

Saku Aspelin

Sähkökomponenttien lämpökuvaus

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Opinnäytetyö
1.6.2011

Tekijä Otsikko	Saku Aspelin Sähkökomponenttien lämpökuvaus
Sivumäärä Aika	49 sivua + 2 liitettä 1.6.2011
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto
Ohjaajat	Lehtori Jari Ijäs Insinööri Hannu Takala
<p>Insinööriyössä selvitettiin lämpökuvaukseen liittyviä fysikaalisia ilmiöitä sekä verrattiin lämpökuvausta mittaustekniikkana muihin käytössä oleviin lämpötilamittaustekniikoihin. Näiden lisäksi tutustuttiin lämpökuvauksen historiaan sekä lämpökuvauslaitteistoissa käytettyihin tekniikoihin, niiden etuihin ja niiden rajoituksiin.</p> <p>Työn toisena pää-aiheena tutkittiin teoreettisesti sähkökomponenteissa esiintyvien lämpötilojen muodostumista sähkövirran vaikutuksesta erilaisissa kuormitustilanteissa. Tutkinnan kohteena oli myös sähkölaitteistoiden kunnossapidon kannalta oleellisten tilanteiden, kuten kolmivaihe-epäsymmetrian sekä jännitteen tai virran yliaaltoisuuden vaikutuksia sähkökomponenteissa esiintyviin lämpötiloihin.</p> <p>Vaihtelevan tai jaksottaisen kuormituksen alaisena olevien sähkökomponenttien lämpötilakäyttäytymiseen esitettiin matemaattisia malleja, joiden avulla komponenteissa esiintyviä lämpötiloja pystytään arvioimaan ja suhteuttamaan niitä esimerkiksi komponenttien nimellistoimintapisteeseen. Sähkökomponenteista mitattujen lämpötilojen tulkitsemiseksi esitettiin ratkaisuja ja ohjeistuksia, joiden avulla on mahdollista arvioida sähkökomponenttien kuntoa tai löytää niiden suunnittelusta toiminnasta poikkeavia tiloja.</p> <p>Insinööriyön kokeellisessa osuudessa pyrittiin toistamaan teoreettisesti tutkittuja sähkökomponenttien lämpötilakäyttäytymisiä koejärjestelyiden avulla. Kokeellisen osuuden tuloksena havaittiin, että kuormitustilanteiden ja vallitsevien ympäristö-olosuhteiden tiedostaminen on ensisijaisen tärkeää, jotta lämpötilojen mittaamisella voitaisiin suorittaa onnistunutta sähkölaitteistojen kunnan arviointia. Lämpökuvaus osoittautui myös erittäin käteväksi mittaustyökaluksi sähkölaitteistojen vikojen, kuten huonojen liitoksien, löytämiseksi.</p>	
Avainsanat	Lämpökuvaus, sähkökomponentti, kuormitustila, kunnossapito, kunnan arviointi, vianetsintä

Author Title	Saku Aspelin Thermal imaging of electrical components
Number of Pages Date	49 pages + 2 appendices 1 June 2011
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Degree Programme in Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Ijäs, Jari, Senior Lecturer Takala, Hannu, Bachelor of Engineering
<p>The purpose of this thesis was to research the physical attributes having to do with thermal imaging and making it possible. Comparative study of thermal imaging was conducted against other temperature measuring techniques and devices. The advantages and disadvantages of the technologies used in modern thermal imagers were explored and the history of thermal imaging was reviewed.</p> <p>Another aim of this thesis was to study theoretically how current generates heat in electrical components under various loading conditions. The changes in temperature caused by different anomalies, like phase symmetry or harmonics, were examined as they are important in nondestructive evaluation of electrical systems.</p> <p>Mathematical models for temperature behavior of electrical components under sequential or varying loading conditions were presented as they are needed when evaluating the measured temperatures. Guidelines and solutions for interpreting measured temperatures were also suggested as a way to evaluate the condition of electrical components and to find anomalies from their behavior.</p> <p>The purpose of the practical section of this thesis was to reproduce the theoretically studied temperature behaviors of electrical components in practice using special test equipment. The main outcome of the tests was that it's crucial to recognize the prevailing loading and environmental conditions to conduct successful analyze of condition of electrical systems. Thermal imaging was also found to be superior measuring tool in finding faults, like faulty connections from electrical systems.</p>	
Keywords	Thermal imaging, electrical component, loading condition, maintenance, troubleshooting

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

1 Johdanto	1
2 Lämpökuvaus	2
2.1 Lämpökuvauksen historia	3
2.2 Infrapuna- ja lämpösäteily	5
2.3 Emissiivisyys	8
2.4 Lämpökuvauslaitteistot	10
2.4.1 Lämpötila-alueet, tarkkuus ja lämpötilaherkkyys	13
2.4.2 Resoluutio, tarkennusetäisyys ja IFOV-arvo	13
2.5 Vaihtoehtoiset lämpötilojen mittaustavat	14
2.5.1 Infrapunalämpömittari	14
2.5.2 Vastuslämpötila-anturit, termistorit ja termoelementit	16
3 Sähkökomponenttien lämpötila	18
3.1 Kuormituksen ja sen muutoksen vaikutus lämpötilaan	21
3.1.1 Lämpötilojen tulkinta	21
3.1.2 Lämpötilarajojen määrittely	22
3.1.3 Kolmivaihe-epäsymmetria	23
3.1.4 Resistiivisyys	25
3.1.5 Taajuusriippuvuus ja yliaallot	26
3.1.6 Aikariippuvuus ja jaksottainen kuormitus	28
3.2 Koejärjestelyillä saadut tulokset	34
3.2.1 Lämpötila kuormituksen funktiona	37
3.2.2 Lämpötila ajan funktiona	38
3.2.3 Lämpötila kolmivaihe-epäsymmetrian funktiona	40
3.2.4 Liitosongelmat	42

4 Johtopäätökset	47
Lähteet	48
Liitteet	
Liite 1. Emissiivisyystaulukko	
Liite 2. Koelaitteiston piirikaavio ja osasijoittelukuva	

1 Johdanto

Lämpökuvauksen hyödyntäminen teollisuus- ja rakennuskunnossapidon aloilla on erittäin nopeasti kasvava trendi. Sen kasvua ruokkii lämpökuvauslaitteistojen hintojen lasku, niiden käytön helpottuminen ja fyysisen koon pienentyminen teknologian kehittyessä. Tässä insinööriyössä käsitellään aluksi lämpökuvausta ja sen tekniikkaa yleisesti. Käsiteltäviin asioihin kuuluvat myös lämpökuvauksen mahdollistavat fysikaaliset ilmiöt.

Mittauskohteiden pintalämpötilojen mittauksen helpottuessa ja mittaustarkkuuden parantuessa nousee esiin kuitenkin uudenlainen ongelma, eli miten tulkita näitä mitattuja lämpötiloja. Rakennuskunnossapidon puolella on helpompi lähestyä esimerkiksi eristysvikojen ja rakennevaurioiden näkyessä selvästi poikkeavina mittaustuloksina laajemmista kokonaisuuksissa. Absoluuttisesti tarkat mittaustulokset ovat myös oleellisia vain kastepisteiden määrittämisessä, jossa vallitsevat olosuhteet (emissiivisyys, ulko- ja sisälämpötilat ja rakenteen ominaisuudet) ovat helposti määriteltävissä. Näistä syistä johtuen lämpökuvauksella onkin paljon laajemmalti käytössä nimenomaan rakennuskunnossapidon puolella.

Teollisuuskunnossapidossa näiden vallitsevien olosuhteiden määrittäminen lämpökuvaukselta varten on ylivoimaisesti suurin haaste. Mekaanisten ja sähköisten komponenttien lämpötilojen ollessa vahvasti sidoksissa niiden kuormitukseen, on näiden kuormitustilojen määrittäminen ensiarvoisen tärkeää suoritettaessa niiden absoluuttisten lämpötilojen tulkintaa. Seurantaluentoisessa lämpökuvauksessa tilanne vielä korostuu, jos pyritään löytämään eroavaisuuksia vaihtelevien kuormitusten alaisena toimivien komponenttien käyttölämpötiloista.

Tämän insinööriyön seuraavassa osassa selvitetään sähkökomponenttien fyysisten ja sähköisten ominaisuuksien sekä eri kuormitustilanteiden suhdetta niissä esiintyviin lämpötiloihin. Näiden lisäksi käsitellään yleisesti tiedossa olevien sähkökomponenttien vikaantumista aiheuttavien tilanteiden ominaisuuksia ja niiden vaikutuksia mitattaviin lämpötiloihin.

2 Lämpökuvaus

Lämpökuvauksella tarkoitetaan kappaleiden lähettämän infrapunasäteilyn mittaamista ja mittaustiedon muuttamista visuaaliseen muotoon eli lämpökuviksi. Koska kaikki kappaleet lähellä huonelämpötilaa emittoivat infrapunasäteilyä ja tämä säteilyn määrä on verrannollinen kappaleen lämpötilaan, on lämpökuvauksen avulla mahdollista kuvastaa ympäristöä ilman näkyvää valoa.

Lämpökuvauksella on monia käyttökohteita, joista muutamia yksittäisiä esimerkkejä on eritelty seuraavaan listaan:

- *viranomaiset*: sikainfluenssatapausten löytäminen raja-asemilla
- *palotorjunta*: savun läpi näkeminen, palopesäkkeiden löytäminen
- *rakennuskunnossapito*: eristysvikojen löytäminen rakennuksista
- *terveydenhuolto*: fysiologisten muutosten seuranta. [1, s. 8–18.]

Lämpökuvat ovat itse asiassa visualisointeja rekisteröidystä infrapunasäteilyn energian määrästä jota ympäristö lähettää, joten niistä voi olla hankala tulkita jonkin tietyn kappaleen absoluuttista lämpötilaa. Tietyn kappaleen suunnasta tulevan infrapunasäteilyn energiamäärä koostuu seuraavista komponenteista:

emittoitunut energia + siirtynyt energia + heijastunut energia,

joista emittoitunut energia on se kokonaisenergian osa, mitä yleisesti halutaan mitata määrittäessä jonkin kappaleen absoluuttista lämpötilaa. Lämpökamerat muodostavatkin arvionsa kappaleen lämpötilasta perustuen useisiin laskutoimituksiin ja algoritmeihin, suoran mitatun energiamäärän lämpötilamuunnoksen sijasta. [2, s. 276.]

Lämpökuvauksella on monia etuja perinteisiin lämpötilojen mittaustapoihin verrattuna, varsinkin teollisen tuotannon, tuotekehityksen ja kunnossapidon näkökulmasta katsottuna.

Näitä etuja ovat, muun muassa

- mittauksen nopeus
- liikkuvien kohteiden mittaus
- luoksepääsemättömien kohteiden mittaus
- erittäin kuumien kohteiden mittaus
- mittauksen vakaus (mittausaikavakio on äärettömän pieni)
- mittauksen vaikuttamattomuus kohteen lämpötilaan
- mittaus ilman näkyvää valoa
- kohteen lämpötilajakaumien visualisointi. [3, s. 1–2.]

Lämpökuvaukset jaetaan kahteen alaryhmään, aktiiviseen ja passiiviseen kuvaukseen. Passiivisella kuvauksella tarkastellaan kohteita vaikuttamatta niihin, jolloin niiden lämpötila yleensä erii luonnollisesti taustastaan, kun taas aktiivisella kuvauksella tuodaan tarkoituksella lämpöenergiaa kohteeseen (tai poistetaan sitä) ja tutkitaan kohteen käyttäytymistä. Aktiivisessa lämpökuvauksessa lämpöenergia voidaan tuoda kohteeseen monilla eri tavoilla, mutta teollisessa tuotannossa ja kunnossapidossa käytetyimmät menetelmät ovat ilman tai nesteen, optisen, sähkömagneettisen tai mekaanisen rasituksen aiheuttaman lämpövaikutuksen hyödyntäminen. [3, s. 3–9.]

2.1 Lämpökuvauksen historia

Vielä alle 200 vuotta sitten ei osattu edes epäillä sähkömagneettisen säteilyspektrin sisältävän infrapuna-aluetta. Sen löysi Sir William Herchel (1738 - 1822), Englannin kuninkaan Yrjö III kuninkaallinen astronomi ja Uranuksen löytäjä, vuonna 1800 tutkiessaan uusia menetelmiä auringon valon kirkkauden himmentämiseen teleskooppitutkimuksiaan varten. Käyttäessään suodattimina erilaisia värjättyjä lasimateriaaleja, hän huomasi saman himmentävän vaikutuksen omaavien suodattimien päästävän läpi erimäärän auringon lämpövaikutusta. Osa suodattimista ei päästänyt läpi lämpövaikutusta juuri lainkaan, kun taas osa niin paljon, että suodattimen läpi oli lähes mahdotonta edes katsoa.

Herchel oli pian vakuuttunut koejärjestelyn tarpeellisuudesta asian tutkimiseksi. Hän halusi löytää materiaalin, jolla voisi saavuttaa mahdollisimman hyvän vaimennuksen

lämpösäteilylle halutulla näkyvän valon vaimennuksella. Tämä koejärjestely koostui prismasta, jolla hän hajotti auringosta tulevan valon pöydän pinnalle ja lämpömittarista, jonka nestesäiliö oli tummennettu musteen avulla. Liikuttaessaan lämpömittaria prisman hajottamien värien läpi, hän huomasi lämpötilojen nousevan violetista punaiseen päin menneessä. Italialainen tutkija Landriani (1746 - 1815) oli huomannut tämän jo vuonna 1777, mutta Herchel todisti, että korkein mahdollinen lämpötila ei löytynytkään näkyvän valon osuudelta vaan vasta paljon punaisen värin ulkopuolelta.

Julkistaessaan löydöksensä, Herchel nimesi tämän uuden sähkömagneettisen säteilyn alueen lämpömetriseksi spektriksi (*thermometrical spectrum*), ja varsinaista säteilyä hän usein kutsui mustaksi lämmöksi tai näkymättömiksi säteiksi. Herchel ei siis keksinyt termiä infrapuna, vaan sana ilmaantui painettuun tekstiin vasta noin 75 vuotta myöhemmin, eikä sen alkuperästä ole tarkempaa tietoa.

Herchelin löydökset aiheuttivat epäilyksiä sen aikaisten tutkijoiden keskuudessa johtuen lasin käytöstä prismojen valmistusmateriaalina. Kokeen toistamista yrittäneet tutkijat käyttivät prismoissaan erilaisia lasityyppejä, joilla oli erilaisia infrapunaa läpäisyominaisuuksia. Herchel tiedosti nämä lasin käyttöön liittyvät ongelmat myöhemmissä tutkimuksissaan ja vakuuttui, että infrapunasäteilylle soveltuvat optiikat rajoittuvat heijastavien materiaalien (kuten peilien) käyttöön.

Italialainen tutkija Macedonio Melloni (1798 - 1854) todisti tämän kuitenkin vääräksi jo vuonna 1830, kun hän teki mullistavan löydöksen käyttäessään prismojen ja linssien valmistukseen vuorisuolaa (NaCl), joka esiintyy luonnossa tarpeeksi suurina kiteinä yhtenäisten kappaleiden valmistusta varten. Vuorisuola osoittautui läpäisevän infrapunasäteilyä huomattavan hyvin ja pysyikin infrapunasäteilyn tutkimiseen käytettynä pää-asiallisena materiaalina pitkälle seuraavalle vuosisadalle, kunnes synteettisten kristallien valmistus tuli mahdolliseksi 1930-luvulla.

