



# **RAUTATIEKISKON LÄMMITTÄMI- NEN INDUKTIOPERIAATTEELLA**

Jyri Siiri

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2015  
Sähkötekniikka  
Sähkövoimatekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Tampere University of Applied Sciences

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikka  
Sähkövoimatekniikka

SIIRI, JYRI:

Rautatiekiskon lämmittäminen induktioperiaatteella

Opinnäytetyö 56 sivua, joista liitteitä 6 sivua  
Toukokuu 2015

---

Tämän opinnäytetyön aiheena on rautatiekiskon lämmittäminen induktioperiaatteella. Työn tavoitteena oli kehittää toimiva vaihtoehtoinen lämmitysmenetelmä rautatiekiskolle nykyisten lämmitysmenetelmien rinnalle sekä tehdä soveltava laskentamalli, jota voidaan käyttää hyödyksi suurempien kiskokokonaisuuksien laskentaa varten. Lisäksi työhön kuului oman lämmittimen rakentaminen ja testaus.

Työn alussa keskityttiin laskentamalliin, jossa tarkasteltiin magneetti- ja virtapiirejä. Magneetti- ja virtapiirissä keskityttiin magneettivastuksiin, magneettikentän suuruuteen ja magneettivuohon. Magneetti- ja virtapiirin jälkeen vuorossa oli virtapiiri. Piirin laskennan kannalta keskeisiä oli impedanssi, virta ja jännite. Työn alussa jännitteen suuruudeksi oli kaavailtu vaihejännitettä, mutta työn edetessä jouduttiin toteamaan tämän olevan mahdoton.

Oman lämmittimen rakentaminen osoittautui haasteelliseksi rautatiekiskon terävien kulmien ja käämilangan ohuuden takia. Lämmitin saatiinkin vasta kolmannella yrittämällä ehjänä valmiiksi. Laskentamallissa ongelmia tuotti se, etteivät kaikki kiskon ominaisuudet olleet tiedossa. Testaus ei tapahtunut suunnitelluissa olosuhteissa, joten lumenkulutuskyky jäi tässä opinnäytetyössä testaamatta. Kiskon lämmittäminen induktioperiaatteella on toimiva lämmitysmenetelmä, mutta massatuotantoon asti pääseminen vaatii paljon kehitystyötä. Kehitysideana voisi olla esimerkiksi valmiiksi käämityt kappaleet, jotka vain liitettäisiin kiskoon.

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical Engineering  
Option of Electrical Power Engineering

SIIRI, JYRI:

Heating of the Railway Track with the Induction Principle

Bachelor's thesis 56 pages, appendices 6 pages  
May 2015

---

The subject of this thesis is the heating of the railway track with the induction principle. The object of the thesis was to create alternative method of heating the railway track alongside the existing heating methods as well as make applying calculation model that can be utilized for the calculation of larger rail entities. In addition, the work included the construction and testing of the heater.

Calculation model was the focus at the beginning of the thesis in which the magnetic and electric circuit were examined. Magnetic resistors, the magnitude of magnetic field and magnetic flux were the focus in the magnetic circuit. After the magnetic circuit, it was the electric circuit was examined. Impedance, current and voltage were in the spotlight of the calculation of the electric circuit. At the beginning of the thesis the phase voltage was planned to be used but as the thesis proceeded this was found to be impossible.

The building of the heater proved to be challenging because of the sharp corners of a railway track and the thinness of the winding wire. The heater was completed intact only after the third try. Not all the properties of a rail were known and this caused problems in the calculation model. Testing did not occur under the planned conditions so the snow melting capacity remained untested in this thesis. Heating of the railway track with induction principle is a working heating method but it requires a great deal of development work before it reaches mass production. For example, one development idea could be pre-coiled parts that could be attached to the rail.

---

Key words: railway track, calculation model, heater

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	TEORIA JA TAUSTATIEDOT.....	7
2.1	Rautatiekiskon yleisiä ominaisuuksia.....	7
2.2	Rautatievaihdealueiden lämmitys tällä hetkellä.....	7
2.3	Magneettiipiiri.....	8
2.3.1	Magneettiipiirin sijaiskytkentä.....	11
2.3.2	Kyllästyminen .....	11
2.3.3	Magneettiipiirin impedanssin laskenta.....	12
2.4	Magneettiipiirin häviöt.....	13
2.4.1	Pyörrevirtahäviöt.....	14
2.4.2	Hystereesihäviöt.....	14
3	LASKENTAMALLI .....	16
3.1	Magneettiipiiri.....	16
3.1.1	Magneettivastusten määrittäminen .....	17
3.1.2	Sähköiset ominaisuudet.....	19
4	MITTAUS .....	24
4.1	Mittausjärjestelyt .....	24
4.2	Mittauksessa käytetyn laitteiston esittely .....	25
4.2.1	Työssä käytetty johdin .....	25
4.2.2	Fluke 189.....	25
4.2.3	Ganz HEWa .....	27
4.2.4	Fluke 87.....	27
4.2.5	Fluke 61.....	29
4.2.6	Virtavaunu.....	29
4.3	Mittaustulokset.....	30
4.3.1	15 A:n mittaukset .....	31
4.3.2	10 A:n mittaukset .....	41
4.4	Mallinnus 230 V tasoon .....	46
5	POHDINTA.....	48
5.1	Arvio työn onnistumisesta .....	48
5.2	Kehitysideat .....	49
	LÄHTEET.....	50
	LIITTEET .....	51
	Liite 1. Laskentamalli, kun suhteellinen permeabiliteetti on 4000 .....	51
	Liite 2. Laskentamalli, kun suhteellinen permeabiliteetti on 1500 .....	53
	Liite 3. Laskentamalli, mallinnus 230 V .....	55

**LYHENTEET JA TERMIT**

$H$	magneetikentän voimakkuus
$N$	käämikierrosten kappalemäärä
$F_m$	magnetomotorinen voima
$B$	magneettivuon tiheys
$\mu$	väliaineen permeabiliteetti
$\mu_r$	kiskomateriaalin suhteellinen permeabiliteetti
$\mu_0$	tyhjiön permeabiliteetti, kutsutaan myös magneettivakioksi
$\phi$	magneettivuo
$R_m$	reluktanssi
$\lambda$	permeanssi
$\rho$	resistiivisyys

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia rautatiekiskon lämmittämistä induktioperiaatteella. Työn tarkoituksena on kehittää toimiva vaihtoehtoinen lämmitysmenetelmä vaihdealueelle nykyisten lämmitysmenetelmien rinnalle. Työ tehdään Tampereen ammattikorkeakoululle ja ammattikorkeakoulun sähkölaboratoriossa.

Työssä käytetään noin metrin mittaista rautatiekiskon osaa, joka käämitään itse kuparijohtimella. Kiskon käämitykseen syötetään vaihtovirtaa, jonka teoriassa tulisi lämmittää kiskoja. Lämmitys perustuu pyörrevirtahäviöihin, joita tapahtuu kiskossa. Lämmitin rakennetaan säädettäväksi. Työn lähtökohtana on laskentamallin muodostaminen ja sen perusteella oman lämmittimen rakentaminen. Laskentamallissa ei oteta huomioon paluvirtapiirejä, jotka oikeasti kulkisivat junan raiteilla. Tärkeitä tarkastelukohteita ovat lämmitin ja sen säädettävyyden toiminta, johtimessa kulkevan virran suuruus ja syötetävän jännitteen suuruus.

Vaihteiden merkitys junaliikenteen toimimisen kannalta on suuri. Toimintahäiriöt vaihteissa myöhästyttävät junia ja myöhästelyn seurauksena asiakkaiden tyytyväisyys laskee. Vaihteen hajoamisen seurauksena myös junien liikennöinti tiheys laskee.

Talvisin ongelmia aiheuttavat lumi ja jää. Vaihteen kääntyminen ja lukittuminen voivat estyä lumen ja jään toimesta. Tämä voi aiheuttaa vaaratilanteita, joten vaihteen toimiminen on keskeisessä roolissa junaliikenteessä.

Tällä hetkellä käytössä olevat vaihteiden lämmitysmenetelmät kuluttavat yli 50 % kaikesta radanpidon sähkönkulutuksesta, tämä vastaa noin 60 000 000 kWh vuosittain (Radanpidon sähkönkulutus 2011). Junakaluston ja rautatiejärjestelmän energian kokonaiskulutukseen verrattuna vaihteiden lumensulatus vastaa noin 10 % junaliikenteen sähköenergian kulutuksesta (Korpela 2014, tiivistelmä).

## **2 TEORIA JA TAUSTATIEDOT**

### **2.1 Rautatiekiskon yleisiä ominaisuuksia**

Nykyisin käytössä olevat kiskot ovat suunniteltu 1800 – luvun puolella välissä. Kisko voidaan jakaa kolmeen osaan. Nämä osat ovat hamara, varsi ja jalka. Hamaran tarkoituksena on antaa kiskolle kulutus pintaa, varren tehtävänä on antaa kiskolla pystysuuntaista taivutusjäykkyyttä ja jalka jakaa kiskoon kohdistuvat kuormat leveämmälle alalle pölkyn pinnalle. Käytössä olevaa kiskoprofiilia kutsutaan leveäjalkaiseksi kiskoprofiiliksi. (Ratakiskon elinkaari 2011.)

Työssä käytetään 60 E 1 – kiskoprofiilia. Profiilimerkintä koostuu kolmesta osasta. Ensimmäinen osa on luku, joka kertoo kiskon massan metriä kohti. Toinen osuus koostuu kirjaimesta E, joka kertoo kyseessä olevan EN – standardin mukainen kiskoprofiili. Kolmas ja viimeinen osa kertoo kiskon juoksevan järjestysluvun. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, monesko versio kyseisestä kiskosta on käytössä. (Ratakiskon elinkaari 2011.)

Kiskot valmistetaan teräksestä. Ensimmäisenä vaiheena on kiskoaihioiden valaminen. Kiskot valmistetaan kiskoaihioista valsaamalla. Nykyisin rakennetaan pääsääntöisesti vain jatkuvakiskoraiteita. Jatkuvakiskoraide tarkoittaa, että kiskot hitsataan yhteen pitkiksi kokonaisuuksiksi. Kyseinen hitsaus suoritetaan lähinnä termiitti- tai leimuhitsausmenetelmällä. (Ratakiskon elinkaari 2011.)

### **2.2 Rautatievaihtealueiden lämmitys tällä hetkellä**

Vaihteita lämmitetään nykyään melkein pelkästään tukikiskon tai kieliprofiilin kylkeen asennetuilla lämmityselementeillä (Fagerholm, 2013; Granlund, 2010; Korpela 2014, 16 mukaan). Sähköistetyillä rataosuuksilla lämmityslaitteistoista suurin osa saa energiansa sähköradasta. Ensimmäiseksi otettu energia ohjataan lämmityskeskukselle, josta se jatkaa matkaansa erotusmuuntajille. Viimeisenä vaiheena erotusmuuntajat syöttävät vaihteissa kiinni olevia lämmityselementtejä. Sähköistämättömillä rataosuuksilla lämmityk-

seen vaadittava energia otetaan paikallisesta pienjänniteverkosta. (Liikennevirasto: B17, 2006.)

Lämmityselementti on vaihteen lämmityksen tärkein komponentti. Sähkövastuksesta ja teräskuoresta koostuva lämmityselementin sähköinen teho vaihtelee 700–2300 W välillä. Elementti tuottaa 200–500 W/m tehoa. (Korpela 2014,16.) Lämmityksen tehostamiseksi voidaan asentaa kaksi kappaletta elementtejä. Yksittäisen vaihteen lämmitysteho on 8-64 kW. Vaihteen malli ja tyyppi vaikuttavat lämmitystehon suuruuteen. (Liikennevirasto: B17, 2006.)

Nykyisessä lämmityselementtiin perustuvassa lämmitystavassa on useita ongelmia. Lämpöenergia siirtyy lämmityselementistä lumeen ja jähän kolmella tavalla. Lämpöenergian siirtymistavat ovat konvektio, johtuminen ja lämpösäteily. Korpelan (2014,35) mukaan lämpöelementtien säteilyteho on melko huono verrattuna sähköiseen tehoon. Lämpösäteilystä Korpela (2014,36) toteaa, että vain pieni osa kohdistuu lumeen, joka sijaitsee kieliprofiilin ja tukikiskon välissä. Korpela (2014,36) myös huomauttaa, että siitä vähäisestä kohdistuneesta lämpösäteilystä vain pieni osuus absorboituu lumeen. Johtuneesta lämpöenergiasta parhaimmillaan 50 % osuu lumeen, joka sijaitsee kieliprofiilin ja tukikiskon välissä (Korpela 2014, 43). Johtuneella lämpöenergialla lämmennyt tukikiskon sivuprofiili toimii Korpelan (2014, 43) mukaan todennäköisesti parempana lämpösäteilyn lähteenä kuin suoraan lämmityselementistä säteilevä lämpöenergia. Konvektiosta Korpela (2014, 43–44) toteaa, että sen vaikutus on lähinnä hyötysuhdetta pienentävä. Lopuksi Korpela (2014,45) toteaa, että parhaassa tapauksessa noin 40 % lämmityselementin tuottamasta lämpötehosta sulattaa lunta.

### **2.3 Magneettiipiiri**

Sähkömagnetismi voidaan esittää tiivistetysti Maxwellin yhtälöiden ja väliaineet kenttiin sitovien yhtälöiden avulla. Maxwellin yhtälöihin kuuluu Ampèren laki, Faradayn laki, laki magneettikentän lähteettömyydestä ja Gaussin laki. (Sähkömagnetismi.)

Andrè-Marie Ampère havaitsi fysiikan lain, jota nykyään kutsutaan Ampèren laiksi. Ampèren lain mukaan sähkövirta muodostaa kulkiessaan ympärilleen magneettikentän, jonka suunta voidaan määrittää niin sanotun oikean käden säännön mukaan. Oikean käden säännön mukaan jos peukalo osoittaa virran suuntaan, näyttävät muut sormet



magneettikentän suunnan. Muodostuvan magneettikentän suunta riippuu siis virran suunnasta. Ampèren laista voidaan päätellä, että virran kasvaessa magneettivuon kasvaa. (PhysicsLAB, Ampèren laki.)

Ampèren lailla voidaan laskea magneettikentän voimakkuuden suuruus. Magneettikentän voimakkuuden tunnus on  $H$  ja sen yksikkö on A/m eli ampeeri per metri. Magneettipiirissä magneettikentän voimakkuus voidaan laskea johtimessa kulkevan virran  $I$  ja käämissä olevien kierrosten  $N$  kertolaskun suhteesta magneettipiirin pituuteen  $l_{mag}$ . Kertolaskussa olevia termejä kutsutaan myös magnetomotoriseksi voimaksi. Magnetomotorisen voiman tunnuksena käytetään joko  $F$  tai  $M$  kirjainta. Tässä työssä käytetään magnetomotorisen voiman tunnuksena merkintää  $F_m$ . Magnetomotorisen voiman yksikkö on A eli ampeerikierros. Magnetomotorisen voiman laskenta on esitetty kaavassa 1 ja magneettikentän voimakkuuden kaavassa 2.

$$F_m = N \cdot I, \quad (1)$$

missä  $N$  on käämin kierrosluku ja  $I$  on piirissä kulkeva virta.

$$H = \frac{F_m}{l_{mag}}, \quad (2)$$

missä  $H$  on magneettikentän voimakkuus,  $F_m$  on magnetomotorinen voima ja  $l_{mag}$  on magneettivuon reitin pituus.

Magnetismin tiheyttä kuvaavaa yksikköä kutsutaan magneettivuon tiheydeksi. Magneettivuon tiheyden tunnus on  $B$ . Magneettivuon tiheyden mittaamiseen käytetty yksikkö on T eli tesla. Magneettivuon tiheys riippuu magneettikentän voimakkuudesta ja väliaineen permeabiliteetista. Permeabiliteetti kuvaa aineen magneettista käyttäytymistä. Magneettivuon tiheydelle voidaan esittää alla oleva kaava 3. Permeabiliteetti on suhteellisen permeabiliteetin ja tyhjiön permeabiliteetin tulo. Väliaineen permeabiliteetin laskenta on esitetty kaavassa 4.

$$B = \mu \cdot H, \quad (3)$$

missä  $B$  on magneettivuon tiheys,  $\mu$  on väliaineen permeabiliteetti ja  $H$  on magneettikentän voimakkuus.

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0, \quad (4)$$

missä  $\mu_0$  on tyhjiön permeabiliteetti ja  $\mu_r$  on kiskomateriaalin suhteellinen permeabiliteetti. Tyhjiön permeabiliteetista käytetään myös nimitystä magneettivakio ja se on suuruudeltaan  $1,26 \cdot 10^{-6}$  Vs/Am.

Magneettivuo on nyt mahdollista ratkaista. Magneettivuo kuvaa magnetismin määrää ja sen tunnus on  $\phi$ . Magneettivuon yksikkö on Wb eli weber. Magneettivuo on mahdollista laskea magneettivuon tiheyden ja läpäistävän pinnan alan tulona. Magneettivuon laskentakaava on esitelty kaavassa 5.

$$\phi = B \cdot A, \quad (5)$$

missä  $B$  on magneettivuon tiheys ja  $A$  on läpäistävän pinnan ala.

