkeli. Viitattu 10.1.2021.

Saatavilla: <http://www.justscience.in/articles/how-does-a-solenoid-work/2017/05/25>

Korpinen, L. 1998a. Sähkövoimatekniikkaopus. 10 – Sähkökoneet OSA 1. Viitattu 10.1.2021

Saatavilla: http://leenakorpinen.com/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf

Korpinen, L. 1998. Sähkövoimatekniikkaopus. 10 – Sähkökoneet OSA 2 Viitattu 10.1.2021

Saatavilla: http://leenakorpinen.com/archive/svt_opus/10sahkokoneet_2osa.pdf

Kurronen, P. 2020. Magneettimoduulien mittauskaluston päivitys. Yksityinen sähköpostiviesti 15.12.2020. Viestin saaja: Topias Hyttinen, Jonne Härkänen.

Lucas, J. 2015. Rare Earths – Science, Technology, Production and Use. Kirja. Viitattu 11.1.2021.

Marx, J. ym. 2018. Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Permanent Magnet Production from Different Rare Earth Deposits. Viitattu 11.1.2021.

MCE 2021. Coercivity and Intrinsic Coercivity. Verkkosivu. Viitattu 7.1.2021
Saatavilla: https://www.mceproducts.com/Knowledge_Base/Articles/About_Coercivity_and_Intrinsic_Coercivity.htm

Mäkelä, M. ym. 2019 Tekniikan kaavasto: matematiikan, fysiikan, kemian ja lujuusopin peruskaavoja sekä SI-järjestelmä. 19. p. Tampere: Amk-kustannus.

Neorem Magnets 2021a. Neorem 512a tuotesivu. Viitattu 5.1.2021.
Saatavilla: <https://neorem.fi/wp-content/uploads/2019/04/hysteresis-graph-512a.pdf>

Neorem Magnets 2021b. Physical properties of NdFeB material. Viitattu 16.1.2021
Saatavilla: https://neorem.fi/wp-content/uploads/2018/12/NdFeB_PhysicalProperties_of_NdFeB_material.pdf

Posti 2021. Vaaralliset aineet. Verkkosivu. Viitattu 11.1.2021
Saatavilla: <https://www.posti.fi/fi/asiakastuki/lahttaminen/vaaralliset-ja-kiellettyt-aineet/vaaralliset-aineet>

Puranen, J. 2021. TS kestopagneettien mängeettinen vetovoima. Yksityinen sähköpostiviesti 18.1.2021. Viestin saaja: Topias Hyttinen, Jonne Härkänen

Pyrhönen, J. 2006. Sähkökäyttötekniikan perusteet luentomateriaalia.

Pyrhönen, J., Nerg J. 2004. Sähkömagnetismi. Opetusmoniste, LTKK. ISBN 951-764-625-9.

Sinus Magnettechnik 2021. Products and services. Verkkosivu. Viitattu 16.1.2021
Saatavilla: http://www.sinus-magnettechnik.de/gb_produkte.html

SFS EN 10088-1:2014. Ruostumattomat teräkset. Osa 1. Ruostumattomien terästen luettelo. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

The Switch 2021. PMM1500 0-200 rpm datalehti. Viitattu 14.1.2021.
Saatavilla: https://www.ru.yaskawa.eu.com/Global%20Assets/Downloads/Technical_Documentation/EE/Marine/Marine%20PMM%201500%2C%200%20%20E2%80%93%20200%20rpm_data-sheet_EN_TheSwitch_2018.08.09.pdf

Trout S. R. 1998. Use of Helmholtz Coils for Magnetic Measurements. Tieteellinen julkaisu.

Vink 2021a. Polyamidi. Verkkosivu. Viitattu 10.2.2021
Saatavilla: https://www.vink.fi/muovitetopankki/pa_muovi

Vink 2021b. Polyoksimetyyli. Verkkosivu. Viitattu 10.2.2021
Saatavilla: https://www.vink.fi/muovitetopankki/pom_muovi