Lämpömittarien käyttö lämpösäteilymittareina pysyi muuttumattomana vuoteen 1830, jolloin Italialainen tutkija Leopoldo Nobili (1784 - 1835) keksi termoparin. Pian tämän jälkeen Melloni huomasi kytkeä termopareja sarjaan ja muodosti näin ensimmäisen lämpösähköparin, joka oli 40 kertaa tarkempi kuin mikään muu sen ajan lämpötilamittausväline. Sir John Herchel (1792 - 1871), Williamin poika muodosti ensimmäisen ns.

lämpökuvan vuonna 1840, kun hän haihdutti ohutta öljykalvoa siihen tarkennetun lämpösäteilyn avulla. Myöhemmin hän onnistui myös tallentamaan alkeellisen lämpökuvan paperille, jota hän kutsui termografiksi (*thermograph*).

Iso harppaus infrapuna-anturien kehityksessä tapahtui 1880, kun Samuel Langley (1834 - 1906) keksi bolometrin, Wheatstonen siltaan kiinnitetyn ohuen platinasuikaleen, johon infrapunasäteily kohdistettiin. Piirissä kulkeva virta oli tällöin mitattavissa galvanometrin, virtamittarin esimuodon avulla, ja sillä oli mahdollista mitata lehmästä lähtevä lämpösäteily jopa 400 metrin päästä.

Maailmansotien vaikutus näkyi vahvasti lämpökuvauksen kehityksessä, joiden aikana kehitettiin kaksi mullistavaa tekniikkaa; kuvamuunnin ja fotonianturi. Kuvamuunnin kuitenkin vaati ns. kohteen *valaisemista* etsintäsäteillä, joten toisen maailmansodan aikana kehitys keskittyi erittäin herkkään fotonianturiin. Kuitenkin vasta 1950-luvulla sotien aikana kehitetyt tekniikat alkoivat vapautua julkiseen käyttöön, ja lämpökuvaus alkoi saavuttaa nykyistä muotoaan. [4, s. 145–149.]

2.2 Infrapuna- ja lämpösäteily

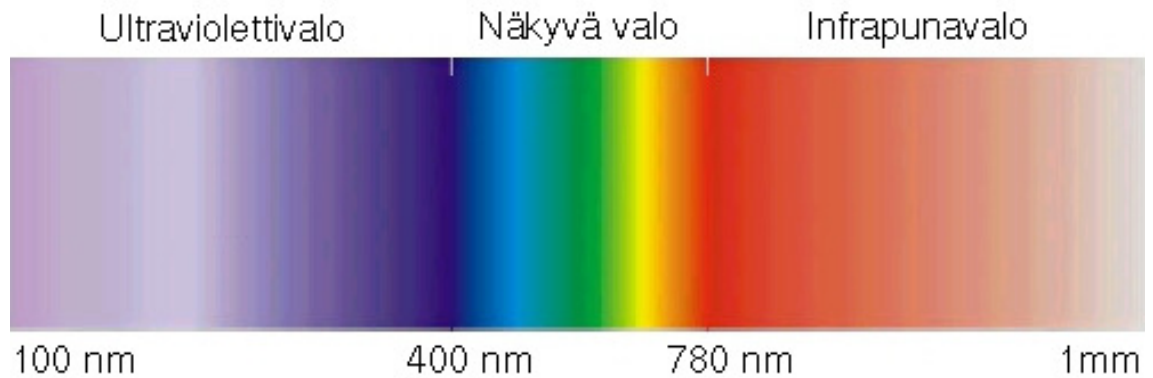
Infrapunasäteily on sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus λ on pidempää kuin näkyvän valon. Se kattaa aallonpituudet väliltä $0,7 \mu\text{m} \dots 1 \text{mm}$, jotka vastaavat taajuuksia $430 \dots 0,3 \text{THz}$. Infrapuna-alueet on usein jaettu eri julkaisuissa ja standardeissa kolmeen osaan ja yleisimmät niiden määräämät aallonpituusalueet esitetään taulukossa 1. [5.]

Taulukko 1. Infrapunon aallonpituusalueet

	Lähi-infrapuna	Keski-infrapuna	Kauko-infrapuna
ISO	0,78 - 3 μm	3 - 50 μm	50 - 1 000 μm
CIE	0,7 - 1,4 μm	1,4 - 3 μm	3 - 1 000 μm
NASA/IPAC	0,7 - 5 μm	5 - 40 μm	40 - 350 μm

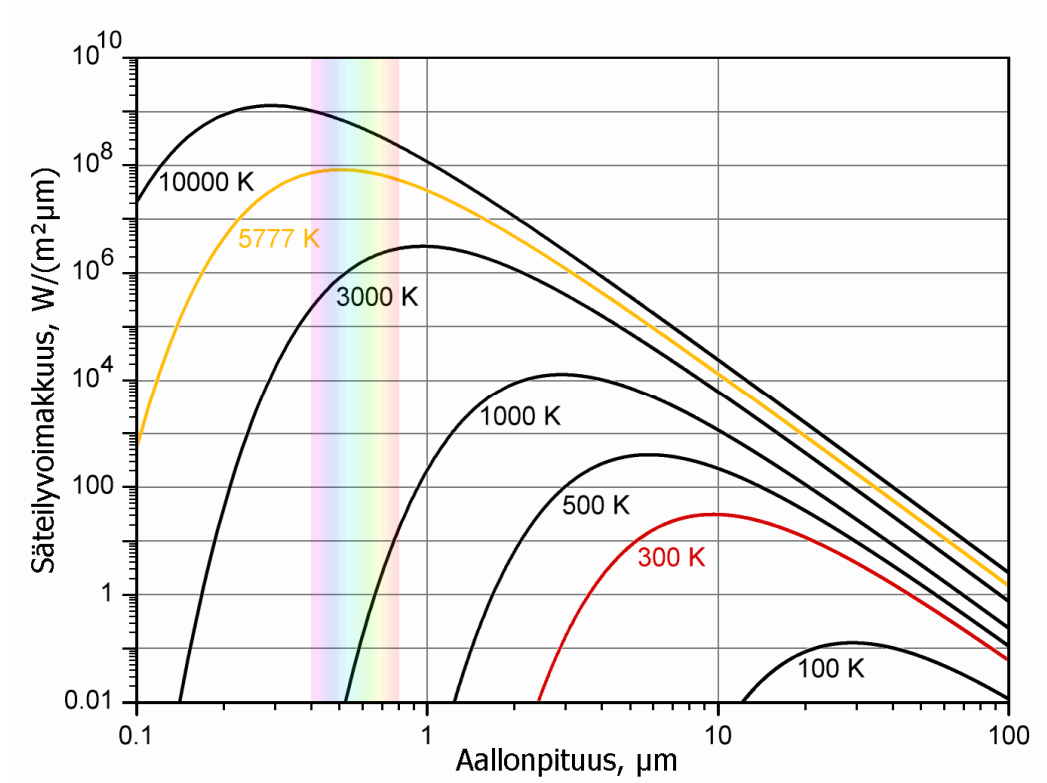
Taulukossa 1 (ks. edell. s.) käytetyt lyhenteet

- ISO; *International Organization for Standardization*
- CIE; *International Commission on Illumination*
- NASA; *National Aeronautics and Space Administration*
- IPAC; *Infrared Processing and Analysis Center*



Kuva 1. Infrapunasäteily sähkömagneettisessa spektrissä

Kaikki kappaleet, jotka ovat lämpötilaltaan yli absoluuttisen nollapisteen $-237,15\text{ °C}$ lähettävät ympäristöönsä lämpösäteilyä, joka on lähi-infrapunasäteilyä pitkäaaltoisempaa ja liikkuu muiden sähkömagneettisten säteilyjen tavoin valon nopeudella, eikä tarvitse siirtyäkseen väliainetta. Kappaleen lämpötila vaikuttaa voimakkaasti sen lämpösäteilyn aallonpituuteen. Mitä korkeampi kappaleen lämpötila on, sitä lyhytaaltoisempaa säteilevä energia on. Lämpösäteily muodostuu elektronien ja protonien varausten liikkeessä materiaalissa ja lämpötilan kasvaessa tämä liike kiihtyy, joten aallonpituuden lyhentyminen eli värähtelytaajuuden nousu, on helppo ymmärtää. [2, s. 275–278.]



Kuva 2. Eri lämpötilojen aallonpituuden spektri

Kuvasta 2 huomataan, että erittäin kuumien ($> 700\text{ K}$) kappaleiden säteilemän energian spektri ulottuu näkyvän valon alueelle ($0,38 \dots 0,75\ \mu\text{m}$), joka on helposti ymmärrettävissä esimerkiksi hehkuvan kuumen raudan avulla.

Ilmakehässä oleva vesihöyry ja hiilidioksidi absorboivat osan kappaleen lämpösäteilyä lähi-infrapuna-alueella ja tietyillä aallonpituuksilla lämpösäteily suodattuu lähes olemattomaksi. Tästä syystä lämpökamerat suunnitellaan herkäksi alueille, jolla tämän suodattumisen tiedetään olevan pienimillään. Käytännössä nämä standardeiksi muodostuneiden käyttökelpoisten alueiden aallonpituudet ovat karkeasti $3 \dots 5\ \mu\text{m}$ (keskiaaltoalue) ja $8 \dots 12\ \mu\text{m}$ (pitkäaaltoalue).

Lähellä näkyvän valon aallonpituusaluetta ei pystytä havaitsemaan alle n. 650 °C lämpötilassa olevan kappaleen lähettämää lämpösäteilyä lainkaan, vaikka alue määritelläänkin kuuluvaksi infrapuna-alueeseen. Tätä aluetta hyödyntävät esimerkiksi pimeäkuvausvideokamerat, jotka vahvistavat ja ilmaisevat juuri silmälle näkymätöntä säteily-spektrin osaa ja mahdollisesti valaisevat sitä lisäksi infrapuna-LED:eillä.

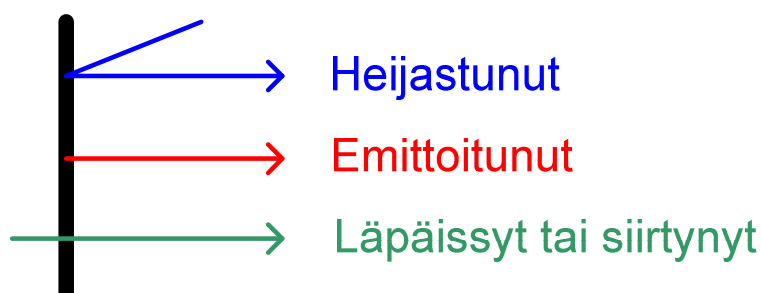
Pimeäkuvauksessa ei siis ole kyse lämpökuvauksesta, koska ilmaistava säteily ei ole kappaleen itsensä lähettämää lämpösäteilyä. Tätä lähi-infrapuna-aluetta hyödynnetään kuitenkin esimerkiksi joissakin erikoissovelluksissa ilmaisemaan vettä, jonka absorptio kyseisellä alueella on erittäin voimakasta. Muita lähi-infrapuna-aluetta hyödyntäviä sovellutuksia ovat, mm.

- lääketiede
- spektroskopia
- rikospaikkatutkinta
- teollisuuden ja kemian-alan tarkastukset ja mittaukset.

2.3 Emissiivisyys

Emissiivisyydellä ε tarkoitetaan kappaleen pinnan ominaisuutta, joka kuvaa sen kykyä emittoida säteilyä. Se on suhdeluku samassa lämpötilassa olevan täydellisen mustan kappaleen säteilemään energiaan, joten kaikkien todellisten kappaleiden emissiivisyys $\varepsilon < 1$. Kaikki todelliset kappaleet siis emittoivat myös muista lähteistä peräisin olevaa säteilyä ja emissiivisyys kuvaa, kuinka suuri osa tästä säteilystä on peräisin kappaleesta itsestään.

Kappaleen pinnasta lähtevän kokonaislämpösäteilyn muodostuminen esitetään kuvassa 3, josta huomataan että se koostuu todellista lämpötilaa kuvaavan emittoituneen osan lisäksi heijastuneesta sekä läpäisseestä tai siirtyneestä osasta.



Kuva 3. Lämpösäteilyn muodostuminen

Näiden kolmen kokonaislämpösäteilyn muodostavan osan yhteenlaskettu suhdeluku on 1, eli emissiivisyydellä kuvataan myös emittoituneen säteilyn suhdetta kokonaislämpösäteilyyn. Sen avulla on siten mahdollista määritellä kohteen absoluuttinen lämpötila.

Emissiivisyys on riippuvainen lämpötilasta, tarkastelukulmasta ja aallonpituudesta, mutta niiden vaikutukset oletetaan käytännön sovelluksissa usein merkityksettömän pieniksi. Vaikka usein puhutaankin kappaleen pintamateriaalin emissiivisyydestä, myös kappaleen paksuus vaikuttaa emissiivisyyden arvoon, koska ohuemmat kappaleet läpäisevät enemmän muista lähteistä peräisin olevaa lämpösäteilyä ja ovat myös herkempiä muista kappaleista siirtyneen lämpösäteilyn vaikutukselle.

Monissa lähteissä ilmoitetut eri materiaalien emissiivisyysarvot on määritetty äärettömän paksuille kappaleille, eivätkä ne ota huomioon aallonpituuden vaikutusta. Onkin tärkeää tiedostaa ero ilmoitettujen kokonaisemissiivisyyskertoimien (*total emissivity*) ja aallonpituuden huomioon ottavien emissiivisyyskeroimien välillä (*spectral emissivity*).

Kappaleen säteilemä teho pinta-alaa kohti on suoraan verrannollinen sen emissiivisyyteen. Tämä voidaan päätellä Stefan-Boltzmanin kaavasta (kaava 1).

$$Q = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4, \text{ jossa} \quad (1)$$

Q	kappaleen säteilemä teho	$\frac{P}{A} \left[\frac{W}{m^2} \right]$
ε	emissiivisyys	
σ	Stefan-Boltzmanin vakio	$5,6704 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$
T	lämpötila	[K]

Tämä säteilevä teho on myös se suure, jota jäähdyttämätön lämpökamera mittaa tulkitessaan kappaleen lämpötilaa muodostaessaan visualisointia tarkasteltavasta kohteesta. Eri materiaalien emissiivisyyskertoimia esitetään liitteessä 1.

Emissiivisyyden määrittäminen

Jos mitattavan kappaleen pintamateriaalin emissiivisyyskerrointa ei löydy kerrointaulukoista tai halutaan varmistua että käytetty kerroin on oikein, on emissiivisyyskerroin määriteltävissä seuraavien kahden tavan avulla:

1. mittaamalla kappaleen pintalämpötila kosketuksellisella lämpötilamittarilla ja asettamalla lämpökameran emissiivisyyskerroin siten, että ne näyttävät identtistä lämpötila-arvoa, tai
2. asettamalla kappaleen pintaan tunnetun emissiivisyyskerroimen omaavaa materiaalia ja mittaamalla lämpötila tästä materiaalista tai vertaamalla mittaustulosta kappaleen alkuperäisen pintamateriaalin lämpötila-arvoon edellisen kohdan mukaisesti.

Kappaleen pintaan asetettava materiaali voi olla esimerkiksi yleisesti saatavilla olevaa mustaa eristeteippiä, jonka emissiivisyyskerroin on hyvin tarkasti 0,97, mutta markkinoilla on myös esimerkiksi tätä tarkoitusta varten suunniteltua *spray*-maalia, jolla on tunnettu emissiivisyyskerroin.