Näiden perustietojen jälkeen voidaan siirtyä ratkaisemaan viimeisiä sijaiskytkentään vaadittavia komponentteja. Tarvittavia komponentteja ovat magneettinen vastus eli reluktanssi  $R_m$  ja sen käänteisarvo permeanssi  $\Lambda$ . Reluktanssin laskentakaava on esitetty kaavassa 6.

$$R_m = \frac{l_{mag.}}{\mu \cdot A_{mag.}}, \quad (6)$$

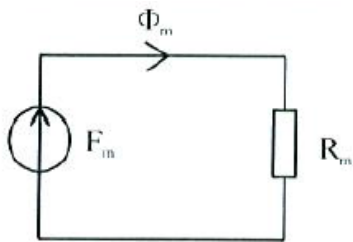
missä  $R_m$  on reluktanssi,  $l_{mag.}$  on magneettivuon reitin pituus,  $\mu$  on väliaineen permeabiliteetti ja  $A_{mag.}$  on magneettivuon pinta-ala. Permeanssi on reluktanssin käänteisarvo, joten kaava 6 vain kääntyy. Permeanssin laskentakaava on esitetty kaavassa 7.

$$\Lambda = \frac{\mu \cdot A_{mag.}}{l_{mag.}}, \quad (7)$$

missä  $\Lambda$  on permeanssi,  $A_{mag.}$  on magneettivuon ala,  $l_{mag.}$  on magneettivuon reitin pituus ja  $\mu$  on väliaineen permeabiliteetti..

### 2.3.1 Magneettiin sijaiskytkentä

Magneettiin voidaan mallintaa virtapiirianalogialla, jossa vuo on virta, magneettivas- tus vastaa resistanssia ja magnetomotorinen voima vastaa lähdejännitettä. Kuvassa 1 on esitetty sijaiskytkentä, jolla magneettiin käyttäytymistä voidaan mallintaa. (Hietalahti 2011, 6.)



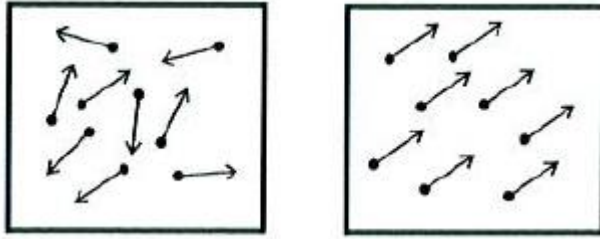
KUVA 1. Magneettiin käyttäytymistä mallintava sijaiskytkentä (Hietalahti 2011, 6)

Jos alkuperäisessä magneettiinissä on osia, joita ei voida yksinkertaisimmalla sijais- kytkennällä mallintaa, mallinnetaan kyseiset osat erilaisilla sarjaan kytketyillä vastuksil- la. Erikseen mallinnettavia magneettiin osia ovat mm. ilmaväli ja epäsymmetrinen rautasydän. (Hietalahti 2011, 7.)

### 2.3.2 Kyllästyminen

Työssä käytössä oleva kisko on valmistettu teräksestä. Teräs on yleinen nimitys kaikille seoksille, joissa on paljon rautaa. Huomattava onkin, että rauta on kyllästyvä materiaali. Magneettikentän voimakkuuden liiallinen kasvattaminen kasvattaa magneettivuota ja magneettivuon tiheyttä. Kentänvoimakkuuden kasvattaminen muuttaa suhteellista permeabiliteettia. Suhteellisen permeabiliteetin muutos johtuu siitä, että raudan alkeishiukkaset järjestäytyvät. (Hietalahti 2011, 7.)

Kyllästymissilmässä raudan alkeishiukkaset ovat järjestäytyneet ja vuon määrä ei enää kasva. Kuvassa 2 on vasemmalla rautamateriaalin magneettipartikkelit normaalissa olosuhteissa. Normaali olosuhde tarkoittaa tässä tapauksessa, että magneettisilta ominaisuuksiltaan rauta on neutraali. Kuvassa oikealla kyllästyminen on jo käynnissä. Kuten kuvasta huomataan, magneettipartikkelit ovat järjestyksessä. (Hietalahti 2011, 7.)



KUVA 2. Magneettipartikkelit (Hietalahti 2011, 7)

Tästä voidaan päätellä, että raudan kyllästymisrajalle asti on vain järkeä kasvattaa magneettivuota ja magneettivuon tiheyttä. Työssä käytettävän rautamateriaali R260 vuontiheys on noin 1,2-1,5 T ennen kuin se alkaa kyllästyä (Mehboob 2012, 113). Työssä ei mennä ollenkaan kyllästymisilmion rajalle, joten vuontiheyksien laskuissa raja-arvona on käytetty 1,2 T.

### 2.3.3 Magneettipiirin impedanssin laskenta

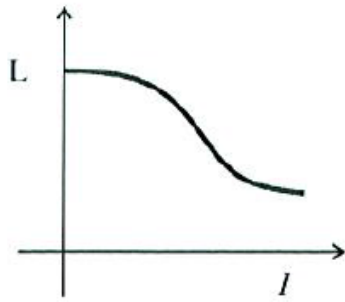
Työssä vaikuttavassa magneettipiirissä käämitys muodostaa impedanssin, joka on sekä resistiivinen että induktiivinen. Resistanssin suuruus määräytyy käytetystä johdinmateriaalista, johtimen poikkipinta-alasta ja johtimen pituudesta. Resistanssin laskentaa varten on kaava 8.

$$R = \rho \cdot \frac{l_{tot}}{A}, \quad (8)$$

missä  $\rho$  on resistiivisyys,  $l_{tot}$  on johtimen kokonaispituus ja  $A$  on johtimen poikkipinta-ala. Induktanssin laskeminen on melko yksinkertaista. Induktanssin laskentakaava on esitetty kaavassa 9.

$$L = N^2 \cdot \Lambda, \quad (9)$$

missä  $L$  on käämin induktanssi,  $N$  on käämin kierrosten lukumäärä ja  $\Lambda$  on aikaisemmin mainittu permeanssi. Kaavasta huomaamme, että induktanssi ei ole vakio vaan siihen vaikuttaa kyllästyminen. Kuvassa 3 on esitetty induktanssin arvon pieneneminen rautasydämisissä rakenteissa sen läpi ajettavan virran funktiona.



KUVA 3. Induktanssin arvon pieneneminen kyllästymisen vaikutuksesta (Hietalahti 2011,9)

Induktanssin ratkaisun jälkeen on mahdollista laskea piirin reaktanssin suuruus. Reaktanssi voidaan laskea kaavalla 10.

$$X_L = \omega \cdot L, \quad (10)$$

missä  $\omega$  on kulmataajuus ja  $L$  on induktanssi. Kulmataajuus on laskettavissa kaavan 11 mukaan.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f, \quad (11)$$

missä  $f$  on taajuus. Reaktanssin ja resistanssin laskemisen jälkeen on mahdollista ratkaista impedanssin suuruus. Impedanssin laskeminen onnistuu kaavalla 12.

$$Z = R + j \cdot X_L, \quad (12)$$

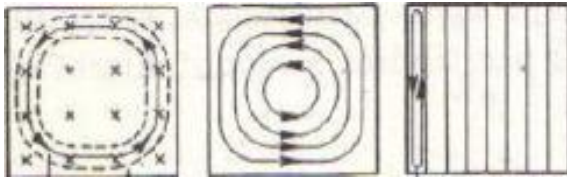
jossa  $Z$  on piirin impedanssi,  $R$  on piirin resistanssi,  $j$  on imaginääriyksikkö ja  $X_L$  on piirin reaktanssi.

## 2.4 Magneetti­piirin häviöt

Raudassa tapahtuvat häviöt muodostuvat kahdesta eri komponentista. Ensimmäinen komponentti on nimeltään hystereesihäviöt ja toinen on pyörrevirtahäviöt. Perehdytään ensin pyörrevirtahäviöihin, koska ne ovat työn kannalta keskeisemmässä roolissa.

### 2.4.1 Pyörrevirtahäviöt

Pyörrevirtahäviöt tavallisesti muodostuvat muuntajan rautasydämen sisällä. Työssämme pyörrevirtahäviöt tosin muodostuvat kiskon sisällä. Kuvassa 4 on esitetty rautasydämen poikkileikkauskuvia, missä magneettivuot näkyvät kuvassa vasemmassa reunassa. Magneettivuon vaihtelun seurauksena renkasiin syntyy sähkömotorinen voima renkaan sisäpuolella kulkevan vuon vaikutuksesta. Tällöin sähkömotorinen voima indusoi renkaaseen sähkövirran. Renkaan resistanssin ollessa  $R$ , kuluttaa se sähkötehoa.



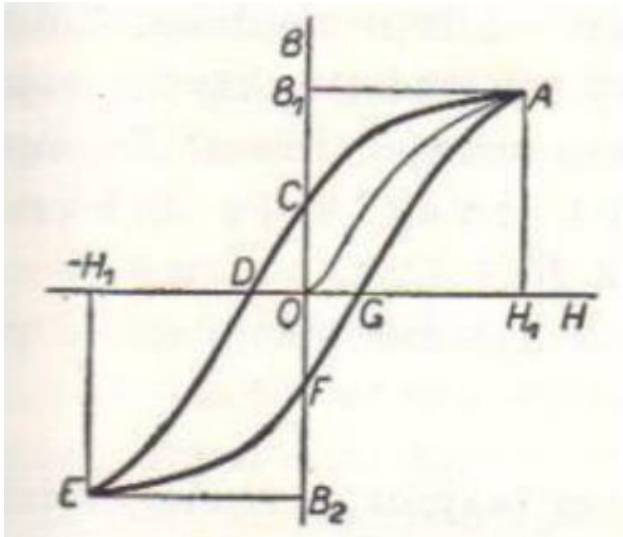
KUVA 4. Magneettivuo ja pyörrevirrat rautasydämessä (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2003, 103)

Yksinkertaisesti ajateltuna rautasydän sisältää renkaita, joissa kulkee magneettivuon vaihtelun synnyttämiä virtoja. Nämä virrat ovat esillä kuvassa 4 keskellä ja oikealla. Näitä virtoja kutsutaan pyörrevirroiksi ja niiden kuluttamaa tehoa pyörrevirtahäviöiksi. Pyörrevirtahäviöt muuttuvat lämmöksi. Tähän ideaan perustuu myös koko tämä työ. Yhden umpirautaisen kappaleen resistanssi ei ole niin suuri kuin muuntajien, joissa sydämet ovat tavallisesti rakennettu ohuista rautalevyistä. Muuntajien tarkoituksena onkin pienentää pyörrevirtoihin kuluva lämpöhäviötä. Tässä työssä toivomme, että kiskossa tapahtuva pyörrevirtahäviö olisi tarpeeksi suurta, jotta sillä voidaan lämmittää kiskoa.

### 2.4.2 Hystereesihäviöt

Hystereesi tarkoittaa ominaisuutta, joka hidastaa muutoksiin reagoimista tai estää paluun alkuperäiseen tilaan. Tässä tapauksessa hystereesillä tarkoitetaan ferromagneettisissa aineissa, kuten raudassa, esiintyvää ilmiötä, jossa aine jää magneettiseksi vielä senkin jälkeen kun magneettikenttä on lakannut vaikuttamasta. Hystereesihäviöt ovat riippuvaisia samoista suureista kuin pyörrevirtahäviötkin. Hystereesihäviöt muodostuvat vaihtovirran taajuudesta, magneettivuon tiheyden suurimmasta arvosta sekä raudan tyy-  
pistä.

Kuvassa 5 nähdään ns. hystereesikäyrä. Kuten kuvasta huomataan, hystereesikäyrästä nähdään magneettikentän voimakkuuden ja magneettivuon tiheyden vaihtelut. Magneetoimisen alkaessa magneettivuon tiheys nousee arvosta 0 arvoon  $B_1$  OA -käyrää pitkin. Muutoin magneettivuon tiheys kulkee käyriä AE ja EA pitkin. Näistä kahdesta viimeksi mainitusta käyrästä muodostuu silmukka, jota kutsutaan hystereesisilmukaksi.

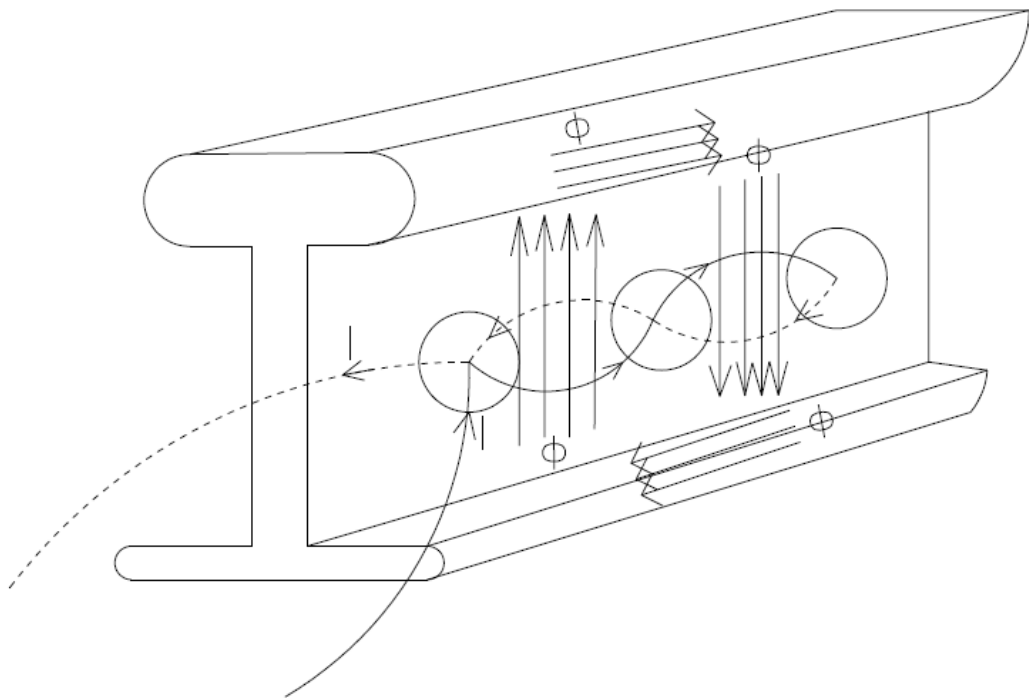


KUVA 5. Hystereesisilmukka. (Aro ym. 2003, 71)

### 3 LASKENTAMALLI

#### 3.1 Magneettiipiiri

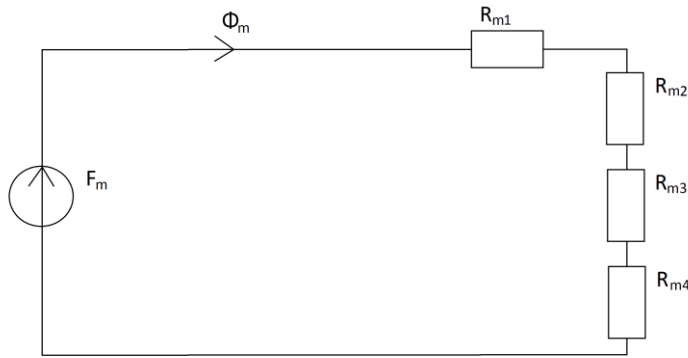
Laskentamallin muodostaminen aloitettiin magneettiipiirin hahmottamisella. Kiskossa on kolme reikää, joiden läpi vedetään kuparikäämiä kahdeksikkona. Virrallinen johdin aiheuttaa magneettiipiirin muodostumisen kiskoon. Kuvassa 6 on esillä, miten magneettivuo muodostuu kiskoon. Todellisuudessa magneettivuo ei käyttäydy täsmälleen kuvan 6 osoittamalla tavalla. Kuvassa 6 oletetaan sijaiskytkennän vuoksi magneettivuon kulkevan varresta hamaraan ja hamarasta jalan kautta takaisin varteen. Magneettivuo voi myös kulkea lyhyempää ja suorempaa reittiä. Esimerkkinä lyhyemmästä reitistä mainittakoon, että magneettivuo voi kulkea keskireiän ympäri pelkästään varren alueella. Sijaiskytkennässä tarkempi magneettiipiirin tarkastelu olisi näkynyt magneettivastusten määrän kasvulla. Laskentamallissa neljä magneettivastusta osoittautui sopivaksi määräksi.



KUVA 6. Magneettiipiirin muodostuminen rautatiekiskossa

Kuvan 6 ymmärryksen jälkeen muodostettiin magneettiipiirin sijaiskytkennän. Sijaiskytkentä on esillä kuvassa 7. Kuten kuvasta 7 voidaan huomata, magneettiipiirissä on yhteensä neljä magneettivastusta.





KUVA 7. Magneettiin sijaiskytkentä

Kuten aiemmin on jo kerrottu, magneettiin voidaan mallintaa virtapiirianalogialla, jossa vuo on virta, magneettivastus vastaa resistanssia ja magnetomotorinen voima vastaa lähdejännitettä. Jokainen sijaiskytkennässä esiintyvä vastus kuvaa magneettivuon läpäisemää kisko-osaa.

### 3.1.1 Magneettivastusten määrittäminen

Laskennassa jouduttiin olettamaan vain joku arvo kiskomateriaalin suhteelliselle permeabiliteetille, koska kyseinen arvo ei ollut tiedossa. Tein oletuksen, että suhteellinen permeabiliteetti olisi 4000.

Ensimmäinen magneettivastus sijoittuu ensimmäisen ja keskimmäisen reiän väliin. Magneettivuo muodostuu kyseiseen kohtaan, koska reikien väliin muodostuu virrallisesta johtimesta johdinsilmukka. Johdinsilmukasta ja oikean käden säännöstä voidaan päätellä että magneettivuo liikkuu alhaalta ylöspäin. Ensimmäisen magneettivastuksen ratkaisemiseen tarvitaan vielä magneettivuon pinta-ala neliömetreissä ja magneettivuon reitin pituus metreissä. Magneettivuon pinta-ala on sama kuin kiskon varren pinta-ala. Magneettivuon reitin pituus on sama kuin varren mitta pystysuunnassa. Kiskon profiilikuva on esitetty kuvassa 8.