Näiden menetelmien lisäksi voidaan tietyissä tapauksissa tehdä kappaleeseen pieni ($\approx 2\text{ mm}$) reikä, joka syvyys on vähintään kuusi kertaa sen halkaisija. Tämän reiän emissiivisyyden arvona voidaan pitää lähes yhtä. Keino on hyödyllinen esimerkiksi mitattaessa erittäin kuumien kappaleiden lämpötiloja, joihin apumateriaalien kiinnitys olisi haasteellista. [2, s. 277–280.]

2.4 Lämpökuvauslaitteistot

Lämpökameroiden yksinkertaistettu rakenne koostuu viidestä komponentista, joihin kuuluvat optiikka, ilmaisimet, vahvistin, signaalin käsittely ja näyttö. Näistä komponenteista ilmaisinta voidaan pitää ainoana osana, jota tavataan pelkästään lämpökameroista ja sen ominaisuudet ovatkin tärkein lämpökameran suorituskykyyn vaikuttava tekijä. Ilmaisimet, ja siten myös lämpökamerat, jaetaan kahteen pääryhmään: jäähdytettyihin ja jäähdyttämättömiin.

Jäähdytetyt ilmaisimet

Jäähdytettyjen ilmaisimien etuna on ylivoimainen kuvanlaatu jäähdyttämättömiin verrattuna, jonka johdosta niiden kanssa voidaan myös käyttää suuremman syväterävyyden antavia optiikoita. Jäähdytetyt ilmaisimet perustuvat fotoneiden aiheuttamaan puolijohdeiden resistiivisyyden tai p-n-liitoksen aiheuttamaan virran muutokseen ja tarvitsevat jäädytyksen toimiakseen oikein. Ilman jäähdytystä ilmaisimen oma säteily aiheuttaa sen virhetoiminnan lämpökohinasta johtuen. Nämä fotonilmaisimet ovat herkkiä vain tietylle aallonpituudelle valitun puolijohdemateriaalin mukaan. Taulukossa 2 esitetään muutamia jäähdytettyjen ilmaisimien käytetyimpiä materiaaleja.

Taulukko 2. Eri materiaalien herkkyysalueet

Materiaali	Herkkyysalue / μm
Indium-gallium-arsenidi (InGaAs)	0,7 - 2,6
Germanium (Ge)	0,8 - 1,7
Lyijysulfidi (PbS)	1,0 - 3,2
Lyijyselenidi (PbSe)	1,5 - 5,2
Indiumantimonidi (InSb)	1,0 - 6,7
Indiumarsenidi (InAs)	1,0 - 3,8
Platinasilisidi (PtSi)	1,0 - 5,0
Elohopea-cadmium-telluridi (MCT, HgCdTe)	0,8 – 25,0

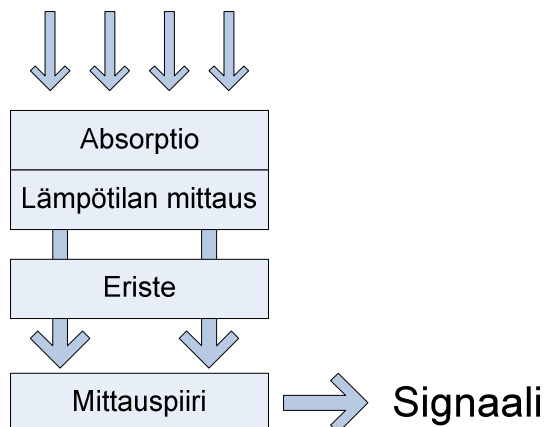
Jäähdytetyt ilmaisimet tarjoavat kuvanlaadun ja mittaustarkkuuden lisäksi suuremman kuvausnopeuden, koska ilmaisimen toiminta ei perustu lämpötilan muutokseen ilmaisimessa. Ilmaisimien jäädytyksen järjestäminen on kuitenkin haasteellista, niiden käyttölämpötilojen ollessa jopa alle $100\text{ }^\circ\text{K}$. Jäähdytys myös kasvattaa ilmaisimen rakenteen kokoa, joten jäähdytettävien ilmaisimien perustuvia lämpökameroita käytetäänkin nykyään vain lähinnä kiinteissä asennuksissa.

Jäähdyttämättömät ilmaisimet

Jäähdyttämättömien ilmaisimien eduksi voidaan katsoa rakenteen yksinkertaisuus ja koko, koska erillistä jäädytyslaitteistoa ei tarvita. Niiden toiminta perustuu mikrobolometrin käyttöön, jossa lukuisien, esimerkiksi vanadiinioksidista (V_2O_5), valmistettujen lämpötila-antureiden resistanssi muuttuu infrapunasäteilyn osuessa niihin. Ilmaisimen

toiminnan perustuessa lämpötilan mittaamiseen, on sen mittausnopeus ja -tarkkuus heikompi jäähdytettyihin ilmaisimiin verrattuna, koska ilmaisimessa tapahtuvat lämpötilan muutokset vaikuttavat aina myös ympäristöönsä, eivätkä tapahdu välittömästi. Koska tämäntyyppinen ilmaisinkenno on herkkä kaikille lämpösäteilyn aallonpituuksille, järjestetään jäähdyttämättömissä lämpökameroissa oikean aallonpituusalueen valinta optiikkaan sijoitetun suodatuksen avulla. Kuvassa 4 esitetään yksittäisen jäähdyttämättömän ilmaisinyksikön toimintaperiaate.

Infrapunasaäteily



Kuva 4. Jäähdyttämättömän ilmaisinyksikön toimintaperiaate

Nämä yksittäiset lämpötilamittauspisteet on asetettu kennomaisesti tasolle, kuten tavallisessa valokuvauskamerassa. Poikkeuksena niihin lämpöilmaisimien rakenne on kuitenkin monimutkaisempi, koska infrapunalle herkät materiaalit eivät johda sähköä. Tästä syystä erillisen mittauspiirin käyttö on välttämätöntä.

Jäähdyttämättömään mikrobolometriin perustuvat lämpökamerat ovat nykyään kaikkien yleisimpiä, ja se on käytännössä ainoa käytetty tekniikka kannettavissa lämpökameroissa. Seuraavat alaluvut käsittelevätkin ainoastaan tätä lämpökameroiden pääryhmää. [6, s. 3–41.]

2.4.1 Lämpötila-alueet, tarkkuus ja lämpötilaherkkyys

Mikrobolometri-tekniikkaan perustuvien lämpökameroiden lämpötilamittausalueet ulottuvat yleensä välille $\approx -20 \dots +1300$ °C. Monissa teollisuus- ja rakennustarkastuskäyttöön tarkoitetuissa kameroissa suurin mittauslämpötila on n. 350 °C, joka on kuitenkin riittävä useimpiin käyttötarkoituksiin.

Lämpökameran tarkkuudeksi ilmoitetaan yleensä prosentuaalinen sekä absoluuttinen arvo, joista suurempi on merkitsevämpi. Arvojen suuruusluokka on usein ± 2 °C/2 %, joka tarkoittaa yli 100 °C lämpötiloja mitatessa yli 2 °C epätarkkuutta. Usein tämän absoluuttisen lämpötilan mittaustarkkuudella ei kuitenkaan ole merkitystä, koska kuvattavasta kohteesta halutaan lämpökuvauksen avulla löytää lämpötilaeroja. Lämpökamerat mittaavat näitä lämpötilaeroja lämpötilaherkkyytensä mukaisesti ja tämä NETD (*Noise Equivalent Temperature Difference*) -arvo siis ilmaisee lämpötilaeron, jonka kamera havaitsee kahden ilmaisimen pikselin välillä. Tämä arvo on usein suuruusluokaltaan $\leq 0,1$ °C. [7.]

2.4.2 Resoluutio, tarkennusetäisyys ja IFOV-arvo

Lämpökameran ilmaisimen resoluutio kertoo lämpökuvasta saatavien yksittäisten lämpötila-arvojen määrän. Esimerkiksi resoluution 140 x 140 omaava lämpökamera tuottaa 19 600 yksittäistä pistettä eli pikseliä, joiden lämpötila-arvo voidaan tulkita. Tämä yhdistettynä pienimpään tarkennusetäisyyteen ja näkökentän laajuuteen kertoo pienimmän fyysisen alueen koon, jolta lämpötila-arvo saadaan mitattua. Lämpökameroiden ominaisuuksissa usein mainitun IFOV (*Instantaneous Field of View*) -arvon ja kuvausetäisyyden avulla voidaan tietyn sivunpituuden omaavan neliönmuotoisen havaintopisteen havaitsemiseen tarvittava IFOV-arvo määrittää kaavan 2 ja esimerkin (ks. seur. s.) mukaisesti:

$$IFOV_{MAX} = \frac{a_k}{l_e}, \text{ jossa} \quad (2)$$

l_e etäisyys kohteeseen [m]

a_k kohteen sivunpituus [m]

Esim.
$$IFOV_{MAX} = \frac{a_k}{l_e} = \frac{1 \text{ cm}}{400 \text{ cm}} = 2,5 \text{ mrad}.$$

Vastaavasti jonkin annetun IFOV -arvon ja etäisyyden avulla voidaan määrittää neliönmuotoisen havaintopisteen sivunpituuden pienin arvo seuraavasti (kaava 3):

$$a_{MIN} = l_e \cdot IFOV, \text{ jossa} \quad (3)$$

a_{MIN} sivunpituuden pienin arvo [m]

l_e etäisyys kohteeseen [m]

Esim.
$$a_{MIN} = l_e \cdot IFOV = 2 \text{ 500 cm} \cdot 0,9 \text{ mrad} = 2,25 \text{ cm}.$$

Yksittäisen pikselin kokoisen alan ilmaisinkennolta kattava lämmönlähde ei kuitenkaan anna riittävän tarkkaa mittaustulosta kohteesta. Ilmaisintekniikan rakenteen johdosta luotettavan mittaustuloksen saamiseksi on mitattavan kohteen katettava vähintään 4 x 4 pikselin kokoinen ala kennolta. IFOV-arvon määrittämiseen ei ole standardia, joten eri valmistajien antamat arvot eivät välttämättä ole vertailukelpoisia. Perinteinen määrittelmä sille perustuu 50 %:n todennäköisyyteen oikeasta mittaustuloksesta. [7.]

2.5 Vaihtoehtoiset lämpötilojen mittaustavat

2.5.1 Infrapunalämpömittari

Lämpökamera ja infrapunalämpötilamittari, eli pyrometri, ovat molemmat kosketuksettomiaan lämpötilamittaukseen soveltuvia mittalaitteita. Ne molemmat perustuvat kohteesta lähtevän lämpösäteilyn mittaamiseen, pyrometrin mitatessa yhtä ainoaa mitta-alueensa (näkökenttänsä) lämpötilojen keskiarvoa ja lämpökameran mitatessa resoluutionsa mukaisen määrän lämpötila-arvoja koko näkökenttänsä alalta.

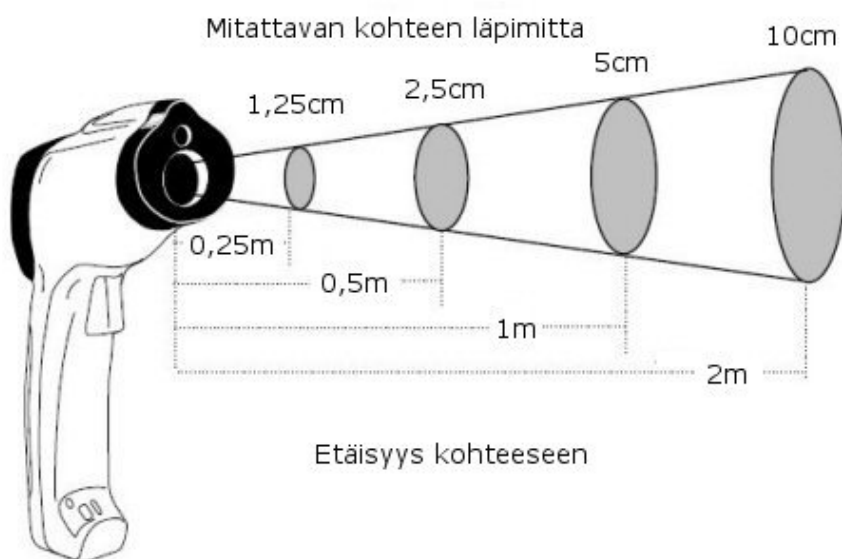
Pyrometrin suurin heikkous on lämpötilamittauksen keskiarvostaminen koko näkökenttänsä alalta, jolloin sen näkökenttää pienempää kohdetta mitattaessa mittaustulos on väärä, jos kohteen ympäristö on eri lämpötilassa. Laitteen näkökentän koko on myös usein hankala visuaalisesti hahmottaa, jolloin myös mitattavan todellisen kohteen koko

on vaikea määrittää. Tunnettaessa kohteen ja näkökentän pinta-alat sekä kohteen ja taustan lämpötilat voidaan pyrometrin antama mittaustulos laskea kaavan 4 avulla.

$$T_{tulos} = \frac{A_K t_K + (A_Y - A_K) t_Y}{A_Y}, \text{ jossa} \quad (4)$$

$A_Y = \pi \cdot r^2$	näkökentän pinta-ala	$[m^2]$
A_K	kohteen pinta-ala	$[m^2]$
t_Y	ympäristön lämpötila	$[K]$
t_K	kohteen lämpötila	$[K]$

Monet laitevalmistajat antavat infrapunalämpömittareillensa etäisyys-kohde-suhdeluvun (*Distance-to-spot ratio, D:S*), jonka avulla mitattavan kohteen kokoa voidaan arvioida. Suhdeluvun ollessa esimerkiksi 20:1 ja mitattaessa kohdetta 2 m päästä, keskiarvoistaa mittari läpimitaltaan 10 cm ympyränmuotoisen alan lämpötilan.



Kuva 5. Infrapunalämpömittarin mittausalueet

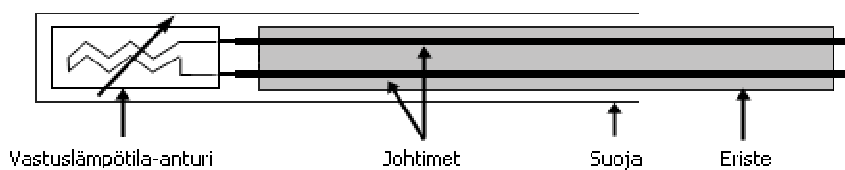
Toinen infrapunalämpömittarien ongelma on useissa malleissa käytetty kiinteä emissiivisyyden asetteluarvo. Se on lähes poikkeuksetta lukittu arvoon väliltä 0,95 ... 0,98, joka soveltuu monien maalattujen pintojen, muovien, lasien, veden ja puumateriaalien lämpötilamittaukseen. Mittauskohteen emissiivisyyden ollessa matalampi, kuten

kiiltävillä metalleilla, on tarkan lämpötila-arvon saaminen käytännössä mahdotonta ilman apuvälineitä (ks. 2.3). [8, s. 16–21.]

2.5.2 Vastuslämpötila-anturit, termistorit ja termoelementit

Vastuslämpötila-anturit, termistorit ja termoelementit perustuvat lämpötilan muutoksen aiheuttamaan resistanssin tai jännitteen muutokseen mittauspäässä. Mittaamalla anturin resistanssi tai jännite ja tunnettaessa sen valmistusmateriaalin lämpötilakäyttäytyminen, voidaan anturin lämpötila päätellä hyvin tarkasti.