Neljäs ja viimeinen magneettivastus sijaitsee kiskon jalassa. Toisen magneettivastuksen tavoin magneettivuo läpäisee myös jalan vaakasuunnassa, joten pinta-ala tulee laskea pystyssä. Jalan pinta-ala on epäsäännöllinen, mutta se voidaan jakaa suorakulmioon ja kolmioon. Näiden kahden alueen yhteenlaskettua alaa on käytetty alla olevassa laskussa:

$$R_{m4} = \frac{0,61 \text{ m}}{1,26 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 4000 \cdot 0,00273 \text{ m}^2} = 44243,5 \Omega$$

Kuvan 2 mukaisesti sijaiskytkennässä vastukset ovat sarjassa. Vastusten sarjakytkennän arvo on 84,2 kΩ.

### 3.1.2 Sähköiset ominaisuudet

Magneettivastusten määrittämisen jälkeen voidaan laskea vastusten sarjaankytkennän arvolla permeanssi, joka saadaan kaavalla 7. Permeanssin arvoksi saadaan kaavan 7 mukaisesti:

$$\Lambda = \frac{1}{84,2 \text{ k}\Omega} = 11,9 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{A}}$$

Permeanssin ratkaisun jälkeen voidaan laskea käämin induktanssi kaavalla 9. Laskentamallin ensimmäisessä versiossa oletimme, että kierroksia tulisi 100 kappaletta. Käytännössä kierroksia tuli kuitenkin vain 40 kappaletta. Haasteeksi muodostui keskimmäisen reiän suuruus. Laskin keskimmäisen reiän halkaisijan liian pieneksi. Tämä tosin osoittautui onnekaaksi virheeksi, sillä isompaa reikää ei olisi ollut mahdollista saada. Käämin induktanssiksi 40 kierroksella laskettiin kaavan 3 mukaisesti:

$$L = 40^2 \cdot 11,9 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{A}} = 19 \text{ mH}$$

Käämin induktanssin ratkaisun jälkeen voi laskea piirin reaktanssin suuruus. Reaktanssi voidaan laskea kaavoilla 10 ja 11. Reaktanssiksi saadaan kaavojen 10 ja 11 mukaan alla oleva laskentalauseke:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,019 \text{ H} = 5,97 \Omega$$

Piirissä on myös resistiivinen osa, joka muodostuu johtimen resistanssista. Määritetään ensin yhden johdinkahdeksikon pituus. Johdinkahdeksikko lasketaan laskemalla yhteen johtimen kulkemat matkat. Olen lisännyt 2 cm kiskon profiilikuvassa oleviin mittoihin, koska johdin ei mennyt käämittäessä aina lyhintä ja suorinta reittiä. Johdinkahdeksikko koostuu kahdeksasta osasta. Ensimmäinen osa on 32,3 cm pitkä ja siinä johdin kulkee ensimmäiseltä keskimmaiselle reiälle. Toinen osa on 1,65 cm pitkä ja muodostuu johtimen keskimmaisen reiän läpäisystä. Kolmannessa osassa johdin kulkee keskimmaiselta viimeiselle reiälle ja pituutta tulee 32,3 cm. Neljäs osa on jälleen reiän läpäisy. Tällä kertaa mennään viimeisen reiän läpi ja pituutta tulee 1,65 cm. Viidennessä osassa johdin tulee takaisin päin kiskon viimeiseltä reiältä keskimmaiselle. Johtimen kulkema matka on 32,3 cm. Kuudes osa on jälleen reiän läpäisy. Johdin kulkee 1,65 cm matkan. Keskimmaisen reiän läpäisyn jälkeen vuorossa on matka keskeltä kiskon ensimmäiselle reiälle. Matkaa tulee taas 32,3 cm. Viimeinen osuus muodostuu ensimmäisen reiän läpäisystä. Matkaa tulee johtimelle kuljettavaksi 1,65 cm. Johdinkahdeksikon pituudeksi siis saadaan:

$$l_{kahdeksikko} = \frac{(32,3+1,65+32,3+1,65+32,3+1,65+32,3+1,65) \text{ cm}}{100} = 1,36 \text{ m}$$

Seuraavaksi voidaan laskea johtimen kokonaismitta. Tämä onnistuu kertomalla yllä laskettu johdinkahdeksikon pituus kierrosten lukumäärällä. Kertolaskuun pitää muistaa lisätä termi, joka ottaa huomioon johtimen poistulon kiskolta ja syötölle. Tämän termin suuruus on 45 cm. Alla on laskettu johtimen kokonaispituus

$$l_{kok} = 40 \text{ kpl} \cdot 1,36 \text{ m} + 0,45 \text{ m} = 54,8 \text{ m}$$

Käytetty johdin oli 1,5 mm<sup>2</sup> kuparijohdinta. Kuparin resistiivisyys on 1,68·10<sup>-8</sup> Ω/m. Näillä tiedoilla voidaan laskea resistanssin suuruus käyttäen kaavaa 8. Sijoitetaan arvot kaavaan:

$$R = 1,68 \cdot 10^{-8} \frac{\Omega}{\text{m}} \cdot \left( \frac{54,8 \text{ m}}{1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} \right) = 0,61 \Omega$$

Resistanssin määrittämisen jälkeen voidaan laskea impedanssin arvo. Impedanssin laskeminen onnistuu kaavalla 12. Sijoittamalla arvot kaavaan 12 saadaan impedanssin arvoksi:

$$\underline{Z} = 0,61 + j5,97 = 6,0 \angle 84,1^\circ \Omega$$

Impedanssin ratkaisun jälkeen on mahdollista ratkaista piirin virta. Työssä tarkoituksena oli käyttää vaihejännitettä eli 230 V AC. Ratkaistaan piirin virta kaavalla 8.

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}}, \quad (13)$$

jossa  $\underline{U}$  on jännite ja  $\underline{Z}$  on piirin impedanssi. Sijoittamalla arvot virran laskentakaavaan saadaan virralle arvoksi

$$\underline{I} = \frac{230 \text{ V}}{(6,0 \angle 84,1^\circ) \Omega} = 38,3 \angle -84,1^\circ \text{ A}$$

Laskettu virta on aivan liian suuri, jotta johdin kestäisi sen. Joudutaan laskemaan jännitteen arvoa. Valitaan uudeksi jännitteen arvoksi 60 V, jolloin piirissä kulkisi 10 A virta.

Aikaisemmin lasketun virran suuruus aiheuttaisi myös sen, että magneettikentän voimakkuus olisi liian suuri. Magneettikentän voimakkuuden ollessa suuri olisi myös magneettivuon tiheys. Magneettivuon tiheyden ollessa liian suuri aiheuttaisi se kyllästymisilmiön. Aikaisemmin lasketulla virran arvolla olisi saatu magneettivuon tiheyden arvoksi kaavojen 1, 2, 3 ja 4 mukaisesti seuraava lasku.

$$B = \left( 4000 \cdot 1,26 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \right) \cdot \frac{40 \cdot 38,3 \text{ A}}{1,39 \text{ m}} = 5,5 \text{ T}$$

Kuten laskun tuloksesta huomataan, on magneettivuon tiheyden arvo reilusti yli kyllästymisrajan. Kyllästymisilmiön jälkeen pitäisi nostaa magnetoitintivirtaa kohtuuttoman paljon, jos haluaisi kasvattaa magneettivuota tai magneettivuon tiheyttä. Virran suuruus mittalaitteille voidaan rajoittaa mittamuuntajan käytöllä. Johtimen virrankestoisuus on 16 A, mutta mittalaitteiden ja sulakkeiden takia virta joudutaan kuitenkin rajoittamaan 5

A. Mittamuuntajan käytöllä kiskoon voidaan syöttää suurempaa virtaa ja mittamuuntajan toisioon sijoitetut mittalaitteet voivat silti suorittaa vaadittavat mittaukset.

Johtimessa kulkevan virran ratkaisemisen jälkeen voidaan laskea magnetomotorinen voima. Magnetomotorinen voima on ratkaistavissa kaavalla 1. Sijoittamalla jo aiemmin ratkaistut arvot kaavaan 1 saadaan magnetomotoriseksi voimaksi:

$$F_m = 40kpl \cdot 10 A = 400 A$$

Magneettikentän voimakkuus voidaan ratkaista, kun tiedossa on magnetomotorinen voima. Magneettikentän voimakkuuden laskeminen onnistuu kaavalla 2. Sijoitetaan vaaditut arvot kaavaan 2 ja tulokseksi saadaan:

$$H = \frac{400 A}{1,39 m} = 287,5 \frac{A}{m}$$

Magneettikentän voimakkuuden ratkaisemisen jälkeen voidaan laskea magneettivuon tiheys. Magneettivuon tiheys on laskettavissa kaavalla 3. Sijoitetaan jo aiemmin ratkaistut arvot kaavaan 3. Tulokseksi saadaan:

$$B = 1,26 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am} \cdot 4000 \cdot 287,5 \frac{A}{m} = 1,45 T$$

Magneettivuon tiheys on liian korkea. Kiskossa käytettävä R260 rautamateriaalin kylästymispiste on 1,2–1,5 T välillä. Magneettivuon tiheyden arvoa voidaan tiputtaa kahdella helpolla tavalla. Toinen vaihtoehto olisi kasvattaa kierroksia, mutta se ei tässä tapauksessa ole mahdollista. Jäljelle jäävä vaihtoehto on jännitteen ja sitä kautta virran pienentäminen. 45 V jännitteen arvolla virran arvoksi saadaan 7,50 A. Magnetomotoriseksi voimaksi tulisi tällöin 300 A. Magnetomotorisen voiman arvolla magneettikentän voimakkuus on 215,6 A/m. Magneettivuon tiheydeksi uusilla tiedoilla tulisi 1,08 T. Nyt magneettivuon tiheyden arvo ei ole liian suuri kun muistetaan, että työssä raja-arvona magneettivuon tiheyden laskuissa käytetään 1,2 T. Kyllästymisilmiötä ei pääse tapahtumaan.

Magneettivuon arvo on mahdollista ratkaista magnetomotorisen voiman ja magneettivastusten sarjaankytkennän arvolla. Magneettivuo on laskettavissa kaavalla 4. Sijoitetaan arvot kaavaan 4.

$$\phi = \frac{300 \text{ A}}{84,2 \text{ k}\Omega} = 3,56 \text{ mWb}$$

Magneettivuon arvo vaikuttaa suuruusluokaltaan sopivalta. Laskentamalli on esillä liitteessä 1.

## 4 MITTAUS

### 4.1 Mittausjärjestelyt

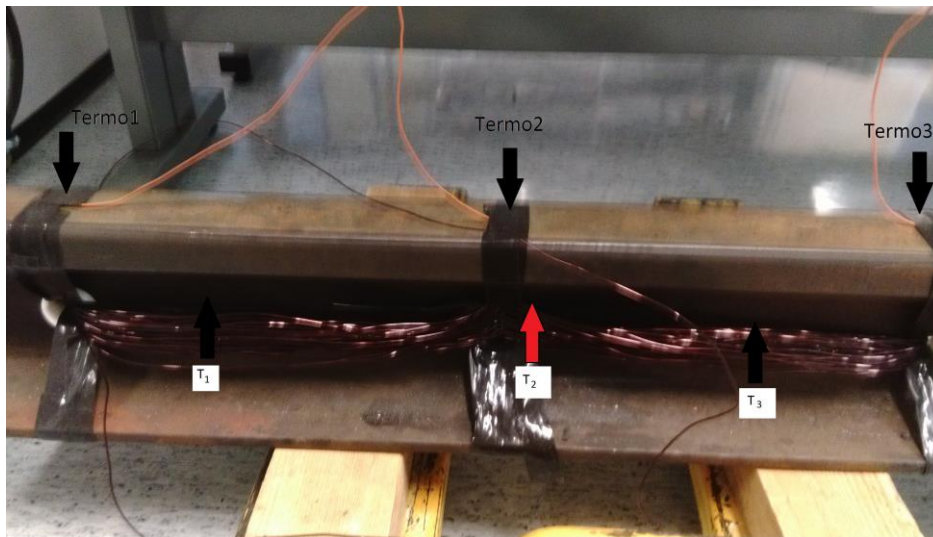
Mittauksia suoritettiin neljä kappaletta. Kahdessa mittauksessa virran arvo pidettiin 15 A:ssa ja kahdessa mittauksessa virran arvo laskettiin 10 A:han. Mittauksien kestot olivat 1h ja 4h, mittaukset suoritettiin molemmilla virran arvoilla. Tunnin mittauksessa otettiin mittausarvot 5 minuutin välein. Neljän tunnin mittauksessa mittausarvoja otettiin harvemmin, joka 20. minuutti.

Mittausten aikana mitattiin kiskossa kuluvaa pätötehoa sekä virran suuruutta. Pätötehoa mitattiin Ganzin HEWa tehomittarilla. Virran mittaus suoritettiin Fluke 189 – yleismittarilla. Näiden lisäksi mitattiin jännitteen suuruutta. Jännitteen mittaukseen käytettiin Fluke 87 IV – yleismittaria. Kiskosta mitattiin lämpötilaa kahdella eri tavalla kuudesta eri pisteestä. Kiskon päältä mitattiin lämpötila kolmesta eri kohdasta. Näihin mittauksiin käytettiin Fluke 87 V- yleismittaria ja K-tyypin termoparia. Kiskon varresta lämpötilaa mitattiin myös kolmesta kohdasta. Varren lämpötilan mittaukseen käytössä oli Fluke 61 infrapunalämpötilamittari.

Syöttönä käytettiin virtavaunua ja asettelualueena 0-70 V. Asettelualueen valinnalla virran maksimiarvoksi saatiin 25 A. Jännite mitattiin virtavaunun vaiheen L1 ja nollan N välillä. Virtavaunu oli suojaerotettu, minkä takia kiskoa ei tarvinnut erikseen maadoittaa. Virtavaunun vaihe L1 vietiin 5 VA mittamuuntajalle. Mittamuuntaja tarvittiin, koska virran arvo oli osassa mittauksissa yli 5 A. Tehon mittaukseen käytetty mittari ei olisi kestänyt yli 5 A virtaa ilman sulakkeen laukeamista. Mittamuuntajalla aseteluksi valittiin 2, joka tarkoittaa ensiön maksimivirraksi 20 A ja toision 5 A. Mittamuuntajan toisiossa olivat teho- ja virtamittaus. Mittamuuntajan ensiöstä jatkettiin kiskolle. Virtavaunun nolla N tuotiin suoraan kiskolle.

Kiskon päältä mitatut lämpötilan arvot mitattiin kolmesta eri pisteestä. Pisteet olivat kaikkien kolmen kiskossa olevan reiän yläpuolelta. Varressa olevat mittauspisteet sijaitsivat keskimmäisen ja vasemmassa reunassa olevan reiän noin puolessa välissä, keskimmäisen ja oikeassa reunassa olevan reiän noin puolessa välissä sekä keskimmäisen reiän yläpuolella. Kuvassa 9 on esillä kiskon lämpötilamittauksien paikat.





KUVA 9. Kiskossa suorittavien lämpötilamittausten paikat

Kuvassa 9  $T_{\text{TERMO1}}$  paikka on kuvan vasemmassa reunassa ja se on merkitty mustalla nuolella, joka osoittaa alaspäin.  $T_{\text{TERMO2}}$  paikka on kuvan keskellä ja sen paikkaa osoittaa myös musta alhaalle suuntautuva nuoli.  $T_{\text{TERMO3}}$  on kuvan oikeassa reunassa ja sen paikkaa osoitetaan mustalla alhaalle suuntautuvalla nuolella.  $T_1$  on paikassa, johon musta ylöspäin osoittava nuoli näyttää.  $T_2$  on paikassa, johon punainen ylöspäin osoittava nuoli näyttää.  $T_3$  on paikassa, johon musta ylöspäin osoittava nuoli näyttää.

## 4.2 Mittauksessa käytetyn laitteiston esittely

### 4.2.1 Työssä käytetty johdin

Työssä käytettiin  $1,54 \text{ mm}^2$  kuparijohdinta. Johtimen valmistaja on Dahréntråd ja tyyppi on DAMID 200. Johdin on suunniteltu kiinteään asennukseen asennusputkessa ja laitteiden sisäiseen johdotukseen. Johdin on suunniteltu kestämään jopa  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  lämpötila.

### 4.2.2 Fluke 189

Virran mittaukseen käytettiin otsikon ja kuvan 9 mukaista yleismittaria. Mittari mittaa virran tehollisarvoa lähettämällä pienen osan virrasta kulkemaan yleismittarin piirin läpi, joka koostuu vastuksesta. Vastus voi saada useita arvoja riippuen virran suuruudesta. Vastuksen mahdolliset arvot ovat  $500 \text{ } \Omega$ ,  $5 \text{ k}\Omega$ ,  $50 \text{ k}\Omega$ ,  $500 \text{ k}\Omega$ ,  $5 \text{ M}\Omega$ ,  $30 \text{ M}\Omega$ , ja  $500 \text{ M}\Omega$ .



KUVA 9. Fluke 189 -yleismittari

Mittari pitää olla sarjaankytketty ja oikeassa asteikossa. Mittaria ei suositella käytettäväksi yli 10 A pitkäaikaiseen virran mittaukseen virtapiirissä olevan sulakkeen takia. Alla olevassa taulukossa on esitelty yleismittarin nimelliset mittausvälit.