Yleisimmät käytössä oleva vastuslämpötila-anturit ovat tyypiltään PT100 ja PT1000, joiden nimellisvastukset $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa ovat vastaavasti $100\ \Omega$ ja $1000\ \Omega$ ja tyypillinen tarkkuus $-50 \dots +100\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötiloissa $\approx 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Anturin rakenne koostuu muovikalvon päällä olevasta ohuesta platinakalvosta, jonka resistanssi muuttuu hyvin lineaarisesti lämpötilan muuttuessa.



Kuva 6. Vastuslämpötilamittarin rakenne

Termistorit eroavat vastuslämpötila-antureista niiden erittäin epälineaarisen käyttäytymisensä puolesta jolloin niiden herkkyys on myös huomattavasti vastuslämpötila-antureita suurempi. Ne omaavat yleensä negatiivisen lämpötilakertoimen, jolloin niiden resistanssi laskee lämpötilan noustessa. Niiden rakenne koostuu yleensä puolijohteesta, joka on upotettu lasiin tai muoviin.



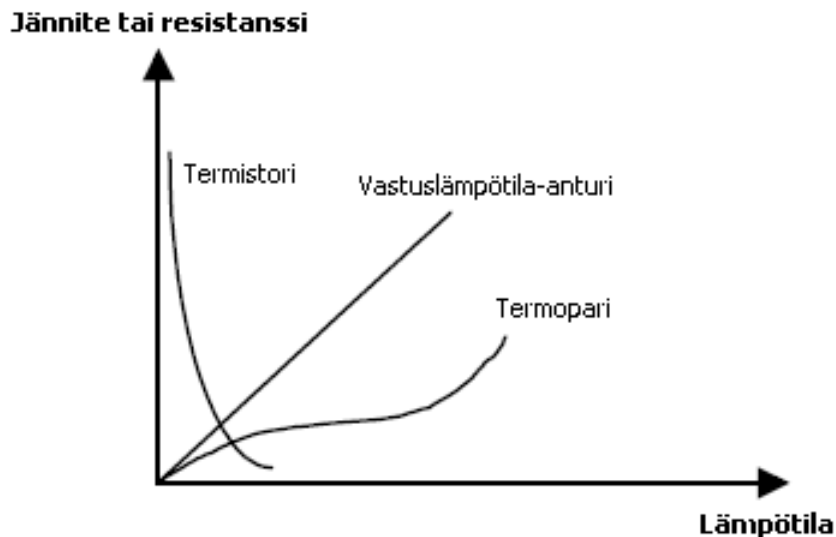
Kuva 7. Termistori

Termoelementti (lämpöpari, termopari) perustuu kahden eri metallin liitoksessa syntyvään jännitteeseen, joka on lämpötilariippuvainen. Anturin jännitearvoa verrataan identtiseen tunnetussa lämpötilassa olevan metalliparin jännitteeseen ja anturin lämpötila saadaan määriteltä, kun tiedetään käytetyn metalliparin riippuvuus lämpötilasta.



Kuva 8. Termoelementin toimintaperiaate (K-tyyppi)

Kuvassa 9 esitetään eri anturityyppien käyttäytyminen lämpötilan funktiona. Kuvasta huomataan, että ainoastaan vastuslämpötila-anturin resistanssin muutosnopeus pysyy vakiona lämpötilasta riippumatta. Muiden anturityyppien epälineaarinen käyttäytyminen ja suuremmat hetkelliset mitattavan suureen muutosnopeudet johtavat niiden parempaan tarkkuuteen tietyillä lämpötila-alueilla.



Kuva 9. Eri anturityyppien käyttäytyminen lämpötilan funktiona

Taulukossa 3 (ks. seur. s.) esitetään eri anturityyppien vahvuuksia, heikkouksia sekä niiden käyttölämpötila-alueet.

Taulukko 3. Eri kosketuksellisten anturityyppien vahvuudet ja heikkoudet

	Termopari	Vastuslämpötila-anturi	Termistori
Lämpötila-alue	−267 ... + 2 316 °C	−240 ... + 649 °C	−100 ... + 500 °C
Tarkkuus	Hyvä	Paras	Hyvä
Lineaarisuus	Parempi	Paras	Hyvä
Herkkyys	Hyvä	Parempi	Paras
Kustannukset	Paras	Hyvä	Parempi

[9.]

3 Sähkökomponenttien lämpötila

Kun kappaletta lämmitetään, eli siihen tuodaan energiaa ja sen olomuoto pysyy vakiona, on sen lämpötilan kasvu verrannollinen tuodun energian määrään. Tämän lämmitävän energian ollessa sähkövirta ja mitattavien kappaleiden olomuotojen pysyessä vakiona, voidaan lämpötilan mittauksella päätellä virran voimakkuutta ja sen kulkua vastustavien kohteiden ominaisuuksia.

Klassinen lämmön määritelmä sisältää seuraavat neljä asiaa:

1. Se on jotakin joka voi muuttua joksikin termodynamiikan toisen lain mukaisesti.
2. Se on mitattava suure, joten sitä voidaan käsitellä matemaattisesti.
3. Sitä ei voida käsitellä aineena, koska se voi muuttua aineettomaksi, kuten mekaaniseksi työksi.
4. Se on yksi energian muoto. [10, s. 7.]

Lämmön moderneihin määritelmiin kuuluvat muun muassa seuraavat asiat:

- Lämpö on energiaa, joka siirtyy korkeamman lämpötilan systeemistä matalamman lämpötilan systeemiin [11].
- Lämpö on lämpötilaerojen aiheuttama spontaani energiavirta systeemistä toiseen [12, s. 18].

Termodynamiikan kannalta lämpö ei varastoidu systeemiin, vaan se on kuin työ, joka on vain olemassa energian siirtyessä systeemistä toiseen. Toisaalta jos systeemiin tuodaan energiaa lämpöenergian muodossa, se varastoituu atomien ja molekyylien liike- ja potentiaalienergiaksi. [13, s. 7.]

Mittaamalla sähkökomponenttien pintalämpötiloja, pyritään löytämään niiden suunnitellusta toiminnasta poikkeavia tilanteita. Tällaisia tilanteita ovat mm. virtateiden kohonneet resistanssit ja ylikuormitukset, esimerkiksi liitosongelman aiheuttama ylimenovastuksen lisääntyminen ja sitä kautta noussut lämpötila. Seuraavan Hartford Steam Boiler -vakuutusyhtiön taulukon (4) mukaan nimenomaan löystynyt liitos on yleisin syy sähkökomponenttien vikaantumiseen [14, s. 6].

Taulukko 4. Sähkökomponenttien vikaantumisten syitä

Lukumäärä	Vikaantumisen syy	Prosentuaalinen arvo
70	Liitos, huono / riittämätön	55,12 %
15	Komponenttien löystyminen	11,81 %
14	Materiaalien väsyminen	11,02 %
8	Ylikuormitus	6,30 %
5	Jäähdytys, huono / riittämätön	3,94 %
4	Bolting Stress, Improper	3,15 %
4	Ali-/ylijäännite	3,15 %
3	Riittämätön johdinpinta-ala	2,36 %
1	Riittämätön kapasiteetti	0,79 %
1	Korroosio	0,79 %
1	Suuntausvirhe	0,79 %
1	Tärinä	0,79 %

Lämpötiloja mitattaessa on otettava huomioon, että kappaleen lämpötilan muutos voi tapahtua sähkövirran vaikutuksen lisäksi myös seuraavilla tavoilla:

- **johtumalla**, jolla tarkoitetaan lämmön siirtymistä aineen sisällä.

Lämpö voi siirtyä johtumalla aineesta toiseen, mikäli aineet ovat kosketuksissa toisiinsa. Teknisesti tämä johtuminen kuvataan yleensä lineaarisena ilmiönä, jossa lämpövuoto q [W/m^2] kahden tason välillä on lämmönjohtavuuden k [W/m] ja tasojen välisen

etäisyyden l [m] osamäärä. On tosin otettava huomioon, että lämmönjohtavuus on materiaalin lämpötilan funktio, joten oletus lineaarisuudesta on jossain määrin näennäinen.

- **säteilemällä**, jolla tarkoitetaan energian siirtymistä säteilylähteestä kohteeseen.

Lämpösäteily on kappaleen pinnalta lähtevää sähkö-magneettista säteilyä, jonka teho on suoraan verrannollinen pinnan absoluuttisen lämpötilan neljänteen potenssiin ja riippuu myös pinnan säteilyominaisuuksista (ks. 2.2).

- **konvektiomalla**, jolla tarkoitetaan lämmön siirtymistä virtaavan aineen mukana.

Tästä on kyse esimerkiksi jäähdytettäessä kappaletta puhalluksen avulla, jolloin virtaava aine on puhallettava jäähdytysilma. [15, s. 10–34.]

Nämä lämmön siirtymistavat olisi ehdottomasti otettava huomioon arvioitaessa sähkövirran vaikutuksesta syntyneitä lämpötilaa jossain tietyssä sähkökomponentissa.

Liitosongelmat

Hapettuminen ja syöpyminen aiheuttavat liitoksissa ylimenoresistanssia ja äärimmäisessä tapauksessa heikentävät liitosmateriaaleja niin paljon, että liitoksessa tapahtuu läpisyöpyminen tai tärinän vaikutuksesta murtuminen. Ylimenoresistanssin kasvun johdosta hapettuneessa liitoksessa syntyy virran vaikutuksesta myös lämpöä, jonka havaitseminen olisi kunnossapidon kannalta tärkeää.

Liitosten hapettuminen johtuu yleensä ympäristötekijöiden vaikutuksesta, joita voi olla esimerkiksi ilman mukana kulkeutuvat aineet ja kosteus. Lisäksi liitoksen komponenttien ollessa eri metalleja, muodostavat ne metalliparin, joka myös voi aiheuttaa kemiallista syöpymistä liitospinnoille.

Johtimina ja liitosmateriaaleina yleisesti käytetty kupari hapettuu voimakkaasti jo pelkän ilmassa olevan hapen vaikutuksesta. Kaapelikenkien pinnoitusmateriaalina yleisesti

käytetty tina sen sijaan vaatii ilmassa hapettuakseen korkeita lämpötiloja tai kemikaaleja, kuten bromia tai klooria [16].

3.1 Kuormituksen ja sen muutoksen vaikutus lämpötilaan

Kaikissa johtimissa, liitoksissa ja tehoa kuluttavissa komponenteissa, pois lukien suprajohtimet, esiintyy resistanssia, joten niiden läpi kulkeva sähkövirta aiheuttaa niissä lämpenemistä. Ohmin lain avulla muodostetusta tehon kaavasta (5) huomataan, että tämä teho kasvaa neliöllisesti virran kasvaessa.

$$\left. \begin{array}{l} P = UI \\ U = RI \end{array} \right\} \rightarrow P = I^2 R, \text{ jossa} \quad (5)$$

P	sähköteho	$[W]$
U	jännite	$[V]$
I	virta	$[A]$

Sähkökomponenteissa tämä teho siirtyy lähes yksinomaan lämpötehoksi, joten kohteen lämpötilasta ja sen läpi kulkevasta virrasta voidaan päätellä sen resistanssi ja sitä kautta arvioida komponenttien kuntoa.

3.1.1 Lämpötilojen tulkinta

Mitattaessa sähkökomponenttien lämpötilaa, on kuormitustilanteen tiedostaminen ensisijaisen tärkeää. Koska kuormitusvirta vaikuttaa neliöllisesti lämmittävään tehoon, on pienelläkin virran muutoksella suuri vaikutus lämpötilaan. Jos sähkökomponentin lämpötilamittaus suoritetaan nimelliskuormitusta pienemmällä kuormalla, olisi mitattu lämpötila-arvo suhteutettava senhetkiseen kuormitustilanteeseen.

Mitattaessa jonkin tietyn sähkökomponentin tai -laitteiston lämpötiloja, olisi sen lämpötilakäyttäytyminen oltava tiedossa. Yksittäisestä kohteesta mitattu lämpötilan arvo ei anna minkäänlaista kuvaa sen kuormitustilanteesta tai mahdollisesta virhetoiminnasta, jos tälle arvolle ei ole vertailukohtaa.

Suurempia laitekokonaisuuksia tarkastellessa olisi myös otettava huomioon, että mahdollinen kohonnut lämpötila ei välttämättä kerro juuri kyseisen pisteen virhetoiminnasta, vaan voi johtua muun laitteiston osan viasta. Puhuttaessa sähkölaitteistoista, voi tällainen kohonnut lämpötila johtua esimerkiksi kyseisen laitteiston osan ylikuormituksesta, jolloin myös muiden laitteiston osien matala lämpötila voi yhtälailla paljastaa saman ongelman lähteen. Ongelman ei kuitenkaan tarvitse välttämättä sijaita kummasakaan näistä tarkasteltavista kohteissa, vaan esimerkiksi laitteiston syöttämissä komponenteissa.

3.1.2 Lämpötilarajojen määrittely

Sähkökomponentin lämpötilaa voidaan verrata joko ympäristön lämpötilaan tai arvioida lämpötilaeroja samanlaisten komponenttien välillä. Kolmivaihejärjestelmä tarjoaa hyvän mahdollisuuden tarkastella eri vaiheiden välisiä lämpötilaeroja, jolloin esimerkiksi yhden vaiheen kuormitus- tai liitosongelmat on yksinkertaista havaita. Usein onkin hyödyllisempää vertailla mitattuja lämpötiloja toisiinsa, kuin vetää johtopäätöksiä kohteen absoluuttisesta lämpötilasta.

Eri standardeissa ja ohjeistuksissa on määritelty erinäisiä lämpötilarajoja sähkökomponenteille, joita voidaan pitää perustana mitatuista lämpötiloista tehtäville johtopäätöksille. Yksi yleisimmin käytetty taulukko perustuu Yhdysvaltain standardoimislaitos NETAn (*International Electrical Testing Association*) laatimaan ohjeistukseen sähkölaitteistojen tarkastuksesta (taulukko 5).

Taulukko 5. Lämpötilarajoja

Lämpötilaero (ΔT) samanlaisten komponenttien välillä yhtä suuren kuormituksen alaisena	Lämpötilaero (ΔT) samanlaisten komponenttien ja ympäristön lämpötilan välillä	Suosittelava toimenpide
1 °C - 3 °C	0 °C - 10 °C	Mahdollinen ongelma; tilanteen seuraaminen suositeltavaa
4 °C - 15 °C	11 °C - 20 °C	Todennäköinen ongelma; korjattava tilanteen salliessa
-	21 °C - 40 °C	Seurattava jatkuvasti kunnes korjaustoimenpiteet voidaan suorittaa
> 16 °C	> 40 °C	Erittäin todennäköinen ongelma; korjattava heti

Edellinen taulukko (ks. edell. s) on kuitenkin karkea yleistys, eikä sovellu mitattujen lämpötilojen arviointiin kaikissa tilanteissa. Esimerkiksi moottorinsuojakytkimien, oikosulkumoottorien, tehpuolijohteiden, ym. nimelliskuormitustilanteiden nimellislämpötilat voivat helposti olla kymmeniä asteita ympäristön lämpötilaa korkeampia. Lämpötilojen vertailu yhtä suuren kuormituksen alaisena olevien samanlaisten komponenttien välillä kertoo mahdollisista ongelmatilanteista huomattavasti paremmin. [17, s. 1–2.]