TAULUKKO 1. Fluke 189 – yleismittarin mittausrajat (Fluke)

Function	Ranges/Description
DC Voltage	0 to 1000V
DC Current	0 to 10A (20A for 30 seconds)
AC Voltage, True-rms	2.5 mV to 1000V - 100 kHz bandwidth
AC Current, True-rms	25 $\mu$ A to 10A (20A for 30 seconds)
Resistance	0 to 500 Mohms
Conductance	0 to 500 Nanosiemens
Capacitance	0.001 nF to 50 mF
Diode Test	3.1V
Temperature	-200°C to 1350°C (-328°F to 2462°F)
Frequency	0.5 Hz to 1000 kHz

Taulukosta käy ilmi seuraavat tiedot:

- mittarilla voidaan mitata tasajännitettä alueella 0-1000 V,
- tasavirtaa voidaan mitata välillä 0-10 A,
- vaihtojännitteen mittausväli on 2,5 mV:sta 1000 V:iin,
- vaihtovirran mittausväli on 25  $\mu$ A:sta 10 A:iin,
- konduktanssin arvo on resistanssin arvon mukaan välillä 0-500 nS,
- kapasitanssin mittausväli on 0,001 nF:sta 50 mF:iin,
- diodimittauksen maksimijännitteen arvo,
- lämpötila on mahdollista mitata välillä -200 °C ja 1350 °C
- taajuus on mahdollista mitata välillä 0,5 Hz ja 1000 kHz.

### 4.2.3 Ganz HEWa

Pätötehon mittaukseen käytettiin Ganzin valmistamaa HEWa tyyppistä tehomittaria. Mittarilla on mahdollista mitata vain yksivaiheista tehoa. Mittarin mitta-alue on lineaarisesti skaalattu valitun jännitealueen mukaan 120 W:iin asti. Valitun jännitealueen mukaan tulee todellisen tehon laskentaan vaadittava korjauskerroin. Mitattu teho korjauskertoimen tulona antaa todellisen tehon.

Käytössä olleen mittarin nimellinen virran kestoisuus on 5 A ja tarkkuusluokka on 0,5. Painoa mittarilla on noin 1,4 kg ja taajuusalue on 40 Hz:stä 400 Hz:iin. Mittarin suojaus on IEC 1010 ja EN 61010-1 luokan 2 mukainen. Kuvassa 10 on käytetty tehomittari. (HEWa.)



KUVA 10. Mittauksessa käytössä ollut tehomittari

### 4.2.4 Fluke 87

Mittauksessa käytössä oli kahta eri sarjaa kyseistä mittarista, IV- ja V-sarja. Käytännössä näillä kahdella mittarilla on eroa se, että uusi malli ratkaisee ongelmat tehokkaammin, on turvallisempi ja kestää paremmin iskuja. Ainoastaan V-sarjan mittaria voitiin käyttää lämpötilamittauksiin. IV-sarja ei ollut yhteensopiva käytössä olleiden K-tyypin termoparien kanssa. Kuvassa 11 on esillä molemmat käytössä olleet yleismittarit.



KUVA 11. Fluke 87 V- ja Fluke 87 IV- yleismittarit

Fluke 87 V – yleismittaria käytettiin lämpötilamittaukseen K-tyypin termoparien avulla. Termoparien avulla lämpötilaa voidaan mitata 260 °C asti. Mittarista voidaan valita käytettävä lämpötila-asteikko eli Celsius tai Fahrenheit. Mittauksessa käytettiin Celsius-asteikkoa.

Lämpötilan mittaus aloitettiin kytkemällä K-tyypin termopari yleismittarin COM- ja V-liittämiin. Kiertokytkin käännettiin lämpötilamittaukseen ja valittiin haluttu lämpötila-asteikko. Viimeisenä termopari sijoitettiin mitattavaan kohteeseen halutulle paikalle.

Termoparin lämpötilan mittaus perustuu lämpösähköiseen ilmiöön. Termoparissa on kahta eri metallia, K-tyypissä metallit ovat chromel ja alumel. Metallien liitokseen syntyy lämpötilan vaikutuksesta jännite-ero. Termoparin lämpötilaeron kasvaessa kasvaa myös niiden välinen jännite. Mitattava lämpötila saadaan määritettyä, kun tiedetään metalliparin jännitteen riippuvuus lämpötilasta. Kuvassa 12 on esillä mittauksessa käytössä ollut termopari. (Termopari 2015.)



KUVA 12. K-tyypin termopari

Fluke 87 IV – yleismittaria käytettiin jännitteen mittaukseen. Mittaria mitataan jännitettä siten, että se muodostaa 10 M $\Omega$  vastuksen. Mittari tulee kytkeä rinnan mitattavan piirin kanssa. Mitattava jännite saadaan tehollisarvona.

#### 4.2.5 Fluke 61

Infrapunalämpömittarilla voidaan mitata kohteen pintalämpötilaa. Infrapunalämpömittarin anturi mittaa kohteen lähettämää lämpösäteilyä. Lämpösäteilyä kutsutaan tästä syystä infrapunasäteilyksi. Lämpösäteily on näkyvää valoa pitkäaaltoisempaa sähkömagneettista säteilyä. Säteilyn voimakkuus ja aallonpituusjakauma riippuvat kappaleen lämpötilasta. (Infrapunalämpömittari)

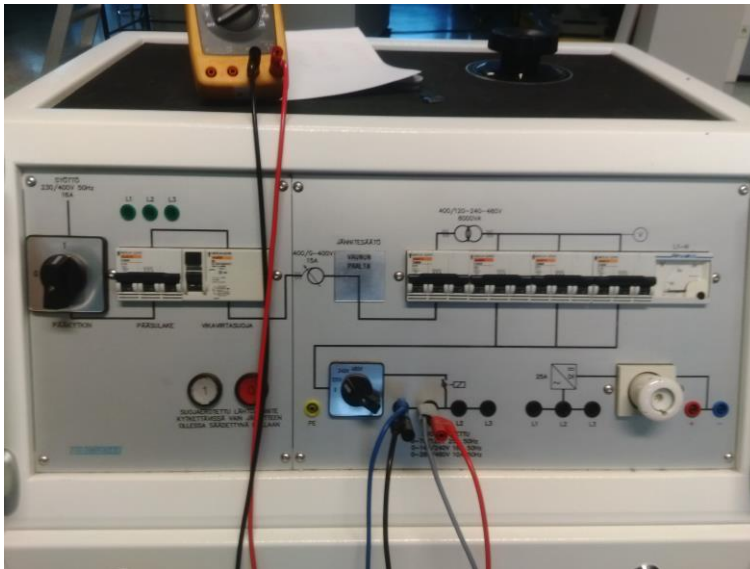
Mittarilla voidaan mitata luotettavasti lämpötilan arvoja välillä -18 - 275 °C. Työssä käytettiin Celsius-asteikkoa, minkä tarkkuus oli 0,2 °C. Itse mittarin käyttö oli todella yksinkertaista, sillä mittarissa on yksi nappi. Nappia painamalla aloitetaan mittaus ja napin painaluksen lopetuksella loppuu myös mittaus. Näytössä näkyy muutaman sekunnin ajan mitatun pinnan lämpötila. Kuvassa 13 on esillä käytetty infrapunamittari.



KUVA 13. Fluke 61 infrapunamittari

#### 4.2.6 Virtavaunu

Käytetyn virtavaunun valmistaja on Telemerkki Oy. Vaunussa on jännitesäätö, joka toteutetaan käsin pyöritettävällä vaunun päällä olevalla säätimellä. Syöttö toteutetaan voimavirtapistokkeella, joka toimii 50 Hz:llä, 16 A:lla ja tavallisella kotitalousjännitteellä eli 230/400 V.



KUVA 14. Työssä käytetty virtavaunu

Kuten kuvasta 14 on mahdollista huomata, vaunussa on suojalaitteina pääsulakkeet, vikavirtasuoja ja muuntajan jälkeen vielä lähdön suojana toiset sulakkeet. Vaunusta on mahdollista valita kolme eri jännitetasoa. Jännitetasot ovat 0-70/120 V, 0-140/240 V ja 0-250/480 V. Taajuus on kaikissa jännitetasoissa sama 50 Hz. Virran suuruus muuttuu aina jännitetasossa. Pienimmällä jännitetasolla on mahdollisuus 25 A virtaan. Suurimmalla jännitetasolla maksimivirran arvo on enää 10 A. Keskimmaisella jännitetasolla saadaan 16 A virta.

### 4.3 Mittaustulokset

Mittaukset aloitettiin tarkistamalla piirin laskettu impedanssin arvo. Laskemalla impedanssiksi oli saatu  $6 \Omega$ . Ensimmäisellä mittauskerralla kuitenkin huomattiin, että piirin impedanssi ei ole lasketun arvon mukainen. Piirin todelliseksi impedanssiksi voitiin laskea ensimmäisen mittauskokeilun perusteella noin  $2,2 \Omega$ . Impedanssin määrittäminen onnistui jakamalla käytetyn jännitteen arvo piirissä kulkevalla virralla. Impedanssin muutos johtuu joko kiskomateriaalin väärin arvioidusta suhteellisesta permeabiliteetistä tai magneettivuon kulkureitistä. Arvioitu suhteellinen permeabiliteetti oli 4000, mutta uusilla tiedoilla laskemalla suhteelliseksi permeabiliteetiksi saatiin noin 1500. Ratkaistu laskentamalli, kun suhteellinen permeabiliteetti on 1500, on esitetty liitteessä 2. Sijaiskytkennässä magneettivuon kulkureitti on kuvattu magneettivastusten avulla. Sijaiskytkennässä olleet neljä magneettivastusta eivät kuvanneet magneettivuon kulkureittiä tarpeeksi tarkasti. Jakamalla kisko useampaan osaan ja ratkaisemalla osien magneettivas-

tusten arvot olisi todennäköisesti saatu tarkempia laskentatuloksia liittyen magneettivas-  
tusten sarjaankytkennän arvoon ja sitä kautta permeanssiin ja reaktanssiin. Tarkempien  
laskentatuloksien avulla olisi onnistuttu ratkaisemaan impedanssi, joka olisi ollut lä-  
hempänä todellista impedanssia. Laskentamallia ei enää tässä vaiheessa lähdetty kor-  
jaamaan magneettivastuksien kohdalta. Laskentamalliin impedanssin muutos huomioi-  
ttiin suhteellisen permeabiliteetin arvon muuttamisella 1500.

Impedanssin pieneminen kolmasosaan oletetusta aiheutti ongelmia. Ennen piirin todelli-  
sen impedanssin ratkaisua oli syöttönä ajateltu käytettävän jännitevaunua, mutta jänni-  
tevaunussa maksimivirran arvo oli 10 A. Impedanssin pienentymistä jouduttiin kom-  
pensoimaan suuremmalla virralla kuin mitä aluksi oli suunniteltu. Jännitevaunu vaihtui  
virtavaunuun ja tällä muutoksella pystyttiin piiriin ajamaan suurempaa virtaa kuin 10 A.

#### 4.3.1 15 A:n mittaukset

Kaikista mittauksista otettiin mittausarvot samalla taulukkopohjalla. Taulukossa  $U$  tar-  
koittaa virtavaunulta mitattua jännitteen arvoa,  $I$  on mittamuuntajan toisiossa kulkevan  
virran suuruus,  $P$  on mittamuuntajan toisiossa mitattu teho.  $T_1$  on kiskon varresta kes-  
kimmäisen ja vasemman puoleisen reiän noin puolesta välistä mitattu lämpötila,  $T_2$  on  
kiskon varresta keskimmäisen reiän yläpuolelta mitattu lämpötila ja  $T_3$  on kiskon varres-  
ta keskimmäisen ja oikean puoleisen reiän noin keskivälistä mitattu lämpötila. Termopareissa järjestys on sama. Kiskon reunoissa sijaitsevat termoparit sijoitettiin suoraan  
reikien yläpuolelle.

Ensimmäisenä mittauksena suoritettiin yhden tunnin kestävä mittaus. Piirin ajettiin 15 A  
virtaa ja se pidettiin vakiona koko mittauksen ajan. Ennen mittauksen alkua mitattiin  
kiskon lämpötila kuudesta pisteestä. Tunnin mittauksessa mittausarvot otettiin 5 minu-  
tin välein. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Mittaustulokset, 60 minuuttia ja 15 A

U (V)	I (A)	P (W)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>termo1</sub> (°C)	T <sub>termo2</sub> (°C)	T <sub>termo3</sub> (°C)	t (min)	I <sub>laskettu</sub> (A)	P <sub>laskettu</sub> (W)	S (VA)	cos φ	
			19,8	19,8	19,8	19,8	19,4	19,4	19,0	0	0,0	0,0	0,0	0,00
34,8	3,7	21,0	28,2	35,0	27,6	21,7	26,5	21,7	5	14,9	420,0	518,5	0,81	
34,8	3,7	21,0	32,4	40,4	31,4	23,5	31,0	23,5	10	14,7	420,0	511,8	0,82	
35,5	3,7	22,0	36,2	46,0	34,2	26,0	36,1	25,9	15	15,0	440,0	531,5	0,83	
35,6	3,7	22,0	39,2	51,6	37,8	27,9	39,9	27,6	20	15,0	440,0	533,6	0,82	
35,6	3,7	22,0	42,4	53,8	40,0	29,6	43,2	29,2	25	14,9	440,0	532,0	0,83	
35,9	3,8	22,0	46,0	58,6	43,4	31,4	45,8	30,8	30	15,0	440,0	539,7	0,82	
35,9	3,7	22,0	47,4	60,8	46,0	33,1	48,6	32,2	35	15,0	440,0	538,2	0,82	
36,0	3,7	22,0	51,4	65,2	49,0	34,9	51,2	34,1	40	15,0	440,0	539,0	0,82	
35,9	3,7	22,0	53,6	66,6	51,2	36,4	53,5	35,6	45	14,9	440,0	536,6	0,82	
36,0	3,7	22,0	56,0	68,8	54,4	37,8	55,3	36,8	50	15,0	440,0	538,6	0,82	
36,1	3,7	22,0	57,4	70,4	56,6	39,0	56,8	37,9	55	14,9	440,0	538,9	0,82	
36,2	3,7	22,0	58,6	72,4	57,6	40,3	58,0	39,2	60	15,0	440,0	541,0	0,81	

Taulukossa esiintyvät  $I_{\text{laskettu}}$  ja  $P_{\text{laskettu}}$  ovat todelliset virran ja tehon arvot. Laskennallisissa arvoissa on huomioitava mittamuuntajan ja tehon korjauskertoimen vaikutus. Tehomittari oli asetettu 120 V asteikoille, josta saatiin korjauskertoimeksi 5. Mittamuuntajan alensi virran suuruuden neljäsosaan todellisesta. Mitattu virta kerrottiin neljällä, josta saatiin todellinen piirissä kulkeva virta. Tehon laskennassa tuli mitattu teho kertoa mittamuuntajan kertoimella ja tehomittarin korjauskertoimella.

Mittaustuloksista laskettiin myös mittauksen aikana kulunut sähköenergia, näennäisteho ja tehokerroin. Näennäisteho lasketaan kaavan 14 mukaisesti.

$$S = U \cdot I, \quad (14)$$

missä  $S$  on näennäisteho,  $U$  on jännite ja  $I$  on virta. Mittauksen aikaiset näennäistehon arvot on esitetty taulukossa 2. Näennäistehon avulla voidaan ratkaista tehokerroin. Tehokerroimen ratkaisukaava on esitetty kaavassa 15.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}, \quad (15)$$

missä  $\cos \varphi$  on tehokerroin,  $P$  on mittaustuloksissa laskettu todellinen pätöteho ja  $S$  on näennäisteho. Taulukossa 2 on esitetty mittauksen aikana olleet tehokertoimet. Tehokerroimen ollessa 1, piirissä kulkee vain pätötehoa. Työssä käsitellään piiriä, joka on induktiivinen. Piirin induktiivisuus johtuu käämityksestä, joten myös tehokertoimet ovat induktiivisia. Tehokertoimien ollessa induktiivisia tarkoittaa se, että piirissä jännite on virtaa edessä. Induktiivinen piiri aiheuttaa sen, että virtapiirissä on loistehoa. Loistehon



kasvaessa tarpeeksi suureksi täytyy se kompensoida. Loistehon kompensoitiin käytetään kapasitiivisia kondensaattoreita. Sähköenergian laskentakaava on esitetty kaavassa 16.

$$E_{sähkö} = P \cdot t \quad (16)$$

missä  $E_{sähkö}$  on sähköenergia,  $P$  on pätöteho ja  $t$  on aika tunneissa. Ensimmäisen mittauksen aikana sähkönkulutus oli siis kaavan 16 mukaisesti ratkaistavissa. Energian laskenta on esitetty alla.

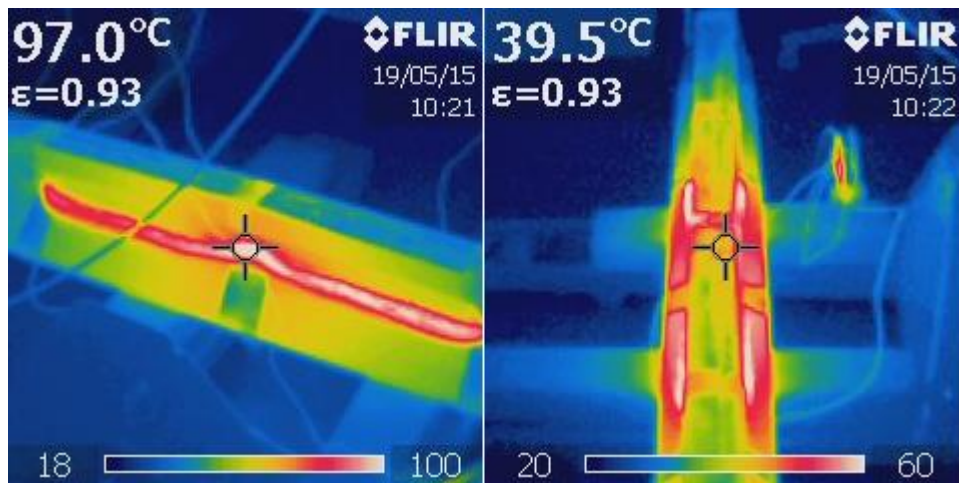
$$E_{sähkö} = 0,44 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h} = 0,44 \text{ kWh}$$

Sähkönkulutus on pientä, jos verrataan lämmityselementin sähkönkulutukseen. Lämmityselementin sähköinen teho oli 700–2300 W välillä ja metritehoa ne antavat 200–500 W. Sähkönkulutus koko elementillä on siis 0,7–2,3 kWh.

Mittaustuloksista huomaamme, että lämpötila kasvaa ensimmäisten 15 minuutin aikana todella rivakasti. Tämän jälkeen lämpötilan kasvu hidastuu hieman, mutta jatkaa kuitenkin kasvuaan. Viimeisen 20 minuutin aikana lämpötilan nousu on hidastunut jo selvästi alkuun verrattuna, mutta lämpötila jatkaa nousuaan vielä loppuvaiheessakin. Tunnin mittauksen aikana korkeimmaksi lämpötilan arvoksi kiskon päällä oli 58 °C. Lämpötilan nousua oli liki 40 °C. Kiskon varressa saavutettiin yli 70 °C lämpötila.

Huomioitavaa on, että huippulämpötilat saavutettiin kiskon keskellä olleissa pisteissä. Kiskon päällä reunoissa jäätiin jopa 20 °C päähän. Varressa lämpötilaerot eivät olleet ihan noin rajuja. Varressa eroa oli 15 °C. Kiskon päällä olevat lämpötilaerot voidaan selittää magneettivuon vähyydellä ja magneettivuon kulkureitillä.

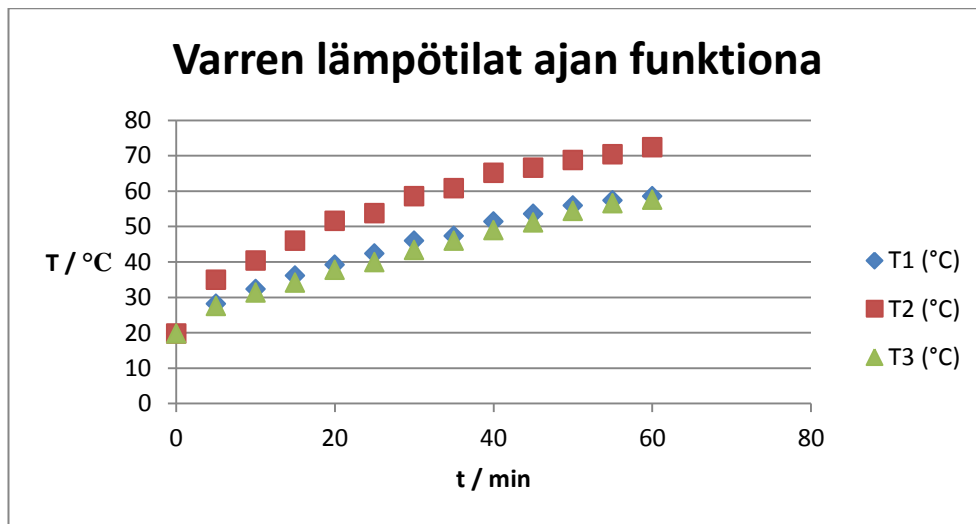
Kiskoa kuvattiin lämpökameralla ja lämpökamerasta saadut kuvat on esillä kuvassa 15. Kuvassa vasemmalla puolella on kiskon sivuprofiilista otettu lämpökuva. Kuvassa oikealla on kiskon yläpuolelta otettu lämpökuva.



KUVA 15. Lämpökameran kuvat

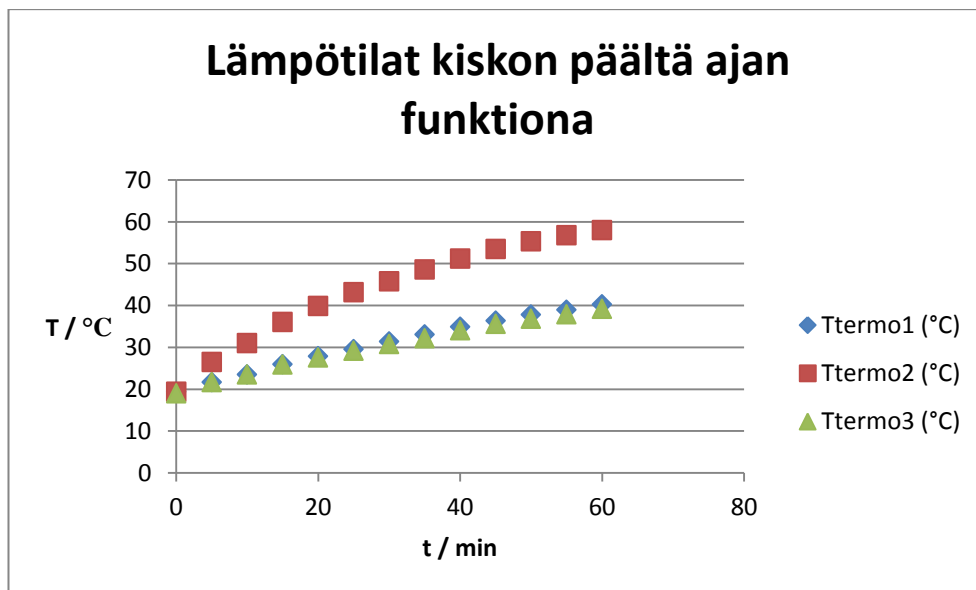
Kuvasta on hyvin huomattavissa lämmön jakautuminen kiskossa. Vasemman puoleista kuvaa katsottaessa huomataan, että kiskon varsi lämpiää melko tasaisesti. Keskireiän ympäryks on kuumempi kuin muut varren osat. Tämä on selitettävissä magneettivuon kulkureitillä. Magneettivuo näyttää hieman oikovan keskireiän tuntumassa. Koko magneettivuo ei jatka kiskon varresta hamaraan vaan menee lyhyempää reittiä kiskon vartta pitkin. Oikean puoleista kuvaa katsottaessa huomio kiinnittyy ensimmäisenä punaisiin osiin. Nämä osat kuuluvat kiskon varteen ja käämintään käytettyyn johtimeen. Aivan keskellä oikeassa kuvassa on myös punainen lämpöalue. Tämä on kiskon päällä ja suoraan keskireiän yläpuolella. Kiskon reunat ovat huomattavasti viileämpiä kuin keskiosa. Tämäkin voidaan selittää magneettivuon kulkureitillä. Magneettivuo ei näytä kulkevan kiskon reunoja pitkin vaan suosii lyhyempää ja suurempaa reittiä.

Mittaustulosten perusteella on piirretty kuviot 1 ja 2. Kuvioissa lämpötilat on esitetty ajan funktiona.



KUVIO 1. Kiskon varren lämpötilat ajan funktiona.

Kuvaajasta huomataan, että lämpötila kasvaa lineaarisesti ensimmäiset 30 minuuttia. Tämän jälkeen tapahtuu pieni notkahdus. 40 minuutin jälkeen kasvu hidastuu, mutta ei tämän mittauksen aikana lopeta kasvuaan.



KUVIO 2. Lämpötilat kiskon päältä ajan funktiona.

Kuvaaja 2 on liki identtinen kuvaajan 1 kanssa. Lämpötilan kasvu on kiskon päällä lineaarisesta ensimmäiset 30 minuuttia. Tämän jälkeen lämpötilan kasvu hidastuu, joka näkyy kuvaajassa vaakasuuntaisella tasoittumisella.

Toisena mittauksena oli tarkoitus suorittaa 4 h kestävä mittaus, mutta 3 h ja 40 minuutin jälkeen lämpötila ei enää kasvanut huomattavasti. Mittaus siis lopetettiin 220 minuutin

kohdalla. Tässä mittauksessa mittausravot otettiin ylös 20 minuutin välein, koska muuten mittauspisteitä olisi tullut paljon. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 3. Mittaustulokset, 220 minuuttia ja 15 A

U (V)	I (A)	P (W)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>termo1</sub> (°C)	T <sub>termo2</sub> (°C)	T <sub>termo3</sub> (°C)	t (min)	I <sub>laskettu</sub> (A)	P <sub>laskettu</sub> (W)	S (VA)	cos φ
			19,4	19,4	19,4	19,1	19,1	18,7	0	0,0	0,0	0,0	0
35,5	3,7	56,0	40,0	50,0	39,2	27,1	38,6	26,5	20	15,0	448,0	531,4	0,84
36,0	3,8	56,0	53,0	64,2	50,8	34,0	50,2	33,0	40	15,0	448,0	541,4	0,83
36,2	3,7	56,0	61,2	73,2	59,2	39,2	56,4	37,9	60	15,0	448,0	541,8	0,83
36,3	3,8	56,0	67,2	79,2	64,8	43,2	59,8	41,6	80	15,0	448,0	544,8	0,82
36,3	3,7	57,0	71,2	84,6	69,2	45,9	63,4	45,0	100	15,0	456,0	544,1	0,84
36,4	3,7	57,0	74,0	86,8	72,2	48,0	65,7	47,2	120	15,0	456,0	545,6	0,84
36,6	3,8	57,0	76,6	89,4	74,2	49,8	67,9	48,7	140	15,0	456,0	549,7	0,83
36,8	3,8	57,0	78,4	91,6	76,6	51,0	68,6	49,9	160	15,1	456,0	553,5	0,82
36,7	3,8	57,0	79,0	93,0	77,2	52,2	69,1	51,2	180	15,0	456,0	550,5	0,83
36,9	3,8	58,0	80,2	93,2	77,8	53,1	70,3	52,1	200	15,1	464,0	556,5	0,83
36,9	3,8	58,0	80,6	94,0	78,2	53,5	71,0	52,7	220	15,1	464,0	556,6	0,83

Tässä mittauksessa tehomittarin asteikkoa muutettiin 48 V eli korjauskertoimeksi saatiin 2. Tehomittarin asteikon muutoksella saatiin tarkempia tehon arvoja. Tehon laskennallisista arvoista on nähtävissä, että teho muuttuu hieman mittauksen edetessä. Tehon muutos johtuu siitä, että resistanssi on lämpötilariippuvainen. Lämpötilan kasvaessa myös resistanssin arvo kasvaa ja suuremmalla resistanssin arvolla kuluu suurempi määrä pätötehoa. Tehokerroin on mittauksen alussa suurimmillaan. Mittauksen edetessä tehokerroimen arvo tippuu hieman tarkoittaen, että näennäistehon määrä on kasvanut piirissä enemmän suhteessa pätötehoon. Näennäisteho koostuu pätötehosta ja loistehosta. Tästä voidaan päätellä, että loistehon määrä on kasvanut piirissä. Kaavan 16 mukaan voidaan laskea sähkönkulutus. Sähkönkulutukseksi koko mittauksen aikana saadaan 1,67 kWh. Edelleen jos laskettua arvoa verrataan lämmityselementtiin huomataan, että suuritehoisimmat lämmityselementit kuluttavat sähköä tunnissa enemmän kuin induktioperiaatteella toimiva lämmitin kuluttaa 3h 40 min aikana.

Mittaustuloksista huomaamme, että 60 minuutin jälkeen lämpötilat ovat melkein samat kuin ensimmäisessä mittauksessa. Lämpötilojen kasvu tähän pisteeseen asti on ollut samanlaista kuin ensimmäisessä mittauksessa. Seuraavan 60 minuutin aikana lämpötilan kasvu hidastuu huomattavasti. Kiskon varren reunoissa lämpötila kasvaa noin 13 °C kun edellisessä tunnissa kasvua tapahtui noin 40 °C.

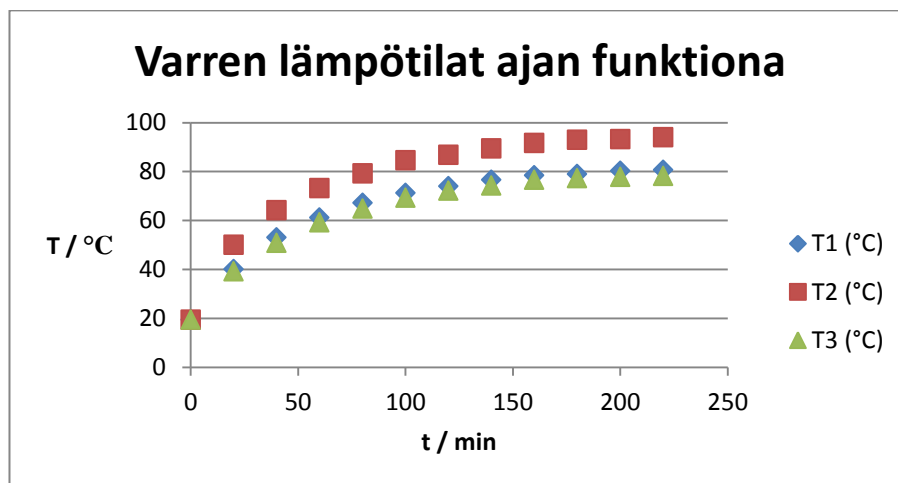
Kiskon päällä reunoissa lämpötila on kasvanut toisen tunnin aikana noin 8 °C. Ensimmäisen tunnin aikana kiskon päällä reunoissa lämpötila kasvoi noin 20 °C.

Kiskon keskellä lämpötila jatkaa myös nousuaan sekä varressa että kiskon päällä. Varren lämpötila onkin 120 minuutin jälkeen 86,8 °C. Kiskon päällä on saavutettu 65,7 °C lämpötila. Mittauspisteiden ero matkassa on noin 5 cm. Magneettivuon kulkureitti aiheuttaa valtavat lämpötilavaihtelut kiskon eri pisteissä. Kisko ei lämpeä paikoista, joissa magneettivuo ei kulje tai magneettivuon määrä on vähäinen.

180 minuutin mittauksen jälkeen kiskon varressa on melkein saavutettu 100 °C lämpötila. Varren reunoilla oli päästy liki 80 °C. Kiskon päällä kuitenkin nämä varren huimat lämpötilat eivät näy. Kiskon keskiosan päällä lämpötila on vaatimaton 69,1 °C. Lämpötilaeroa tulee jo 24 °C varren ja kiskon päällä olevien mittauspisteiden välillä. Reunoilla lämpötilaerot ovat vielä suuremmat.

Mittauksen viimeisissä 40 minuutissa lämpötila kasvoi todella minimaalisesti. Yleisesti lämpötilat nousivat noin 1 °C verran. Tällä teholla saavutettiin lämpötilan maksimiarvo. Lämpötilaa olisi voitu nostaa, jos olisi kasvatettu virran suuruutta. Pitemmän mittauksen perusteella kisko lämpeni oikein hyvin.

Lämpötiloista on piirretty kuviot 3 ja 4. Kuvioissa lämpötilat on esitetty ajan funktiona.



KUVIO 3. Kiskon varren lämpötilat ajan funktiona.

Kuviosta nähdään, että lämpötila nousee lähes lineaarisesti noin 100 minuuttia. Tämän jälkeen lämpötilan nousun kulmakerroin muuttuu. Nousu on nytkin lineaarista, mutta huomattavasti enemmän vaaka-akselin suuntaisesti. Kuvioista 1, 2, 3 ja 4 huomataan, että kuvaajat käyttäytyvät lämpenemäyhtälön mukaisesti. Lämpenemän yhtälö on esitetty kaavassa 17.

$$\theta(t) = (\theta_{\infty} - \theta_0) \left(1 - e^{-t/\tau}\right), \quad (17)$$

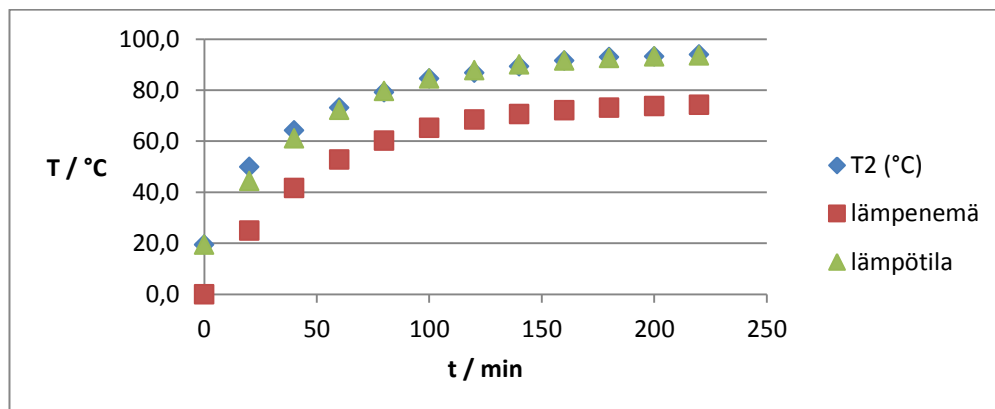
missä  $\theta(t)$  on lämpenemän arvo ajan hetkellä  $t$ ,  $\theta_{\infty}$  on loppulämpenemän arvo,  $\theta_0$  on lämpenemän arvo ajan hetkellä 0,  $t$  on kulunut aika sekunneissa ja  $\tau$  on lämpenemän aikavakio. Laskettiin kuvion 3 lämpenemän aikavakio ja loppulämpenemä. Ensimmäisenä muodostettiin yhtälöpari. Yhtälöparin ensimmäinen yhtälö muodostettiin kun aikaa oli mittauksessa kulunut 100 minuuttia ja toinen yhtälö muodostettiin ajan hetkestä 200 minuuttia. Yhtälöparissa lämpötiloina on käytetty kiskon varresta mitattua  $T_2$  lämpötilaa, josta on vähennetty alussa mitattu lämpötila. Yhtälöpari on esitetty alla.

$$\begin{cases} 65,2 \text{ °C} = \theta_{\infty} \left(1 - e^{-6000/\tau}\right) \\ 73,8 \text{ °C} = \theta_{\infty} \left(1 - e^{-12000/\tau}\right) \end{cases}$$

Yhtälöpari ratkaistiin ratkaisemalla ylemmästä yhtälöstä ensin loppulämpenemän kaava. Ratkaistu kaava sijoitettiin tämän jälkeen alempaan yhtälöön, josta saatiin aikavakio vastaukseksi. Tämän jälkeen ratkaistiin loppulämpenemän arvo. Vastaukset on esitetty alla.