3.1.3 Kolmivaihe-epäsymmetria

Virran kolmivaihe-epäsymmetria eli vinokuormitus voi aiheutua esimerkiksi tilanteessa jossa yksivaiheisia kuormia on kytketty epätasaisesti vaiheiden kesken. Puhtaasti kolmivaiheisien kuormien tapauksessa se yleensä tarkoittaa jonkin syötetyn laitteen epänormaalia toimintaa.

Jos syötetyt komponentit ovat pääasiassa epätahtimoottoreita, voi virtojen epäsymmetrian aiheuttaa jännitesyötön epäsymmetria tai moottorin käämityksissä oleva vika. Epätahtimoottori on hyvin herkkä syöttöjännitteen epäsymmetrialle ja pienikin jännite-epäsymmetria aiheuttaa suuren virtaepäsymmetrian. Jännite-epäsymmetrian dU ollessa esimerkiksi 2 %, voi moottorin lämpenemä olla 7 ... 12 % korkeampi.

Virtaepäsymmetria aiheuttaa epätahtimoottorissa varsinkin roottorin lämpötilan nousua ja lämpöjakauman muutosta staattorin vaihekäämien keskinäisten lämpötilajakaumien muutoksen kautta. Jännite-epäsymmetrian, ja sitä kautta virtaepäsymmetrian, ollessa jatkuvasti yli 1 % on kuormituksen pienentämistä harkittava jotta välttyttäisiin yllilämpenemisen aiheuttamalta moottorivauriolta. [18, s. 10–11.]

Perinteisesti virtojen epäsymmetria saadaan selville mittaamalla vaihevirtojen tehollisarvot, mutta koska virtojen erot aiheuttavat myös syöttökomponenteissa lämpötilaeroja, voidaan epäsymmetria havaita myös lämpötilanmittauksen avulla.

Virtojen vaihe-epäsymmetrian prosentuaalinen arvo $\lambda_{\%}$ määritellään laskemalla pienimmän tai suurimman vaihevirran erotus virtojen keskiarvoon ja suhteuttamalla se virtojen keskiarvoon. Tämä esitetään kaavassa 6 (ks. seur. s).

$$\lambda_{\%} = \frac{\pm I_{max,min} - \frac{I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}}{3}}{\frac{I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}}{3}} \cdot 100 \% , \text{ jossa} \quad (6)$$

$I_{max,min}$ pienin tai suurin vaihevirran arvo [A]

I_{L1}, I_{L2}, I_{L3} vaihevirrät [A]

Seuraavassa laskuesimerkissä esitetään tilanne, jossa vaihevirrät I_{L1}, I_{L2} ovat 10 A ja vaihevirta I_{L3} on 8 A:

$$\lambda_{\%} = \frac{\pm 8 \text{ A} - \frac{10 \text{ A} + 10 \text{ A} + 8 \text{ A}}{3}}{\frac{10 \text{ A} + 10 \text{ A} + 8 \text{ A}}{3}} \cdot 100 \% = 14,3 \%$$

Kolmivaihe-epäsymmetria aiheuttaa nelijohtojärjestelmissä nollajohtimeen kolmannen yliaallon taajuista virtaa. Hyvin epäsymmetrisissä tilanteissa tämä virta voi olla jopa 1,7-kertainen vaihevirtoihin verrattuna, joka on jo erittäin helposti havaittavissa lämpötilamittauksen avulla. [19, s. 29–30]

Nollajohtimeen syntyvän virran arvo lasketaan tähtikytketyissä nelijohtojärjestelmissä kaavan 7 mukaisesti.

$$\underline{I}_N = (\underline{I}_{L1} \angle \varphi_{L1}) + (\underline{I}_{L2} \angle \varphi_{L2}) + (\underline{I}_{L3} \angle \varphi_{L3}) , \text{ jossa} \quad (7)$$

\underline{I}_{Li} vaihevirran itseisarvo [A]

φ_{Li} virran vaiheensiirtokulma [°]

Jos oletetaan vaiheensiirtokulmien olevan symmetrisiä, aiheuttaa edellisessä laskuesimerkissä käytetty 14,3 % suhteellinen kolmivaihe-epäsymmetria nollajohtimeen virran:

$$\underline{I}_N = (10 \text{ A} \angle 0^\circ) + (10 \text{ A} \angle 120^\circ) + (8 \text{ A} \angle -120^\circ) = 2 \text{ A} \angle -60^\circ$$

3.1.4 Resistiivisyys

Sähköjohteiden resistiivisyys p muuttuu lämpötilan muuttuessa, joten komponenttien käyttäytymistä eri lämpötiloissa voi olla vaikea ennustaa. Resistiivisyys, eli ominaisvastus kuvaa aineen sähkönjohtavuutta ja sen avulla voidaan laskea johtimen resistanssi R kaavan 8 mukaisesti.

$$R = \frac{pl}{A}, \text{ jossa} \quad (8)$$

p	resistiivisyys	$[\Omega m]$
l	johtimen pituus	$[m]$
A	johtimen pinta-ala	$[m^2]$

Standardin IEC60034-1 mukaisesti sähköjohtimen resistanssin muutos lämpötilan muuttuessa on laskettavissa kaavan 9 mukaan.

$$R_2 = \frac{T_2 + k}{T_1 + k} \cdot R_1, \text{ jossa} \quad (9)$$

R_1	alkuresistanssi	$[\Omega]$
R_2	loppuresistanssi	$[\Omega]$
T_1	alkulämpötila	$[K]$
T_2	loppulämpötila	$[K]$
k	lämpöresistanssi	$\left[\frac{W}{K}\right]$

$k = 235$ kuparille

$k = 225$ alumiinille

Tästä voidaan päätellä, että resistanssin muutos on sidoksissa sekä johtimen materiaalille ominaiseen lämpöresistanssiin eli resistiivisyyden lämpötilakertoimen käänteislukuun että alkulämpötilaan. [20, s. 79.]

Esimerkkitalanne: 10Ω kuparijohtimen resistanssin muutos lämpötilan muuttuessa $40 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 60 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$R_2 = \frac{60 \text{ }^\circ\text{C} + 235}{40 \text{ }^\circ\text{C} + 235} \cdot 10 \Omega = 10,73 \Omega$$

3.1.5 Taajuusriippuvuus ja yliaallot

Vaihtovirtajärjestelmissä on resistanssin sijasta otettava huomioon impedanssi Z , koska se on taajuusriippuvainen suure. Impedanssin koostuessa resistanssin lisäksi vahvasti taajuusriippuvaisista kapasitiivisesta ja induktiivisesta reaktanssista, muuttuu sen arvo taajuuden muuttuessa. Tämä esitetään kaavoissa 10 - 13.

$$\text{impedanssi:} \quad Z = R + jX \quad (10)$$

$$\text{impedanssin itseisarvo:} \quad |Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (11)$$

$$\text{induktiivinen reaktanssi:} \quad X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (12)$$

$$\text{kapasitiivinen reaktanssi:} \quad X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (13)$$

, joissa	R	resistanssi	$[\Omega]$
	f	taajuus	$\left[\text{Hz} = \frac{1}{\text{s}} \right]$
	$\omega = 2\pi f$	kulmataajuus	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$
	L	induktanssi	$[H]$
	C	kapasitanssi	$[F]$.

Taajuusriippuvuudesta johtuen myös vaihtovirran yliaaltoisuus vaikuttaa sähköjohtimien lämpenemiseen. Vaihtovirtapiirien yliaaltoisuutta aiheuttavat pääasiassa komponentit, joiden virran käyrämuoto on muuta kuin puhdasta verkon syöttötaajuista siniaaltoja. Tällöin voidaan ajatella virran olevan muodostunut useista eritaajuisista siniaalloista Fourier-analyysin mukaisesti. Eri yliaaltojen yhteisvaikutuksesta käytetään nimitystä THD (*Total Harmonic Distortion*) -arvo ja sen määrittely esitetään kaavassa 14 (ks. seur. s).

$$THD = \frac{I_2 + I_3 + I_4 + \dots + I_\infty}{I_1} = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_N}{I_1}, \text{ jossa} \quad (14)$$

I_1 on virran perusaalto, jonka taajuus on esimerkiksi 50 Hz. Tällöin virtojen I_{1+N} taajuudet ovat tämän perusaaltovirran taajuuden kerrannaisia, esimerkiksi $f_{I_3} = f_{I_1} \cdot 3 = 50 \text{ Hz} \cdot 3 = 150 \text{ Hz}$.

THD-arvo on siis suhteellisarvo, joka kertoo kuinka suuri osa mitatusta virrasta on muuta kuin nimellistaajuista virtaa. Yleisimmät virtojen yliaaltojen järjestysluvut ovat parittomia, niiden järjestyslukujen ollessa 3, 5, 7, jne. Nämä tarkoittavat 50 Hz:n nimellistaajuisessa verkossa yliaaltoja taajuuksilla 150 Hz, 250 Hz, 350 Hz, jne.

Kaikkein haitallisin yliaaltoihin liittyvä ilmiö on niiden sähköverkoissa aiheuttamat resonanssit. Resonanssi syntyy, kun jonkin yliaallon taajuus on lähellä verkon resonanssitaajuutta. Tällöin yliaaltovirrat ja -jännitteet saattavat olla moninkertaisia normaaliin tilanteeseen nähden. Tämä resonanssitaajuus voidaan laskea kaavalla 15.

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \text{ jossa} \quad (15)$$

L	induktanssi	[H]
C	kapasitanssi	[F]

Yliaallot aiheuttavat suoran lämmittävän vaikutuksensa lisäksi myös muita ongelmia tietyissä sähkökomponenteissa. Tällaisia komponentteja ja niissä aiheutuvia ongelmia ovat mm.:

- *suuntaajat*: verkkokommutoitujen suuntaajien ohjaskulmavirheet
- *kompensointikondensaattorit*: lämpöhäviöiden kasvu ja perusaallon kompensoinnin vaikeutuminen
- *muuntajat*: tyhjäkäynti- ja virtalämpöhäviöiden kasvu
- *moottorit*: virtalämpöhäviöiden kasvu, heilurimomenttien sekä tärinä- ja ääni-ilmiöiden synty.

Yliaallot heikentävät lisäksi komponenttien tehokerrointa ja aiheuttavat häviöitä voimansiirtoverkoissa. Niiden on myös todettu heikentävän joidenkin katkaisijoiden katkaisukykyä. [18, s. 22–30.]

3.1.6 Aikariippuvuus ja jaksottainen kuormitus

Kuormituksen aiheuttama lämpötilan muutos komponenteissa on aikariippuvainen suure ja kuormitusvirran muuttuessa lämpötilojen tasaantuminen vie aikaa. Koska ideaalitalanteessa kappaleen lämpenemis- ja jäähtymisnopeus on Newtonin jäähtymislain mukaan verrannollinen kappaleen ja ympäristön lämpötilaeroon, tapahtuu lämpötilamuutokset epälineaarisella nopeudella. Tämä esitetään kaavassa 16.

$$T(t) = \frac{dT}{dt} = -K(T - T_{AMB}) , \text{ jossa} \quad (16)$$

$\frac{dT}{dt}$	lämpötilan derivaatta ajan suhteen	
K	kokeellinen vakio (lämmönjohtavuus)	$\left[\frac{W}{Km}\right]$
T	kappaleen lämpötila	$[K]$
T_{AMB}	ympäristön lämpötila	$[K]$

Määrittelemällä sähkökomponenteille lämpötila-aikavakiot, voidaan niiden luotettavaan loppulämpötilan arviointiin tarvittava kuormitusaika määritellä. Lämpöaikavakio τ on ajan pituus, jossa lämpötilan muutoksesta on tapahtunut n. 63 %. Yleisessä tapauksessa sähkökomponentin lämpeneminen käyttäytyy käänteisen eksponenttifunktion tavoin, jolloin ajan $4 \cdot \tau$ kuluttua voidaan yleisesti katsoa loppulämpenemä saavutetuksi. [21; 22, s. 6.]

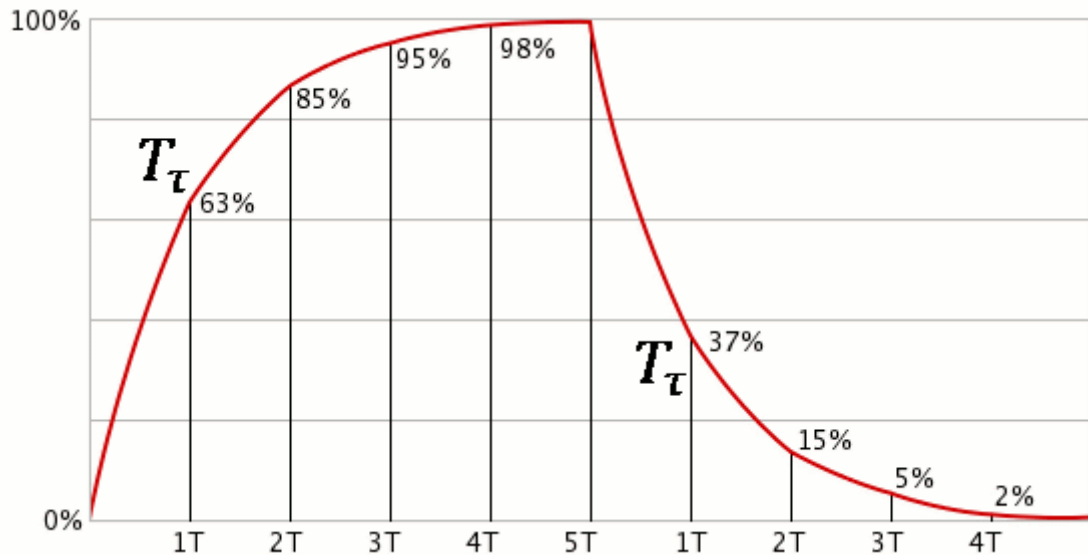
Laskennallisesti aikavakion määrittelemät lämpötilan arvot lämpenemälle ja jäähtymiselle voidaan esittää seuraavasti (kaavat 17 ja 18):

$$T_{\tau, \text{lämpenemä}} = T_{\text{alku}} + \Delta T \cdot (1 - e^{-1}) \quad (17)$$

$$T_{\tau, \text{jäähtyminen}} = T_{\text{loppu}} - \Delta T \cdot (1 - e^{-1}) , \text{ joissa} \quad (18)$$

$$(1 - e^{-1}) \approx 0,632 \approx 63 \%$$

Tilanne esitetään graafisesti kuvassa 10.



Kuva 10. Aikavakion graafinen esitys

Kappaleen aikavakion pituus voidaan myös laskea suoraan fysikaalisten suureiden avulla kaavan 19 mukaisesti.

$$\tau = \frac{\rho \cdot c \cdot V}{h \cdot A} = \frac{C \cdot V}{h \cdot A}, \text{ jossa} \quad (19)$$

ρ	tiheys	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$
c	ominaislämpökapasiteetti	$\left[\frac{\text{J}}{\text{K}} \right]$
V	tilavuus	$[\text{m}^3]$
h	lämmönsiirtymiskerroin	$\left[\frac{\text{W}}{\text{K m}^2} \right]$
A	pinta-ala	$[\text{m}^2]$
C	lämpökapasiteetti	$\left[\frac{\text{J}}{\text{K}} \right]$

, josta voidaan päätellä että suuret massat ja lämpökapasiteetit johtavat hitaisiin lämpötilanmuutoksiin, kun taas laajat pinnan alat ja hyvä lämmönsiirtymiskyky nopeuttavat lämpötilan muutoksia. [23.]

Kappaleen lämpeneminen ja jäähtyminen noudattaa aina samaa käänteisen eksponenttifunktion käyrämuotoa riippumatta alkulämpötilasta, jos lämmittävän tai jäähdyttävän energian määrä pysyy vakiona. Tällöin siis minkä tahansa alkulämpötilan ja loppulämpötilan erotuksesta ΔT on samalla ajan hetkellä tapahtunut yhtä suuri osa.

Hetkellinen lämpötila voidaan siis myös laskea millä tahansa ajan hetkellä, vaikka kuormituksen kestoaika on aikavakion määrittelemää aikaa suurempi tai pienempi. Tämä johtaa myös siihen, että tunnettaessa loppulämpötila jollain muulla kuin aikavakion määrittämiseen käytetyllä teholla tai tunnetaan näiden tehojen suhde, voidaan hetkellinen lämpötila laskea millä tahansa ajan hetkellä. Nämä tilanteet esitetään kaavoissa 20 ja 21.

Kappaleen lämpötila T ajanhetkellä t kun tunnetaan alkulämpötila ja lämpöaikavakio:

$$T = T_{AMB} + (T_L - T_A)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \text{ jossa} \quad (20)$$

T_{AMB}	ympäristön lämpötila	[K]
T_A	alkulämpötila	[K]
T_L	loppulämpötila	[K]
τ	aikavakio	[s]

Esimerkkitalanne: Komponentin lämpöaikavakio on määritetty kokeellisesti sen nimellisteholla, jolloin lämpötilan alku- ja loppulämpötilojen erotus oli 27 °C ja aikavakio 700 sekuntia. Halutaan määrittää komponentin loppulämpötila ympäristön lämpötilan ollessa 50 °C ja nimellisen kuormituksen kestäessä 300 sekuntia:

$$T = 50\text{ °C} + 27\text{ °C} \cdot \left(1 - e^{-\frac{300}{700}}\right) \approx 59,4\text{ °C}$$

Kappaleen lämpötila ajan hetkellä T_2 kun tunnetaan jonkin muun lämmittävän tai jäähdyttävän tehon aiheuttama loppulämpötila:

$$T_2 = T_{L1} + (T_{L1,L2})(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \text{ jossa} \quad (21)$$

T_{L1}	loppulämpötila 1	[K]
$T_{L1,L2}$	loppulämpötilojen ero ΔT	[K]

Esimerkkutilanne: 300 sekunnin lämpöaikavakion omaava komponentti lämmitetään nimelliskuormituksellaan 70 °C loppulämpötilaan, jonka jälkeen sitä kuormitetaan 120 °C loppulämpötilan aiheuttavalla kuormituksella 100 sekuntia:

$$T_2 = 70 \text{ °C} + 50 \text{ °C} \left(1 - e^{-\frac{100}{700}}\right) \approx 77,7 \text{ °C}$$

Kappaleen lämpötilan muutos on myös suoraan verrannollinen sitä lämmittävään tai jäädyttävään tehoon ja lämpöresistanssiin, jolloin loppulämpötilan arvoa ei tarvitse kokeellisesti osoittaa kuin yhdellä teholla. Tätä kautta myös tietyn loppulämpötilan aiheuttava teho on määriteltävissä lämpötilan muutoksen kautta. Tämä osoitetaan kaavassa 22.

$$\Delta T = Q \cdot R_{\theta} , \text{ jossa} \quad (22)$$

Q	lämpövuoto (teho)	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
R_{θ}	lämpöresistanssi	$\left[\frac{K}{W}\right]$

Tunnettaessa kappaleen loppulämpötila jollain tietyllä teholla, voidaan tällöin myös määritellä sen lämpöresistanssi. Lämpöaikavakio on suoraan verrannollinen kappaleen lämpöresistanssiin ja lämpökapasiteettiin, jolloin se pystytään määrittelemään myös laskennallisesti kaavan 23 mukaisesti:

$$\tau = R_{\theta} \cdot C , \text{ jossa} \quad (23)$$

τ	aikavakio	[s]
R_{θ}	lämpöresistanssi	$\left[\frac{K}{W}\right]$
C	lämpökapasiteetti	$\left[\frac{J}{K}\right]$

Tästä johtuen kappaleen jäähtymis- ja lämpöaikavakiot ovat teoriassa yhtä suuret, jos ympäristön ja kappaleen välinen lämpöresistanssi pysyy vakiona.

Esimerkkitalanne: Kappaleen lämpökapasiteetti on $380 \text{ J}/^\circ\text{C}$ ja se lämpenee 15 W :n teholla $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Mikä on sen lämpöaikavakio?

$$\tau = R_\theta \cdot C = \frac{\Delta T}{Q} \cdot C = \frac{30 \text{ }^\circ\text{C}}{15 \text{ W}} \cdot 380 \frac{\text{J}}{^\circ\text{C}} = 760 \text{ s}$$

[24; 25; 26, s. 1.]

Tästä johtuen myös jaksottaisen kuormituksen aiheuttama lämpötilamuutos on lasketavissa, kun sekä lämpenemis- ja jäähtymisaikavakiot tunnetaan. Tätä tietoa voidaan hyödyntää esimerkiksi tilanteissa, joissa tutkittavia sähkökomponentteja ei pystytä kuormittamaan tarpeeksi suurella virralla ja niiden kuormana on oikosulkumoottoreita tai muita suuren käynnistysvirran omaavia komponentteja. Aiheuttamalla kuormitustilanne peräkkäisillä käynnistystilanteilla, saadaan keskimääräinen lämmitysteho aikatasossa suuremmaksi. Tämä kuitenkin vaatii kuormitusvirran mittausta esimerkiksi integroivalla mittalaitteella, jotta tämän tehon arvo voidaan määritellä.

Oikosulkumoottorin käynnistysvirran arvona pidetään likimain seitsemänkertaista arvoa sen nimelliseen virtaan nähden. Esimerkiksi 10 ampeerin käynnistysvirta vastaa nimellisvirraltaan noin $1,4 \text{ ampeerin}$ oikosulkumoottoria, jonka nimellisteho on tällöin:

$$P_N = \sqrt{3} \cdot I_N \cdot U_N = \sqrt{3} \cdot 1,4 \text{ A} \cdot 400 \text{ V} \approx 1 \text{ kW}$$

Jos oikosulkumoottorin staattorikämmien resistanssin oletetaan pysyvän vakiona, aiheuttaa seitsemänkertainen käynnistysvirta siihen n. 50-kertaisen lämpövaikutuksen nimellisvirtaan ja -toimintapisteeseen nähden (ks. 3.1). Oikosulkumoottorin roottorissa käynnistystilanteen vaikutus vielä korostuu, koska roottorin ja staattorin muodostaman pyörivän sähkökentän välinen taajuusero on huomattavasti suurempi nimellistoimintapisteeseen nähden. Tämä johtaa roottorin impedanssin muutoksen kautta vielä suurempaan suhteelliseen lämpenemään.

Tässä tuloksessa kuitenkin oletetaan, että moottorin ottama virta olisi joka kuormitusjaksossa sen käynnistysvirran suuruinen. Tämä ei käytännössä aina vastaa todellisuutta, koska tyhjäkäyvä oikosulkumoottori ottaa suurimman käynnistysvirran arvonsa vain hyvin lyhyen ajan. Jos moottoriin on mekaanisesti kytketty suuria huimamassoja, kasvaa sen ottama nimellisvirta suuremman virran kesto aika ja suurempaa kuormitus tilannetta on helpompi mallintaa.

Kuormituksen jaksottaisuus kuitenkin aiheuttaa epälineaarisuutta epästaattisissa komponenteissa, joissa kuormitusvirran muutos tai sen jaksottainen ohjaaminen aiheuttaa fyysisiä muutoksia. Tällaisia komponentteja ovat esimerkiksi päävirran ohjauskontaktorit, joissa virran ohjauksen muutostila aiheuttaa lyhytkestoisen (ja kuumen) valokaaren, tai moottorinsuojakytkin, jossa bi-metalliliuskat muuttavat asentoaan kuormitusvirran lämmittävän vaikutuksen johdosta. Myös oikosulkumoottoreiden jäähtytys on usein toteutettu suoraan moottorin akselille kiinnitetyn tuulettimen avulla, jolloin lämpenemis- ja jäähtymisaikavakiot eivät ole samansuuruisia.

Jos kuitenkin oletetaan lämpenemis- ja jäähtymisaikavakiot sekä kuormitus- ja jäähtymisajanjaksot samansuuruisiksi, voidaan myös jaksottaisen kuormituksen aiheuttama lämpötilan muutos komponentissa olettaa olevan yhtä suuri kuin jatkuvalla kuormitus teholla, joka on puolet kuormitusjakson tehosta. Jaksottainen kuormitus ei siis vaikuta lämpenemiskäyrän muotoon tai aikavakioon, vaan ainoastaan saavutettavaan loppulämpötilaan (käyrän korkeuteen). Tämä esitetään kaavassa 24.

$$\Delta T_{\text{jaksottainen}} = \Delta T_{\text{suora}} \cdot \left(\frac{P_1}{P_2} \right), \text{ jossa} \quad (24)$$

P_1 jaksottaisen kuormituksen teho [W]

P_2 suoran kuormituksen teho [W]

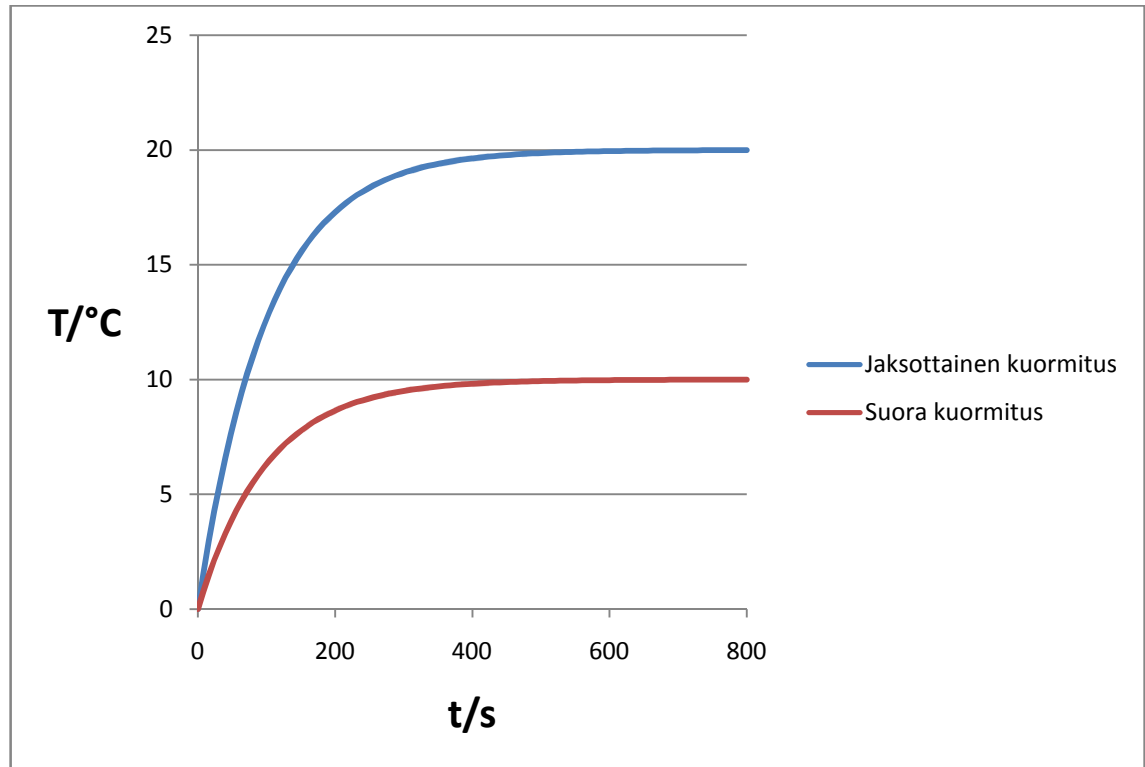
Kuvassa 11 (ks. seur. s.) esitetään tilanne, jossa samaa komponenttia kuormitetaan jaksottaisesti nelinkertaisella teholla suoraan kuormitukseen nähden. Kuvassa käytettyjen suureiden arvot esitetään kuvan yläpuolella.

$$T_{ALKU} = 0 \text{ °C}$$

$$\tau = 100 \text{ s}$$

$$T_{LOPPU,P_1} = 10 \text{ °C}$$

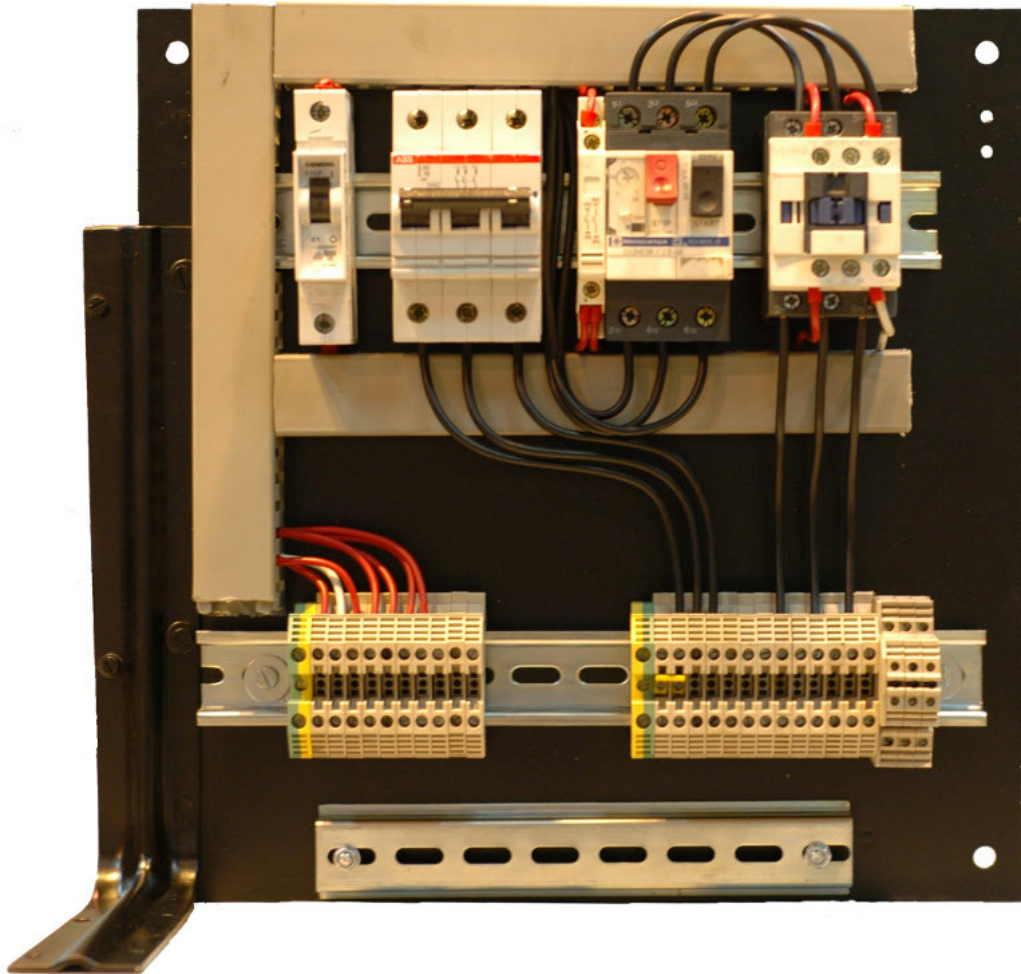
$$P_1 = 4P_2 \rightarrow T_{LOPPU,P_2} = 20 \text{ °C}$$



Kuva 11. Jaksottaisen kuormituksen vaikutus

3.2 Koejärjestelyillä saadut tulokset

Edellisissä osioissa teoreettisesti käsitellyjä asioita pyrittiin mallintamaan kokeellisesti koejärjestelyiden avulla mittaamalla sähkökomponenttien pintalämpötiloja erilaisissa kuormitustilanteissa. Koelaitteistossa käytetyt komponentit ja niiden kytkentä mallinsivat yksinkertaista moottorilähtöä sisältäen sekä ohjaus- että päävirtapiirit. Laitteistoa syötettiin kolmivaiheisena jakeluverkon nimellisillä arvoilla (230/400 V, 50 Hz), ohjausvirtapiirin toimiessa vaihejännitteellä. Sähkökomponentit olivat asennettu kojelevylle asennuskiskojen avulla ja niiden johdotukset olivat koteloitu johtokouruihin. Kojelevy oli maalattu mattamustaksi, jotta välttyttiin lämpösäteilyn heijastumiselta lämpökameramittauksissa. Kuva laitteistosta esitetään kuvassa 12 (ks. seur. s.), ja piirikaavio sekä osasijoittelukuva liitteessä 1.