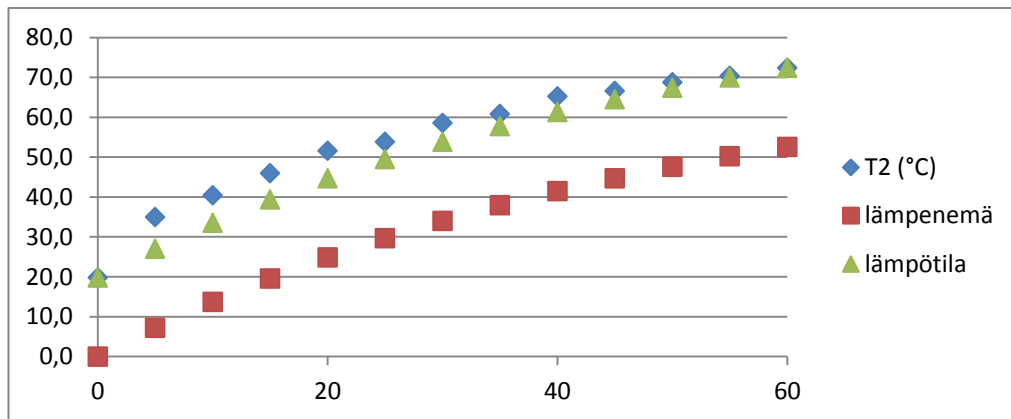
$$\begin{cases} \theta_{\infty} = 75,1 \text{ °C} \\ \tau = 49,4 \text{ min} \end{cases}$$

Tuloksien oikeellisuus voidaan varmistaa piirtämällä lämpenemäyhtälön tuloksien avulla kuvaaja ja vertaamalla sitä kuvion 3 kuvaajaan. Vertailukuvaaja on esitetty kuviossa 4.



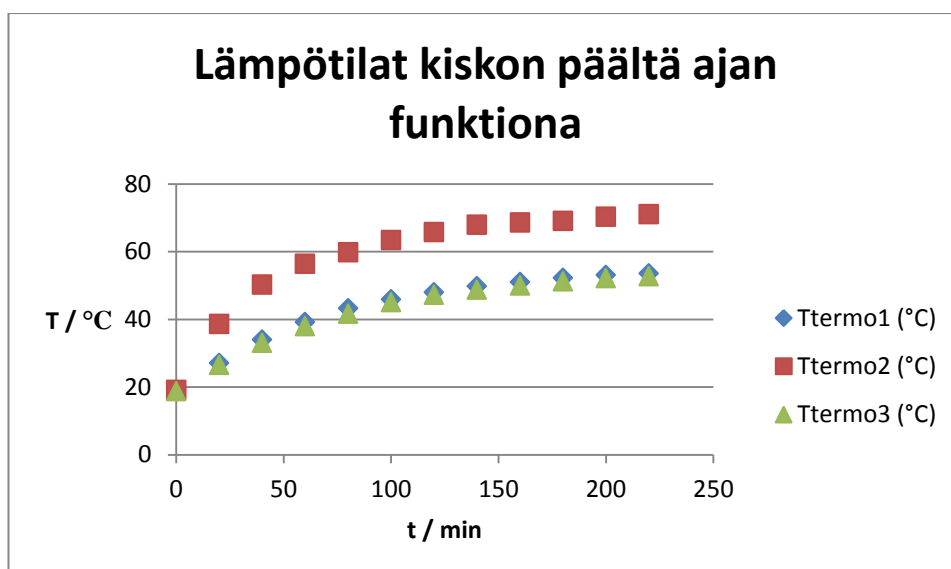
KUVIO 4. Lämpenemäyhtälön kuvaaja ja 220 minuutin mittauksen  $T_2$  kuvaaja

Kuvaajassa lämpenemä tarkoittaa lämpenemän kuvaajaa ilman alkulämpötilaa. Lämpötilakäyrässä alkulämpötila on otettu huomioon. Kuviosta 4 huomaamme, että lämpötilakäyrä ja  $T_2$ -käyrä ovat alussa hieman eroavaisia. Tämä voidaan selittää mittausvirheellä tai mittalaitteiden virheillä. Lopussa kuitenkin käyrät kulkevat päällekkäin. Laskettuja tuloksia voidaan täten pitää oikeina. Piirrettään kuvion 4 kaltaiset kuvaajat, mutta tällä kertaa 60 minuutin mittauksen varren  $T_2$  lämpötilatuloksilla. Kuvaajat on esitetty kuviossa 5.



KUVIO 5. Lämpenemäyhtälön kuvaaja ja 60 minuutin mittauksen  $T_2$  kuvaaja

Kuviosta 5 huomataan, että ero kuvaajien välillä on alussa enemmän kuin kuviossa 4. Kuvaajat kuitenkin tasoittuvat vaaka-akselin loppua kohden. Alun ero voidaan selittää mittausvirheellä tai mittalaitteiden virheellä. Eron suuruus ei ole kuin muutaman celsiusasteen suuruinen.



KUVIO 6. Lämpötilat kiskon päältä ajan funktiona.

Kuviosta nähdään jälleen, että lämpötilan kasvu on lähes lineaarista ensimmäiset 100 minuuttia. 100 minuutin jälkeen lämpötilan kasvu tasoittuu, kunnes lopussa se on jo liki vaakasuuntaista.



### 4.3.2 10 A:n mittaukset

Suoritettiin jälleen kaksi mittausta, ensimmäisen mittauksen kesto oli 60 minuuttia ja toisen 220 minuuttia. 60 minuutin mittauksen tulokset ovat esillä taulukossa 3.

TAULUKKO 4. Mittaustulokset, 60 minuuttia ja 10 A.

U (V)	I (A)	P (W)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>temo1</sub> (°C)	T <sub>temo2</sub> (°C)	T <sub>temo3</sub> (°C)	t (min)	I <sub>laskettu</sub> (A)	P <sub>laskettu</sub> (W)	S (VA)	cos φ
			19,4	19,4	19,4	18,9	19,0	18,6	0	0,0	0,0	0,0	0
23,1	2,5	23,0	22,2	25,2	22,2	19,7	21,5	19,6	5	10,0	184,0	230,6	0,80
23,3	2,5	24,0	25,2	29,2	24,6	20,8	24,1	20,7	10	10,0	192,0	233,4	0,82
23,2	2,5	24,0	26,6	30,6	25,6	21,6	26,0	21,4	15	10,0	192,0	231,0	0,83
23,3	2,5	24,0	28,8	34,0	27,4	22,4	27,7	22,2	20	10,0	192,0	232,1	0,83
23,4	2,5	24,0	29,8	35,6	29,4	23,5	29,4	23,0	25	10,0	192,0	233,7	0,82
23,3	2,5	24,0	31,0	36,4	30,6	24,2	30,8	23,8	30	10,0	192,0	232,7	0,82
23,4	2,5	24,0	32,2	38,6	32,2	25,1	32,1	24,6	35	10,0	192,0	232,9	0,82
23,4	2,5	24,0	34,0	39,4	32,8	25,8	33,2	25,3	40	10,0	192,0	232,9	0,82
23,4	2,5	24,0	34,8	40,6	34,2	26,5	34,3	25,8	45	10,0	192,0	233,3	0,82
23,5	2,5	24,0	36,4	43,0	34,6	27,3	35,4	26,6	50	10,0	192,0	235,0	0,82
23,6	2,5	24,0	37,0	43,2	36,0	27,7	36,1	27,2	55	10,0	192,0	236,0	0,81
23,6	2,5	24	37,8	44,2	37,2	28,4	36,8	27,6	60	10,0	192,0	236,0	0,81

Ensimmäisenä huomiona mittaustuloksista voidaan mainita tehon puolittuminen. Kiskossa kuluvan tehon huomattava pieneminen aiheuttaa sen, ettei lämpötilan kasvattamiseen ole käytössä yhtä suurta energiaa. Tämä on huomattavissa lämpötilamittausten perusteella sekä laskemalla sähkönkulutus. Sähkönkulutus voidaan laskea kaavalla 16.

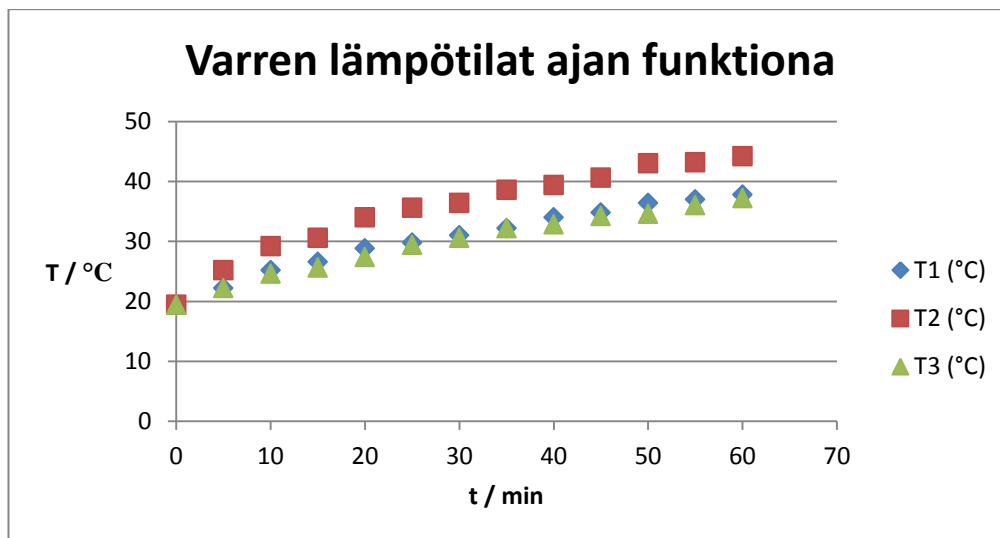
$$E_{\text{sähkö}} = 0,192 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h} = 0,192 \text{ kWh}$$

Sähkökulutuksia verratessa huomataan, että kulutus on alle puolet 15 A mittauksesta. Sähköenergian pienentyminen on helppo havaita. Kisko ei enää lämpene yhtä nopeasti kuin 15 A ja tämä olikin odotettavissa. Tehokerrointa tarkasteltaessa huomataan, että se on samansuuruinen kuin 15 A. Tehokerroimen tulisikin pysyä samana riippumatta virran pienoisesta muutoksesta.

Lämpötilaeroa 10 A ja 15 A mittauksissa tulee noin 10 °C kiskon päällä. Tunnin mittauksen perusteella tämä ei vielä kuulosta hirveän suurelta, mutta tästä voidaan tehdä oletuksia 220 minuutin mittausta varten. Pidemmissä mittauksissa lämpötilaero tulee olemaan huomattavasti suurempi.

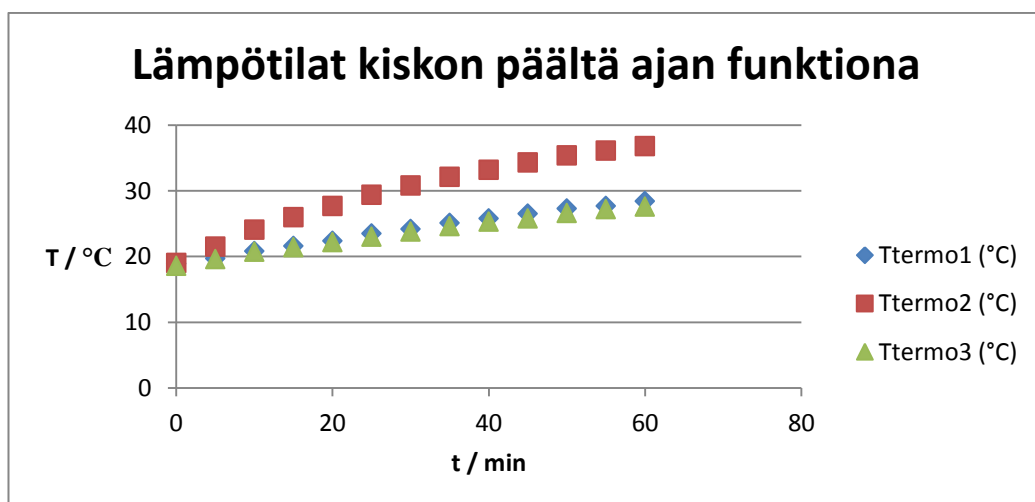
60 minuutin jälkeen kiskon varressa suurin lämpötila on alle 50 °C. Verrattuna 15 A mittaukseen eroa tulee noin 25 °C. Kiskon päältä mitattuja lämpötiloja tarkasteltaessa huomataan, että eroa tulee keskellä alle 10 °C verran.

Kiskon reunojen lämpötiloja tarkasteltaessa huomataan, että kiskon päällä ei saavuteta edes 30 °C lämpötilaa. Ero on merkittävä verrattuna 15 A mittaukseen. Kiskon varren reunoilla saavutetaan liki 40 °C lämpötila. Kiskon lämpötiloista on piirretty kuviot 5 ja 6. Kuvioissa lämpötilat on esitetty ajan funktiona.



KUVIO 7. Kiskon varren lämpötila ajan funktiona.

Lämpötilan kasvu on hyvin samanlaista kuin 15 A:n mittauksissa. Saavutetut lämpötila-arvot ovat vain huomattavasti pienempiä.



KUVIO 8. Lämpötilat kiskon päältä ajan funktiona.

Viimeisenä mittauksena suoritettiin 220 minuutin mittaus. Tässäkin mittauksessa virran arvo pidettiin vakiona 10 A:ssa. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 4.

TAULUKKO 5. Mittaustulokset, 220 minuuttia ja 10 A

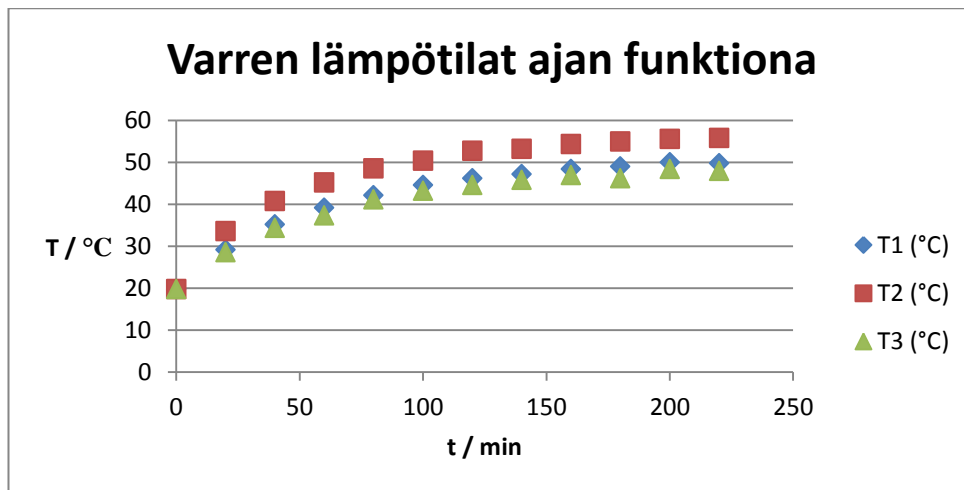
U (V)	I (A)	P (W)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>termo1</sub> (°C)	T <sub>termo2</sub> (°C)	T <sub>termo3</sub> (°C)	t (min)	I <sub>laskettu</sub> (A)	P <sub>laskettu</sub> (W)	S (VA)	cos φ
			19,8	19,8	19,8	19,5	19,6	19,1	0	0,0	0,0	0,0	0
23,2	2,5	23,0	29,2	33,6	28,6	23,0	28,4	22,6	20	10,0	184,0	230,9	0,80
23,4	2,5	24,0	35,2	40,8	34,4	26,2	33,7	25,4	40	10,0	192,0	234,4	0,82
23,5	2,5	24,0	39,2	45,2	37,4	28,6	37,0	27,8	60	10,0	192,0	235,2	0,82
23,5	2,5	24,0	42,2	48,6	41,2	30,8	39,2	30,0	80	10,0	192,0	235,0	0,82
23,4	2,5	24,0	44,6	50,4	43,2	32,4	41,0	31,8	100	10,0	192,0	233,5	0,82
23,6	2,5	24,0	46,2	52,8	44,6	33,7	42,5	33,1	120	10,0	192,0	236,2	0,81
23,6	2,5	24,0	47,2	53,2	45,8	34,7	43,5	33,9	140	10,0	192,0	236,6	0,81
23,6	2,5	24,0	48,4	54,4	47,0	35,3	44,1	34,4	160	10,0	192,0	235,6	0,81
23,6	2,5	24,0	49,0	55,0	46,2	35,9	44,7	35,4	180	10,0	192,0	236,0	0,81
23,6	2,5	24,0	50,0	55,6	48,4	36,4	44,8	35,7	200	10,0	192,0	236,3	0,81
23,6	2,5	24,0	49,8	55,8	48,0	36,8	45,6	36,1	220	10,0	192,0	235,6	0,81

Sähkönkulutus saadaan laskettua kaavalla 16. Sähkönkulutukseksi koko mittauksen aikana saadaan 0,7 kWh. Lämmityselementteihin verrattuna tämä vastaisi pienitehoisimman lämmityselementin tunnin sähkönkulutusta. Tehokerroin muuttuu hieman mittauksen aikana ja syy tähän on selvennetty aikaisemmin.

Mittaustuloksista huomaamme, että saavutetut loppulämpötilat ovat huomattavasti pienempiä kuin 15 A mittauksissa. Kiskon varren reunan lämpötiloissa jäädyään jopa 30 °C edellisestä mittauksesta. Kiskon varren korkein lämpötila jää yli 40 °C 15 A mittauksesta.

Kiskon päältä mitatut lämpötilat eivät myöskään kasva kovin suuriksi. 220 minuutin aikana lämpötilat tuplaantuivat. Aikaisemmassa 220 minuutin mittauksessa lämpötilat kolminkertaistuvat.

Kuten aiemminkin, lämpötiloista piirrettiin kuviot 9 ja 12. Kuvioissa lämpötilat on esitetty ajan funktiona.



KUVIO 9. Varren lämpötilat ajan funktiona

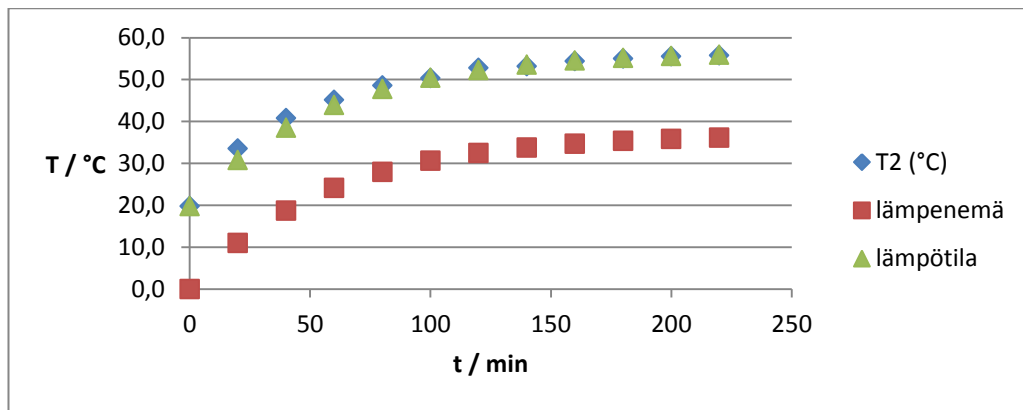
Lämpötilan kasvua tarkasteltaessa huomataan, että pyöristyminen kuvaajassa saavutetaan aikaisemmin kuin 15 A mittauksissa. Kuvaaja alkaa pyöristyä noin 80 minuutin kohdalla. Tämän jälkeen nousu on hyvin samanlaista kuin edellisissä mittauksissa. Lopussa kasvua ei juuri ole. Lasketaan lämpenemän aikavakio kiskon varren lämpötiloilla. Mittauksessa virran arvo on ollut 10 A ja mittauksen kesto on 220 minuuttia. Muodostetaan yhtälöpari. Ajan hetket ovat 100 minuuttia ja 200 minuuttia. Yhtälöpari on esitetty alla.

$$\begin{cases} 30,6 \text{ °C} = \theta_{\infty} (1 - e^{-6000/\tau}) \\ 35,8 \text{ °C} = \theta_{\infty} (1 - e^{-12000/\tau}) \end{cases}$$

Yhtälöpari ratkaistaan samalla lailla kuin aiemminkin. Yhtälöparin tulokset on esitetty alla.

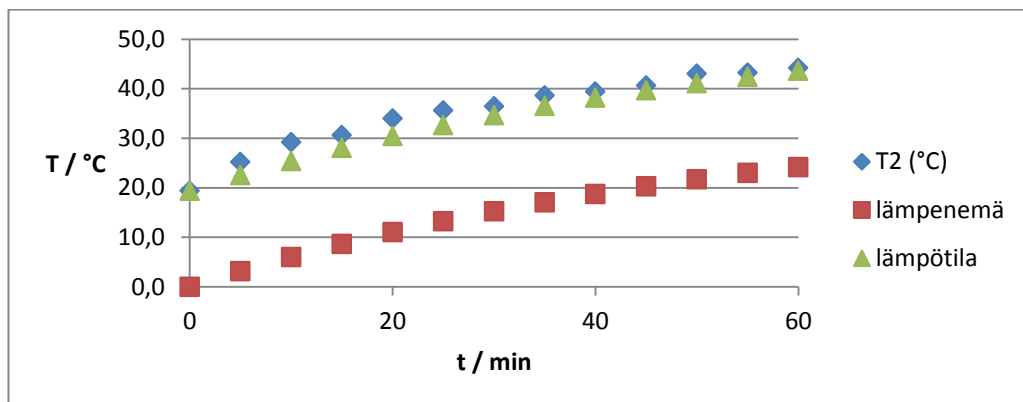
$$\begin{cases} \theta_{\infty} = 36,9 \text{ °C} \\ \tau = 56,4 \text{ min} \end{cases}$$

Tuloksien oikeellisuus voidaan varmistaa piirtämällä lämpenemäyhtälön tuloksien avulla kuvaaja ja vertaamalla sitä kuvion 9 kuvaajaan. Vertailukuvaaja on esitetty kuviossa 10.



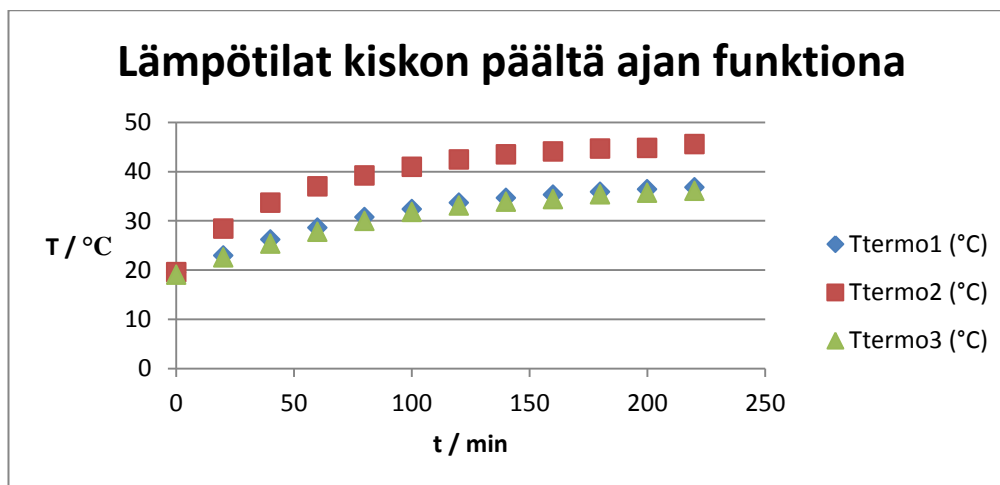
KUVIO 10. Lämpenemäyhtälön kuvaaja ja 220 minuutin mittauksen T<sub>2</sub> kuvaaja

Kuviosta 10 voidaan nähdä, että alussa on jälleen hyvin pientä virhettä. Lopussa kuvaajat ovat tasoittuneet ja kulkevat päällekkäin. Tuloksia voidaan pitää oikeina tämän kuvion perusteella. Piirretään samanlaiset kuvaajat, mutta 60 minuutin mittauksen lämpötiloilla. Kuviossa 11 on esitetty lämpenemäyhtälön kuvaaja ja 60 minuutin mittauksen varren lämpötila T<sub>2</sub> kuvaaja.



KUVIO 11. Lämpenemäyhtälön kuvaaja ja 60 minuutin mittauksen T<sub>2</sub> kuvaaja

Kuviosta 11 on huomattavissa, että kuvaajat kulkevat lopussa jälleen päällekkäin. Kuvaajien alussa on huomattavissa pientä eroa. Eron suuruus on noin 1 °C, joten siitä ei kannata tehdä liian kovia johtopäätöksiä. Ero voidaan selittää mittalaitteiden virheellä tai mittavirheellä. Lämpenemäyhtälön tuloksia voidaan pitää luotettavina.



KUVIO 12. Lämpötilat kiskon päältä ajan funktiona

Lämpötilan kasvu on samanlainen kuin kuviossa 7. Tässä kuviossa pyöristyminen ei erotu niin selkeästi kuin edellisessä, koska lämpötilavaihtelut ovat niin pieniä.

#### 4.4 Mallinnus 230 V tasoon

Kiskon lämmitys aikaisemmin esitetyllä jännitteellä aiheuttaisi suuria muutoksia rautateillä käytettyyn sähköverkkoon. Tästä syystä sovelletaan laskentamallia ja ratkaistaan piirin ominaisuudet 230 V jännitteellä. Liitteessä 3 on esillä laskentamalli, jolla on tehty mallinnus. Valitaan virran arvoksi työssäkin käytetty 10 A. Piirin impedanssi saadaan laskettua kaavalla 13.

Piirin impedanssiksi saadaan 23  $\Omega$ . Kuten tiedetään, impedanssi koostuu resistanssista ja reaktanssista. Helpoin tapa ratkaista kierrosten määrä oli laskentamallissa vaihtamalla kierrosluvun suuruutta eri lukuihin. Laskentamalli oli tehty siten, että kierroslukua muuttamalla se laskee suoraan resistanssin ja reaktanssin suuruuden. Laskentamalli osaa myös laskea impedanssin näistä kahdesta arvosta.

Kokeilemalla eri lukuja, ratkaistiin kierrosluvuksi 133. Resistanssin arvoksi saatiin 2,03  $\Omega$ . Resistanssin ratkaisuun tarvittava kokonaisuus ratkaistiin ja se sai arvon 181,1 m. Reaktanssin suuruudeksi tuli 23,1  $\Omega$ . Reaktanssin ratkaisuun vaadittava induktanssi oli ratkaistavissa kaavalla 9 ja induktanssin arvoksi saatiin 73,5 mH. Induktanssin laskemisen jälkeen reaktanssi oli ratkaistavissa kaavoilla 10 ja 11. Reaktanssi sai arvon 23,1  $\Omega$ . Impedanssi oli mahdollista ratkaista kaavalla 12. Tällä kierrosluvulla impedanssi sai siis arvon 23,2  $\Omega$ . Virran arvo oli tällöin 9,9 A.

Impedanssin ja sen osien ratkaisun jälkeen laskettiin magneettikentän voimakkuus. Magneettikentän voimakkuuden ratkaisun jälkeen oli mahdollista tarkistaa ettei magneettivuon tiheys ollut noussut liian suureksi. Magneettikentän voimakkuus saatiin ratkaistua kaavalla 2. Magneettikentän voimakkuuden arvo oli 948,4 A/m. Magneettikentän tiheys ratkaistiin tämän jälkeen kaavalla 3. Magneettikentän tiheydeksi saatiin 1,67 T. Magneettikentän tiheyden arvo on liian suuri kun jälleen muistetaan, että magneettivuon tiheyden raja-arvona pidettiin 1,2 T. Virran arvoa täytyy pienentää ja impedanssin arvoa vastaavasti kasvattaa.

Kasvatettiin kierrosten lukumäärää 190. Tarvittavan johtimen pituudeksi tuli 258,5 m. Johtimen kokonaispituuden ratkaisun jälkeen voidaan resistanssi ratkaista kaavalla 8. Resistanssin suuruudeksi saatiin 2,9  $\Omega$ . Resistanssin ratkaisemisen jälkeen voidaan siirtyä reaktanssin pariin. Ratkaistaan ensin induktanssi kaavalla 9. Induktanssi saa arvon 150,1 mH. Reaktanssi on nyt mahdollista laskea kaavoilla 10 ja 11. Reaktanssin arvoksi tuli 47,1  $\Omega$ . Tällä kierrosluvulla impedanssi saa arvon 47,2  $\Omega$ . Reaktanssin ja resistanssin arvoja katsoessa huomataan, että piiri on todella induktiivinen. Virtapiiriin syntyvän loisvirran ja loistehon torjuntaan voisikin ajatella kondensaattorin lisäämistä piiriin. Virran arvoksi tulisi lasketulla impedanssin arvolla 4,9 A.

Varmistetaan ettei, magneettivuon tiheys oli kyllästymisrajalla. Ensin lasketaan magneettikentän voimakkuus. Magneettikentän voimakkuudeksi saatiin 665,2 A/m. Nyt voidaan laskea magneettivuon tiheys. Kaavalla 3 ratkaistiin magneettivuon tiheyden arvoksi 1,17 T. Nyt täytyykin miettiä, että kyllästykö kiskomateriaali tällä magneettivuon tiheyden arvolla. Varmaan pistettä ei ole, jolla kyllästymisilmiö alkaa. Magneettivuon tiheyden arvo on pienempi kuin kirjallisuudessa esitetty 1,2 T. 230 V mallinnuksen laskentamalli on esitetty liitteessä 3.

## 5 POHDINTA

### 5.1 Arvio työn onnistumisesta

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia rautatiekiskon lämmittämistä induktioperiaatteella ja rakentaa oma lämmitin. Tarkoituksena oli kehittää vaihtoehtoinen toimiva lämmitysmenetelmä nykyisten lämmitysmenetelmien rinnalle. Lisäksi muodostettiin laskentamalli, jolla voitiin ratkaista kiskon magneettiipiirin eri komponenttien arvot. Laskentamallilla on mahdollista laskea myös virtapiirin arvot.

Työ voidaan arvioida onnistuneen hyvin. Laskentamalli osoittautui yllättävän hyväksi ja lasketut arvot vastasivat käytännön arvoja melko hyvin. Piirin impedanssin muutos korjattiin laskentamalliin suhteellisen permeabiliteetin muutoksella. Tämä ei ole paras ratkaisu. Laskentamalla tulisi parantaa magneettivastusten osalta vielä. Parametroitavia magneettivastuksia tulisi lisätä laskentamalliin. Magneettivastusten lisäämisellä saataisiin tarkempi tiedettyä mitä reittiä pitkin magneettivuo sulkeutuu. Laskentamallissa haasteita aiheutti rautatiekiskon ominaisuuksien puutteellinen tieto. Rautatiekiskosta oli helppo löytää tietoa, mutta kiskosta olemassa oleva tieto oli suunnattu enemmän junaratojen suunnittelijoille ja kiskoa valmistaville ihmisille kuin sähkövoimatekniikan opiskelijalle. Esimerkkinä mainittakoon suhteellinen permeabiliteetti ja kyllästymispiste.

Kiskon käämiminen oli todella työlästä. Käämintä saatiin vasta kolmannella kerralla ehjänä valmiiksi. Kääminnässä haasteiksi muodostuivat kiskon terävät reunat ja käämintäjohtimen ohuus. Johtimeen kahdella ensimmäisellä käämintäkerralla tuli nirhama. Kolmannella kerralla kiskon reikiin lisättiin kunnan pehmusteet ja tämä pienensi johtimelle suunnatun reiän kokoa. Reikien pienentyminen tarkoittikin, että kierroksia ei tullut niin paljoa kuin olisi haluttu. Kiskon käämintä on tärkeä kehityskohde, jotta kääminnästä saataisiin tehokkaampaa ja mielekkäämpää.

Kiskon sähkön kulutuksen pienuus oli yllätys tekijälle. Kiskon lämmitykseen vaadittava energia määrä pidemmissäkin mittauksissa oli vähäistä. Induktioperiaatteella kiskon lämmitys on huomattavasti energiatehokkaampaa kuin nykyisin käytössä olevilla lämmityselementeillä. Kiskon lämpenemän aikavakio ovat samoja suuruusluokkia kuin



oikosulkumoottoreilla. Aikavakiot ovat suuruusluokaltaan melko pieniä, mikä kertoo lämmityksen toimivan nopeasti. Kiskon nopealla lämpenemisellä aikaa jää olosuhteiden muutoksiin reagointiin.

Kiskon testaaminen ei tapahtunut työn alussa suunnitelluissa olosuhteissa. Alkuperäisenä tavoitteena oli testata kiskon lämpenemistä talven olosuhteissa. Tässä työssä ei siis käsitellä kiskon lumen tai jään sulatuskykyä. Viivästymistä aiheutti kääminta, joka vei huomattavasti enemmän aikaa kuin olin osannut arvioida. Laskentamallin valmistumisen viivästyminen hidasti myös testaamisen aloittamista. Viivästyksien takia kiskoa päästiin lämmittämään vasta huhtikuun lopulla. Mittaustulosten perusteella kiskon lämmitys induktioperiaatteella on toimiva ja mielenkiintoinen lämmitystapa.

## 5.2 Kehitysideat

Laskentamalli melko hyvällä mallilla, jos lasketaan yhtä kisko-osuutta. Pitempiin osuuksiin laskentamallia tulisi kehittää. Työssä ei huomioitu, että kiskossa kulkee junaradan sähköverkon paluuvirtapiirit, joten tämäkin tulisi ottaa huomioon. Laskentamallia voisi myös selkeyttää helpommin ymmärrettäväksi. Kuten aiemmin on todettu, laskentamalliin voisi lisätä parametroitavia magneettivastuksia, jotta magneettiipiiri tulisi mallinnettua tarkemmin.