Kuva 12. Koelaitteisto

Koelaitteistolla tutkitut komponentit ja niiden ominaisuudet esitetään taulukossa 6.

Taulukko 6. Tutkittavat komponentit

	Valmistaja	Tyyppi
Riviliittimet	Weidmuller	VDU4
Johtimet	Reka	MK 2,5
Johdonsuojakatkaisija	ABB	S 253, C10
Moottorinsuojakytkin	Telemecanique	GV2-ME14
Kontaktori	Telemecanique	LC1-12P7

Komponenttien pintalämpötilojen mittaamiseen käytettiin lämpökameran lisäksi komponenttien pintaan kaksikomponenttiepoksilla kiinnitettyjä K-tyyppin termopareja, joiden mittausarvot rekisteröitiin hybriditallentimella. Ympäristön lämpötila mitattiin identtisesti termoparilla koelaitteiston läheisyydestä. Laitteiston kuormittamiseen käytettiin

symmetristä kolmivaiheista tehovastusta ja kuormitusvirran mittaamiseen kolmivaihe-tehoanalysaattoria. Käytetyt mittalaitteet esitetään taulukossa 7.

Taulukko 7. Käytetyt mittalaitteet

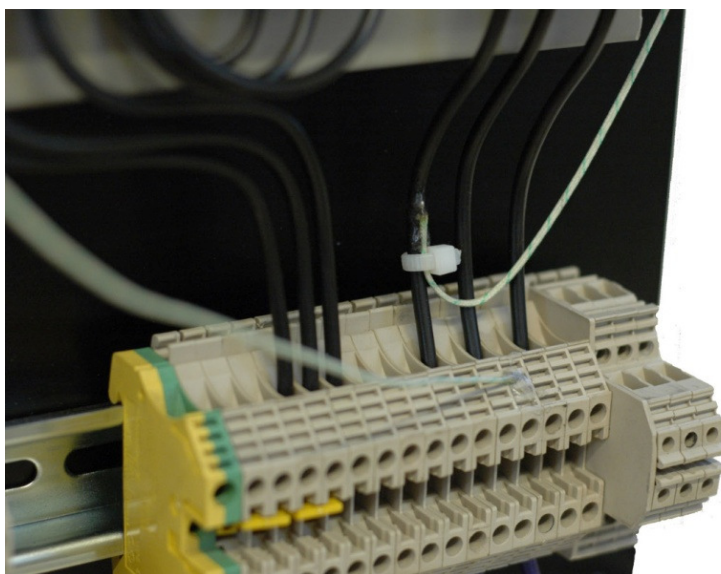
	Valmistaja	Malli
Hybriditalennin	HIOKI	3193
Tehoanalysaattori	Yokogawa	DR 130
Termoparit, tyyppi K	Roth+Co.	9.101

Mittauksissa käytetyt termoparit olivat kiinnitetty koelaitteistossa taulukon 8 mukaisiin pisteisiin.

Taulukko 8. Käytetyt mittauspisteet

Mittauspiste	Paikka
1	Johdin
2	Johdonsuojakatkaisija
3	Riviliitin
4	Kontaktorin sivu
5	Kontaktorin pinta
6	Moottorinsuojakytkin
7	Ympäristö

Esimerkki termoparien kiinnityksestä esitetään kuvassa 13.



Kuva 13. Esimerkki termoparien kiinnityksestä

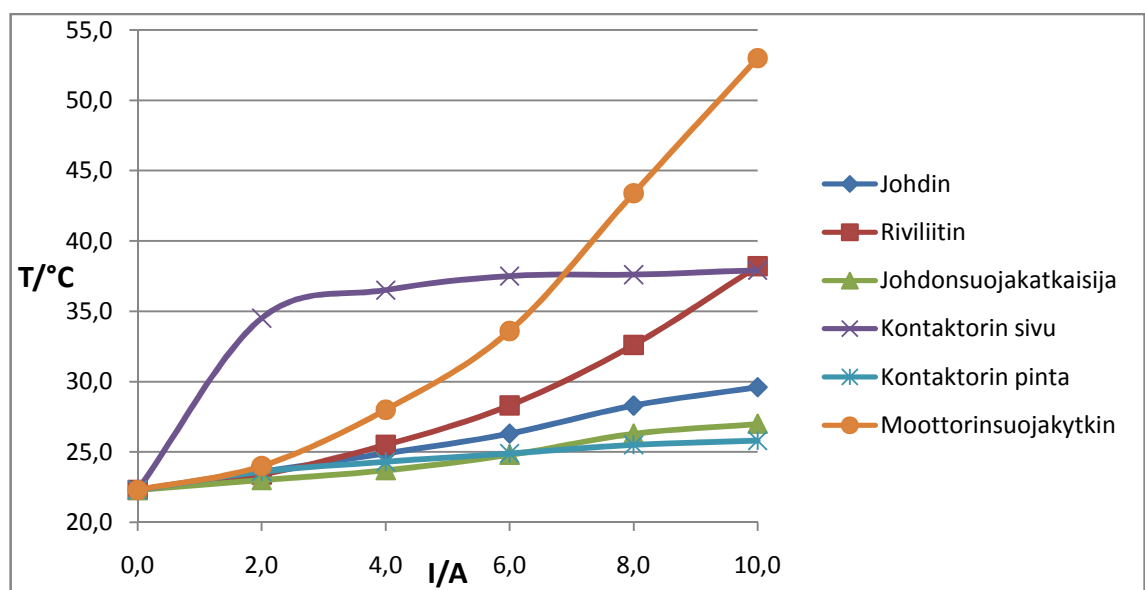
3.2.1 Lämpötila kuormituksen funktiona

Koejärjestelyn avulla tutkittiin mittauspisteiden saavuttamia loppulämpötiloja eri kuormitusvirtojen avulla. Loppulämpötila katsottiin saavutetuksi, kun lämpötilan nousu oli hidastunut tasolle $0,1 \text{ }^\circ\text{C}/5 \text{ min}$. Mittaustulokset esitetään taulukossa 9.

Taulukko 9. Komponenttien loppulämpötilat

	Johdin	Riviliitin	Johdonsuojakatkaisija	Kontaktorin sivu	Kontaktorin sivu	Moottorinsuojakytkin
I/A	Max. lämpötila / °C					
0,0	22,3	22,3	22,3	22,3	22,3	22,3
2,0	23,6	23,4	23,0	34,5	23,6	24,0
4,0	24,9	25,5	23,7	36,5	24,3	28,0
6,0	26,3	28,3	24,8	37,5	24,9	33,6
8,0	28,3	32,6	26,3	37,6	25,5	43,4
10,0	29,6	38,2	27,0	37,9	25,8	53,0

Kuvassa 14 esitetään graafisesti eri komponenttien saavuttamat loppulämpötilat kuormitusvirran funktiona.



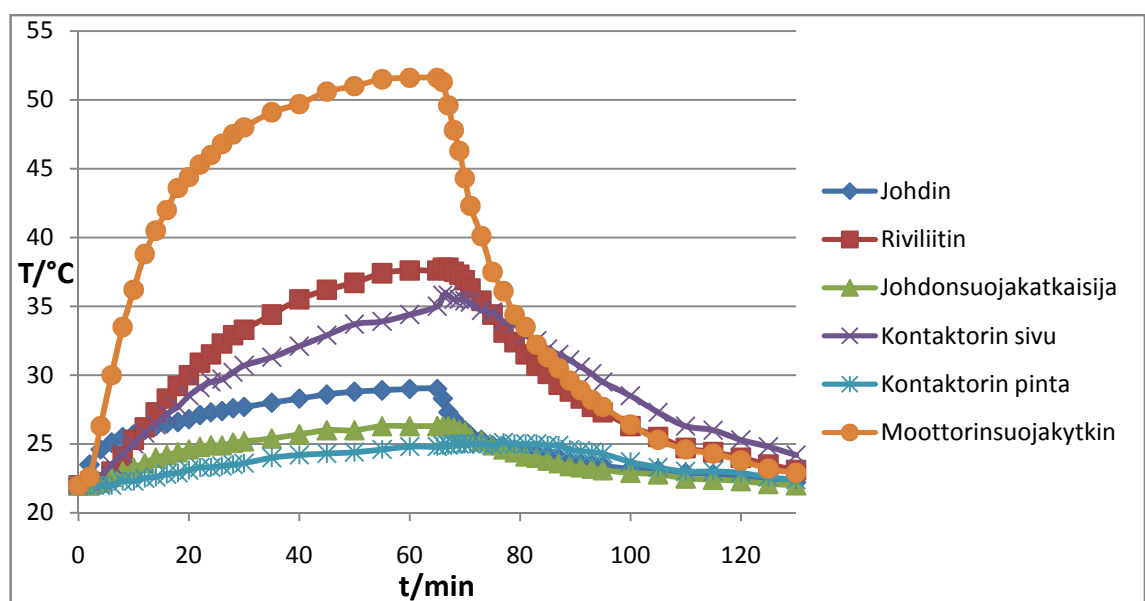
Kuva 14. Komponenttien loppulämpötilat eri kuormitusvirran arvoilla

Eri mittauspisteiden käyrämuodoista havaitaan, että neliöllinen lämpötilan nousu kuormitusvirran funktiona ei toteudu kuin riviliittimen ja moottorisuojakytkimen pintalämpötiloissa. Kontaktorin sivussa olevan mittauspisteiden käyrämuodon selittää kontaktorin kelan aiheuttaessa siihen huomattavasti kuormitusvirtaa suuremman lämmittävän vaikutuksen. Muut mittauspisteet käyttäytyvät lähes lineaarisesti kuormitusvirran funktiona, mikä selittyy kuormitusvirran heikosta vaikutuksesta kyseiseen mittauspisteeseen sekä lämpötilan noustessa lämmön tehokkaammalla siirtymisellä pois kohteesta.

Verrattaessa komponenttien nimelliskuormitustilanteiden loppulämpötiloja lämpötilarajataulukkoissa (ks. 3.1.2) esitettyihin arvoihin huomataan, että lähes kaikki mittauspisteet ylittävät mahdollisen ongelman lämpötilarajan ($\Delta T > 10\text{ °C}$). Näiden lisäksi riviliittimen, kontaktorin sivun ja moottorisuojakytkimen mittauspisteet ylittävät todennäköisen ongelman lämpötilarajan ($\Delta T > 20\text{ °C}$). Tämä vahvistaa tehdyn oletuksen, että kyseiset taulukkoarvot eivät sovellu kaikkiin tilanteisiin.

3.2.2 Lämpötila ajan funktiona

Koejärjestelyiden avulla tutkittiin tilannetta käytännössä kuormittamalla koelaitteistoa 10 A vakiovirralla ja rekisteröimällä termoparien lämpötila-arvot 130 minuutin ajanjakson aikana, lopettamalla kuormitus ajanjakson puolessa välissä. Mittaustulokset esitetään kuvassa 15.



Kuva 15. Komponenttien lämpötila ajan funktiona

Kuvasta (ks. edell. s.) huomataan, että lämpötilojen käyrämuodot ovat hyvin samankaltaisia kuin teoreettisesti (ks. 3.1.6) oli odotettavissa. Vaikka osassa mittauspisteitä lämpötilan nousun aiheuttaa muu kuin kuormitusvirta, se ei vaikuta komponenttien lämpenemisen käyrämuotoon, jos nämä muut lämpövaikutukset pysyvät vakiosuuruisina.

Mittauspisteiden loppulämpötiloista lasketut aikavakion määräämien 63 %:n arvot ja niiden saavuttamiseen kuvan 15 mukaan kuluneet ajat esitetään taulukossa 10.

Taulukko 10. Komponenttien lämpöaikavakiot

	Johdin	Johdonsuojakatkaisija	Riviliitin	Kontaktorin sivu	Kontaktori	Moottorinsuojakytkin
Loppulämpötilat	29,6	38,2	27,0	37,9	25,8	53,0
63 %:n arvot	26,9	32,4	25,3	32,2	24,5	41,7
Lämpöaikavakio/s	1350	1570	1950	2410	3120	890

Kuvaajasta vastaavasti määritetyt jäähtymisaikavakioiden arvot esitetään taulukossa 11. Jäähtymisaikavakiot eivät tässä tapauksessa ole määritelty komponenttien todellisesta loppulämpötilasta, mutta tällä ei ideaalitulanteessa ole vaikutusta aikavakion pituuteen (ks. 3.1.6).

Taulukko 11. Komponenttien jäähtymisaikavakiot

	Johdin	Johdonsuojakatkaisija	Riviliitin	Kontaktorin sivu	Kontaktori	Moottorinsuojakytkin
Alkulämpötilat	29,0	37,6	26,3	35,0	24,8	51,6
63 %:n arvot	24,8	27,9	23,8	27,0	23,2	33,1
Jäähtymisikavakio/s	720	1710	1200	2520	2460	1020

Taulukoiden 10 ja 11 (ks. edell. s.) arvoista huomataan, että koejärjestelyssä käytettyjen komponenttien lämpenemis- ja jäähtymisaikavakiot eivät ole identtiset, mutta ovat samaa suuruusluokkaa. Erot aikavakioiden pituuksissa selittyvät muun muassa koejärjestelyn ympäristö-olosuhteiden epästabiliudella ja muiden kuin kuormitusvirran aiheuttamien lämpövaikutuksien epälineaarisuudella.