Käämintää tulee kehittää huomattavasti ennen kuin edes voidaan ajatella massatuotantoa. Nykyisellään kääminta vie paljon aikaa ja koko ajan on vaara, että johdin pääsee vioittumaan. Käämintää varten voisi miettiä valmiiksi käämitettyjä osia, jotka vain liitetäisiin kiskoon. Kiskon suunnitteluvaiheessa voisi myös ottaa huomioon kääminnän tarvitsemat reiät. Reikien ollessa kiskossa valmiina valmistusvaiheessa, säästettäisiin yksi työvaihe kokonaan. Kiskoa ei tarvitsisi lähettää enää valmistusvaiheen jälkeen porattavaksi.

Kiskon lämpenemisen testaaminen talven olosuhteissa on myös kriittinen tehtävä. Testauksella selvittäisiin kiskon lämmityksen lumen ja jään sulatuskyky. Tässä työssä laskettu 230 V mallinnus tulisi myös testata. Mikäli mallinnus on onnistunut, säästäisi se huomattavilta muutoksilta junaradan sähköverkossa.

## LÄHTEET

Radanpidon sähkönkulutus. Raportti. Liikennevirasto. Luettu 10.2.2015

[http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/raportti\\_2011\\_radanpidon\\_sahkonkulutus\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/raportti_2011_radanpidon_sahkonkulutus_web.pdf)

Korpela, M. Vaihteen sähköiset lumsulatusjärjestelmät. Automaatioteknologia. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Luettu 10.2.2015

[http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/77663/Korpela\\_Mikko.pdf?sequence=2](http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/77663/Korpela_Mikko.pdf?sequence=2)

Ratakiskon elinkaari. Tiehallinto. Luettu 18.2.2015.

[http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf3/Its\\_2011-01\\_ratakiskon\\_elinkaari\\_web.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf3/Its_2011-01_ratakiskon_elinkaari_web.pdf)

Fagerholm, K. Uutta ajattelua vaihteenlämmitykseen. Rautatietekniikka 2/2013

Granlund, M. Rautatievaihteiden lämmitys maalämmöllä. Liikenteensuunta 2/2010

Liikennevirasto. B17:Vaihteenlämmityksen tekniset määreet. Luettu 13.3.2015

[http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk\\_b17\\_vaihteenlammituksen\\_tekniset\\_maareet.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk_b17_vaihteenlammituksen_tekniset_maareet.pdf)

Korpinen, L.Sähkömagnetismi. Luettu 15.3.2015

[http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/8sahkomagnetismi.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/8sahkomagnetismi.pdf)

PhysicsLAB. Amperen laki. Luettu 15.3.2015

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

Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere: Tammertekniikka

Mehboob, N. Hysteresis Properties of Soft Magnetic Materials. Wienin yliopisto.

Väitöskirja. Luettu 25.3.2015

[http://othes.univie.ac.at/22641/1/2012-09-10\\_0748726.pdf](http://othes.univie.ac.at/22641/1/2012-09-10_0748726.pdf)

Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K. & Palva, V. 2003. Suurjännitetekniikka. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Fluke. Tarkemmat tiedot 189:stä. Luettu 5.5.2015

<http://assets.fluke.com/datasheets/2153ExtSpecs.pdf>

Ganz Instruments. Tehomittari HEWa. Luettu 5.5.2015

<http://www.ganzinst.hu/wp-content/uploads/2013/05/HEWa-ab.pdf>

National Instruments. Termopari. Luettu 5.5.2015

<http://www.ni.com/white-paper/7108/en/>

Omega. Infrapunalämpömittari. Luettu 5.5.2015

<http://www.omega.com/prodinfo/infraredthermometer.html#learn>

## LIITTEET

Liite 1. Laskentamalli, kun suhteellinen permeabiliteetti on 4000

Magneettivastusten määrittäminen			
tyhjiön/ilman permeabiliteetti		$\mu_0$	1,26E-06 Vs/Am
käytetyn kiskomateriaalin suhteellinen permeabiliteetti		$\mu_r$	4000
<b>Ensimmäinen magneettivastus</b>		<b>Toinen magneettivastus</b>	
$R_m = l / (\mu_0 * \mu_r * A)$		$R_m = l / (\mu_0 * \mu_r * A)$	
pinta-ala varren magneettivuolle		pinta-ala hamaran magneettivuolle	
x	16,5 mm	x	72 mm
y	303 mm	y	51 mm
A	0,005 m <sup>2</sup>	A	0,003672 m <sup>2</sup>
magneettivuon reitin pituus (=varren mitta pystyssä)		magneettivuon reitin pituus (=hamara)	
$l_1$	89,5 mm	$l_2$	606 mm
$l_1$	0,0895 m	$l_2$	0,606 m
$R_{m1}$ arvoksi saadaan		joten $R_{m2}$ arvoksi saadaan	
$R_{m1}$	3561,6 $\Omega$	$R_{m2}$	32833,2 $\Omega$

Kolmas magneettivastus		Neljäs magneettivastus	
$R_m = l / (\mu_0 * \mu_r * A)$		$R_{m4} = l / (\mu_0 * \mu_r * A)$	
pinta-ala varren magneettivuolle.		pinta-ala jalan magneettivuolle	
		HUOM! Jalka voidaan jakaa 2 osaan, suorakulmioon ja kolmioon	
x	16,5 mm	x	150 mm
y	303 mm	y	11,5 mm
A	0,0049995 m <sup>2</sup>	A	0,001725 m <sup>2</sup>
magneettivuon reitin pituus (=varren mitta pystyssä)		kolmion ala = $(0,5 * x * y) / 1000000$	
$l_3$	89,5 mm	x	20 mm
$l_3$	0,0895 m	y	100 mm
$R_{m3}$ arvoksi saadaan		A	
$R_{m3}$	3561,6 $\Omega$	0,001 m <sup>2</sup>	
		Alat pitää vielä laskea yhteen	
		A	
		0,002725 m <sup>2</sup>	
		magneettivuon reitin pituus (=jalka)	
		$l_4$	606 mm
		$l_4$	0,606 m
		joten $R_{m4}$ arvoksi saadaan	
		$R_{m4}$	44243,5 $\Omega$

<b>Magneettivuon reitin pituus</b>			
$I_{tot}=I_1+I_2+I_3+I_4$			
$I_{tot}$	1,39	m	
<b>Magneettivastusten sarjaankytkennän arvo</b>			
$R_{mtot}=R_{m1}+R_{m2}+R_{m3}+R_{m4}$			
$R_{mtot}$	84199,7	$\Omega$	
<b>Permeanssin laskenta</b>			
$\Lambda=1/R_{mtot}$			
$\Lambda$	0,000012	Vs/A	
<b>Käämin induktanssin laskenta</b>			
$L=N^2*\Lambda$			
reiän koko rajoittaa kierrokset!			
N	40	kierrosta	
L	0,0190	H	
L	19	mH	
<b>Reaktanssi</b>			
$wL(=2*\pi*i*f*L)$			
$X_L$	5,97	$\Omega$	f = 50 Hz
<b>Resistanssi</b>			
johtimen pituus			
määritetään ensin yhden johdinkahdeksikon pituus			
$l_r$	1,36	m	
Kokonaismitta			
(pitää ottaa huomioon että, johdin tulee poisikin kiskolta eli lisätä termi 45 cm			
$l_{tot}$	54,77	m	
johtimen poikkipinta-ala			
A	1,5	mm <sup>2</sup>	
A	1,5E-06	m <sup>2</sup>	
Kuparin resistiivisyys			
$\rho$	1,68E-08	$\Omega*m$	
$R=\rho*(l/A)$			
R	0,613	$\Omega$	
<b>impedanssi Z</b>			
tunnetusti $Z=R+jX_L$ ja $Z=(R^2+X_L^2)^{0,5}$			
	R		$X_L(=2*\pi*i*f*L)$
Z	0,613	+j	5,97
Z	6,00	$\Omega$	
<b>piirin virta I</b>			
$I=U/Z$			
I	10,00	A	U = 60 V

<b>Magnetomotorinen voima</b>	
$F_m$	399,9 A
<b>Magneettikentän voimakkuus</b>	
H	287,5 A/m
<b>Magneettivuon tiheys</b>	
$B=\mu_0*\mu_r*H$	
B	1,45 T
Kyllästymispiste 1,2 - 1,5 T	
<b>Magneettivuo</b>	
$\Phi=F_m/R_{mtot}$	
$\Phi$	0,00475 Wb
$\Phi$	4,75 mWb

## Liite 2. Laskentamalli, kun suhteellinen permeabiliteetti on 1500

<b>Magneettivastusten määrittäminen</b>					
tyhjiön/ilman permeabiliteetti		$\mu_0$	1,26E-06	Vs/Am	
käytetyn kiskomateriaalin suhteellinen permeabiliteetti		$\mu_r$	1500		
<b>Ensimmäinen magneettivastus</b>		<b>Toinen magneettivastus</b>			
$R_{m1} = l / (\mu_0 * \mu_r * A)$		$R_{m2} = l / (\mu_0 * \mu_r * A)$			
pinta-ala varren magneettivuolle		pinta-ala hamaran magneettivuolle			
x	16,5 mm	x	72 mm		
y	303 mm	y	51 mm		
A	0,005 m <sup>2</sup>	A	0,003672 m <sup>2</sup>		
magneettivuon reitin pituus (=varren mitta pystyssä)		magneettivuon reitin pituus(=hamara)			
$l_1$	89,5 mm	$l_2$	606 mm		
$l_1$	0,0895 m	$l_2$	0,606 m		
$R_{m1}$ arvoksi saadaan		joten $R_{m2}$ arvoksi saadaan			
$R_{m1}$	9497,5 $\Omega$	$R_{m2}$	87555,1 $\Omega$		
<b>Kolmas magneettivastus</b>		<b>Neljäs magneettivastus</b>			
$R_{m3} = l / (\mu_0 * \mu_r * A)$		$R_{m4} = l / (\mu_0 * \mu_r * A)$			
pinta-ala varren magneettivuolle.		pinta-ala jalan magneettivuolle			
		HUOM! Jalka voidaan jakaa 2 osaan, suorakulmioon ja kolmioon			
x	16,5 mm	x	150 mm		
y	303 mm	y	11,5 mm		
A	0,0049995 m <sup>2</sup>	A	0,001725 m <sup>2</sup>		
magneettivuon reitin pituus(=varren mitta pystyssä)		kolmion ala=(0,5*x*y)/1000000			
$l_3$	89,5 mm	x	20 mm		
$l_3$	0,0895 m	y	100 mm		
$R_{m3}$ arvoksi saadaan		A			
$R_{m3}$	9497,5 $\Omega$	0,001 m <sup>2</sup>			
		Alat pitää vielä laskea yhteen			
		A			
		0,002725 m <sup>2</sup>			
		magneettivuon reitin pituus(=jalka)			
		$l_4$	606 mm		
		$l_4$	0,606 m		
		joten $R_{m4}$ arvoksi saadaan			
		$R_{m4}$	117982,6 $\Omega$		

<b>Magneettivuon reitin pituus</b>			
$I_{tot}=I_1+I_2+I_3+I_4$			
$I_{tot}$	1,39	m	
<b>Magneettivastusten sarjaankytkennän arvo</b>			
$R_{mtot}=R_{m1}+R_{m2}+R_{m3}+R_{m4}$			
$R_{mtot}$	224532,6	$\Omega$	
<b>Permeanssin laskenta</b>			
$\Lambda=1/R_{mtot}$			
$\Lambda$	0,000004	Vs/A	
<b>Käämin induktanssin laskenta</b>			
$L=N^2*\Lambda$			
reiän koko rajoittaa kierrokset!			
N	40	kierrosta	
L	0,0071	H	
L	7,1	mH	
<b>Reaktanssi</b>			
$\omega L(=2*\pi*i*f*L)$			
$X_L$	2,24	$\Omega$	f 50 Hz
<b>Resistanssi</b>			
johtimen pituus			
määritetään ensin yhden johdinkahdeksikon pituus			
$l_r$	1,36	m	
Kokonaismitta			
(pitää ottaa huomioon että, johdin tulee poisikin kiskolta eli lisätä termi 45 cm			
$l_{tot}$	54,77	m	
johtimen poikkipinta-ala			
A	1,5	mm <sup>2</sup>	
A	1,5E-06	m <sup>2</sup>	
Kuparin resistiivisyys			
$\rho$	1,68E-08	$\Omega*m$	
$R=\rho*(l/A)$			
R	0,613	$\Omega$	

<b>impedanssi Z</b>			
tunnetusti $Z=R+jX_L$ ja $Z=(R^2+X_L^2)^{0,5}$			
	R		$X_L(=2*\pi*i*f*L)$
Z	0,613	+j	2,24
Z	2,32	$\Omega$	
<b>piirin virta I</b>			
$I=U/Z$		U	34,81 V
I	15,00	A	

<b>Magnetomotorinen voima</b>	
$F_m$	599,9 A
<b>Magneettikentän voimakkuus</b>	
H	431,2 A/m
<b>Magneettivuon tiheys</b>	
$B=\mu_0*\mu_r*H$	
B	0,81 T
Kyllästymispiste 1,2 - 1,5 T	
<b>Magneettivuo</b>	
$\Phi=F_m/R_{mtot}$	
$\Phi$	0,00267 Wb
$\Phi$	2,67 mWb

## Liite 3. Laskentamalli, mallinnus 230 V

<b>Magneettivastusten määrittäminen</b>								
tyhjiön/ilman permeabiliteetti			$\mu_0$	1,26E-06	Vs/Am			
käytetyn kiskomateriaalin suhteellinen permeabiliteetti			$\mu_r$	1500				
<b>Ensimmäinen magneettivastus</b>				<b>Toinen magneettivastus</b>				
$R_{m1} = l / (\mu_0 * \mu_r * A)$				$R_{m2} = l / (\mu_0 * \mu_r * A)$				
pinta-ala varren magneettivuolle				pinta-ala hamaran magneettivuolle				
x	16,5	mm	x	72	mm			
y	303	mm	y	51	mm			
A	0,005	m <sup>2</sup>	A	0,003672	m <sup>2</sup>			
magneettivuon reitin pituus (=varren mitta pystyssä)				magneettivuon reitin pituus(=hamara)				
$l_1$	89,5	mm	$l_2$	606	mm			
$l_1$	0,0895	m	$l_2$	0,606	m			
$R_{m1}$ arvoksi saadaan				joten $R_{m2}$ arvoksi saadaan				
$R_{m1}$	9497,5	$\Omega$	$R_{m2}$	87555,1	$\Omega$			
<b>Kolmas magneettivastus</b>				<b>Neljäs magneettivastus</b>				
$R_{m3} = l / (\mu_0 * \mu_r * A)$				$R_{m4} = l / (\mu_0 * \mu_r * A)$				
pinta-ala varren magneettivuolle.				pinta-ala jalan magneettivuolle				
x	16,5	mm	x	150	mm			
y	303	mm	y	11,5	mm			
A	0,0049995	m <sup>2</sup>	A	0,001725	m <sup>2</sup>			
magneettivuon reitin pituus(=varren mitta pystyssä)				kolmion ala=(0,5*x*y)/1000000				
$l_3$	89,5	mm	x	20	mm			
$l_3$	0,0895	m	y	100	mm			
$R_{m3}$ arvoksi saadaan				A				
$R_{m3}$	9497,5	$\Omega$	Alat pitää vielä laskea yhteen		0,002725 m <sup>2</sup>			
				magneettivuon reitin pituus(=jalka)				
				$l_4$		606 mm		
				$l_4$		0,606 m		
				joten $R_{m4}$ arvoksi saadaan				
				$R_{m4}$		117982,6 $\Omega$		

<b>Magneettivuon reitin pituus</b>			
$l_{tot}=l_1+l_2+l_3+l_4$			
$l_{tot}$	1,39	m	
<b>Magneettivastusten sarjaankytkennän arvo</b>			
$R_{mtot}=R_{m1}+R_{m2}+R_{m3}+R_{m4}$			
$R_{mtot}$	224532,6	$\Omega$	
<b>Permeanssin laskenta</b>			
$\Lambda=1/R_{mtot}$			
$\Lambda$	0,000004	Vs/A	
<b>Käämin induktanssin laskenta</b>			
$L=N^2*\Lambda$			
$N$	190	kierrosta	
$L$	0,1608	H	
$L$	160,8	mH	
<b>Reaktanssi</b>			
$wL(=2*\pi*f*L)$			
$X_L$	50,51	$\Omega$	f = 50 Hz
<b>Resistanssi</b>			
johtimen pituus			
määritetään ensin yhden johdinkahdeksikon pituus			
$l_r$	1,36	m	
Kokonaismitta			
(pitää ottaa huomioon että, johdin tulee poisikin kiskolta eli lisätä termi 45 cm			
$l_{tot}$	258,47	m	
johtimen poikkipinta-ala			
$A$	1,5	mm <sup>2</sup>	
$A$	1,5E-06	m <sup>2</sup>	
Kuparin resistiivisyys			
$\rho$	1,68E-08	$\Omega*m$	
$R=\rho*(l/A)$			
$R$	2,895	$\Omega$	

<b>impedanssi Z</b>			
tunnetusti $Z=R+jX_L$ ja $Z=(R^2+X_L^2)^{0,5}$			
	R		$X_L(=2*\pi*f*L)$
Z	2,895	+j	50,51
Z	50,59	$\Omega$	
<b>piirin virta I</b>			
$I=U/Z$		U	230 V
I	4,55	A	

<b>Magnetomotorinen voima</b>	
$F_m$	863,8 A
<b>Magneettikentän voimakkuus</b>	
H	621,0 A/m
<b>Magneettivuon tiheys</b>	
$B=\mu_0*\mu_r*H$	
B	1,17 T
Kyllästymispiste 1,2 - 1,5 T	
<b>Magneettivuo</b>	
$\Phi=F_m/R_{mtot}$	
$\Phi$	0,00385 Wb
$\Phi$	3,85 mWb