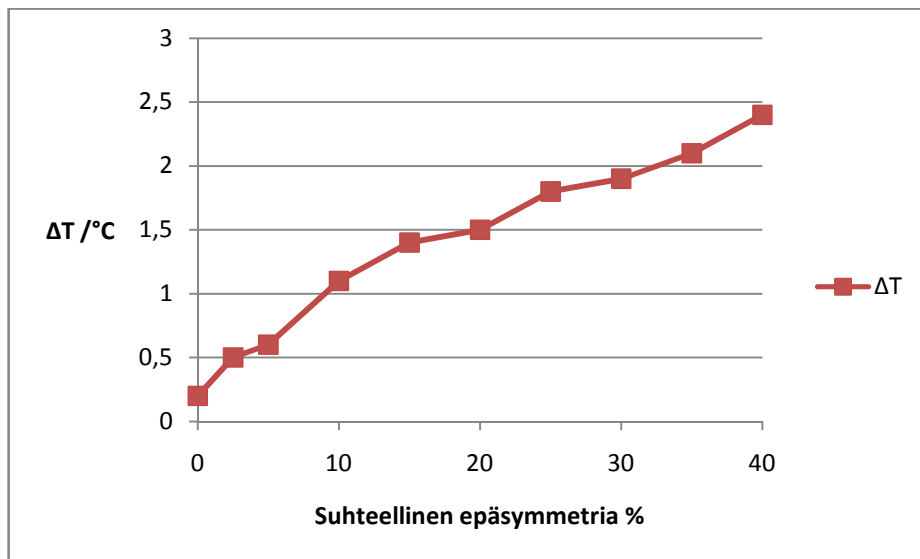
3.2.3 Lämpötila kolmivaihe-epäsymmetrian funktiona

Kolmivaihe-epäsymmetrian prosentuaalisten arvojen vaikutusta vaihevirtoihin ja sitä kautta sähkökomponenttien lämpötiloihin tutkittiin koelaitteiston avulla mittaamalla lämpökameralla johtimien pintalämpötiloja. Mittaus suoritettiin koelaitteiston nimellisellä 10 ampeerin virralla siten, että symmetrisen vaihejohtimen pintalämpötila annettiin nousta noin 27 °C:een, minkä jälkeen kuormitus katkaistiin ja lämpötilan laskettua arvoon 25 °C kuormitus aloitettiin uudelleen. Mitatut vaihejohtimien pintalämpötilat ja lämpötilojen erot esitetään taulukossa 12.

Taulukko 12. Kolmivaihe-epäsymmetrian aiheuttamat lämpötilat

Suhteellinen epäsymmetria/%	Symmetrisen vaiheen lämpötila/°C	Epäsymmetrisen vaiheen lämpötila/°C	$\Delta T/°C$
40	27,0	24,6	2,4
35	26,9	24,8	2,1
30	26,8	24,9	1,9
25	27,0	25,2	1,8
20	26,8	25,3	1,5
15	26,9	25,5	1,4
10	26,9	25,8	1,1
5	26,9	26,3	0,6
2,5	26,9	26,4	0,5
0	27,0	26,8	0,2

Kuvassa 16 esitetään johtimien pintalämpötilojen ero suhteellisen epäsymmetrian funktiona.



Kuva 16. Johtimien pintalämpötilojen ero suhteellisen epäsymmetrian funktiona

Kuvasta 16 ja taulukosta 12 (ks. edell. s) huomataan, että lämpötilojen käyttäytyminen suhteellisen epäsymmetrian funktiona on lähes lineaarista, vaikka epäsymmetrisen vaihejohtimen virran arvo on suoraan verrannollinen suhteellisen epäsymmetrian arvoon. Kuormitusvirran vaikutus lämpötilaan tulisi teoreettisesti olla neliöllinen, kuten teoreettisessa osuudessa on osoitettu (ks. 3.1). Tilanne selittyy sillä, että kuormitusajanjaksojen pituus on erittäin lyhyt suhteutettuna johtimen lämpöaikavakion pituuteen.

Koejärjestelyn avulla kuitenkin huomataan, että johtimien pintalämpötilojen ero epäsymmetrisissä kuormitustilanteissa on helposti havaittavissa lämpökameramittauksen avulla. Todellisissa tilanteissa nämä kuormitustilanteet ovat usein pitkäkestoisempia, jolloin myös lämpötilaerot symmetrisien ja epäsymmetrisien vaihejohtimien välillä kasvavat suuremmiksi. Tätä kautta myös pienemmät suhteellisten epäsymmetrian arvot (ks. 3.1.3) voidaan olettaa olevan havaittavissa.

3.2.4 Liitosongelmat

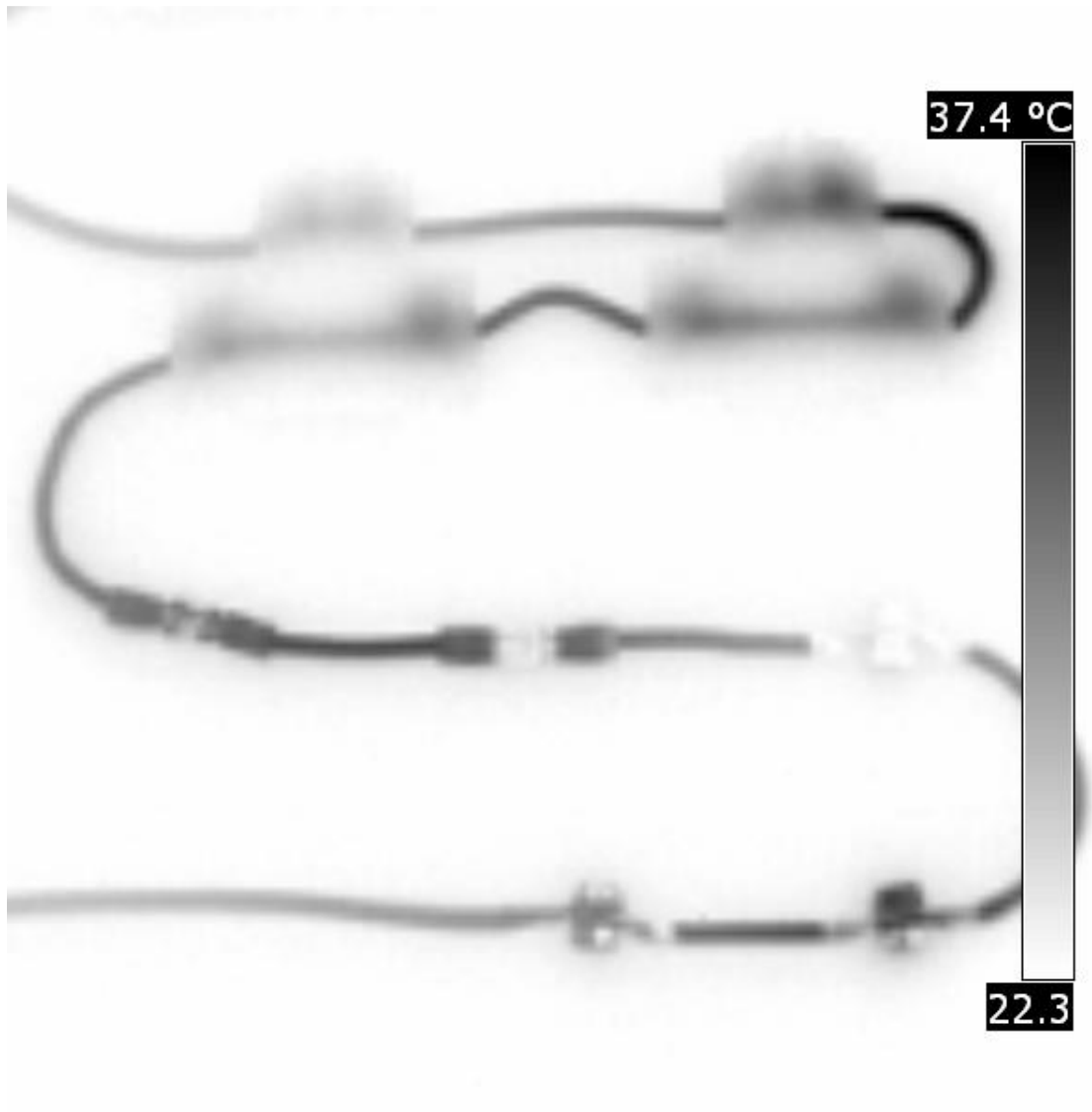
Hapetuminen

Koelaitteiston avulla tutkittiin hapettuneiden liitosten käyttäytymistä virrallisena. Testattuja kappaleita oli keinotekoisesti hapetettu kaliumpolysulfidin (K_2S_x) ja suolahapon (HCl) avulla ns. tropiikkikaapissa ja niihin kuuluivat

- holkittamattomia 2,5 mm² MKEM ja MK -johtimia
- holkitettuja 2,5 mm² MKEM-johtimia
- tinapäälysteisiä ja kuparisia kaapelikenkiä
- ABIKO-liittimiä.

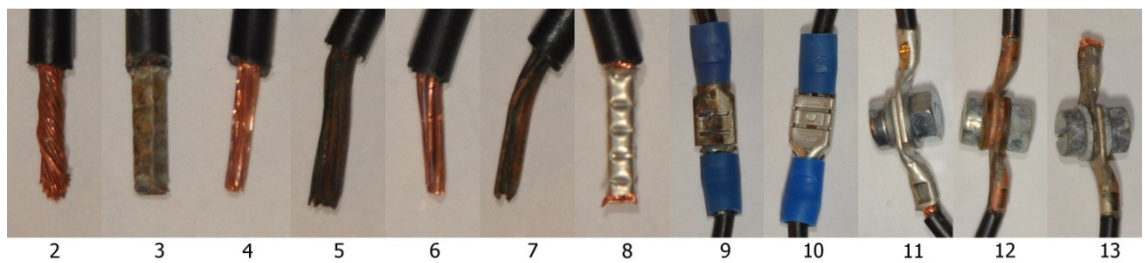
Kuvassa 17 (ks. seur. s) esitetään lämpökuva tilanteesta, jossa eri liitoksia oli kytketty sarjaan ja kytkennän läpi kulki noin 10 ampeerin virta. Paljaat ja holkitetut johtimet oli kytketty kahteen eristetyn levyn päälle vaakatasoon asetettuun kaksitasoiseen riviliittimeen. Käytetyt liitokset luetellaan seuraavassa listassa, alkaen kuvan vasemmasta yläkulmasta:

1. hapettumaton syöttöjohdin
2. hapettumaton MKEM-johdin
3. hapettunut holkitettu MKEM-johdin
4. hapettumaton MKEM-johdin
5. hapettunut MKEM-johdin
6. hapettumaton MK-johdin
7. hapettunut MK-johdin
8. hapettumaton holkitettu MKEM-johdin
9. hapettunut ABIKO-liitos
10. hapettumaton ABIKO-liitos
11. hapettumaton tinapäälysteinen kaapelikenkäliitos
12. hapettunut kuparinen kaapelikenkäliitos
13. hapettunut tinapäälysteinen kaapelikenkäliitos



Kuva 17. Lämpökuva hapettuneista virrallisista liitoksista

Kuvassa 18 on esitetty lähikuvat käytetyistä liitoksista.



Kuva 18. Lähikuvat liitoksista

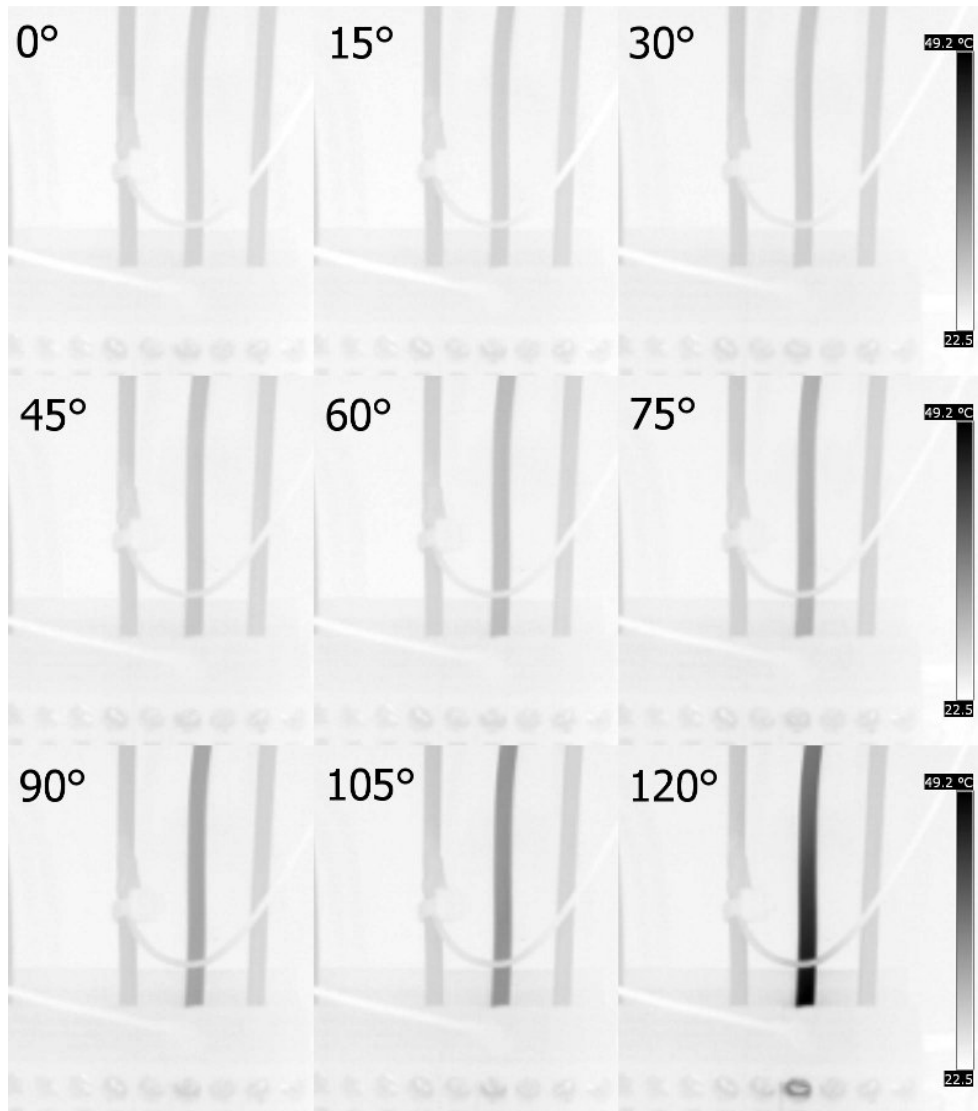
Lämpökuvasta (kuva 17, ks. edell. s.) huomataan selkeästi miten hapettuneiden liitosten kohonnut ylimeresistanssi aiheuttaa johtimissa ja liitospinnoilla lämpövaikutuksen, joka on erittäin helppo havaita lämpökameran avulla. Hapettuneissa liitoksissa syntynyt lämpö kuitenkin johtuu tehokkaasti johdinta ja riviliitintä pitkin eteenpäin, jolloin itse lämpövaikutuksen aiheuttavan liitoksen havaitseminen voi olla haasteellista.

Koejärjestelyssä käytettyjen kaapelikenkä- ja ABIKO-liitoksien pintamateriaalien emissiivisyysarvon ollessa erittäin matala ja niiden pinnan heijastava, tulee lämpökuvassa esiintyvät lämpötilat tulkita liitokset yhdistävien johtimien pintalämpötiloista.

Liitosten löystyminen

Koelaitteistolla suoritettiin myös mittaus, jolla selvitettiin miten riviliittimeen löystyminen vaikuttaa riviliittimen ja johtimen lämpenemiseen, kun riviliittimeen on kytketty virrallinen johdin. Tarkoituksena on selvittää, voidaanko löystyneitä liitoksia havaita lämpökuvauksen avulla.

Seuraavassa kuvasarjassa (kuva 19, ks. seur. s) esitetään tilanne, jossa 10 ampeerin virralla kuormitun kolmivaihesyötön keskimmäistä riviliitintä avataan noin 15° kerrallaan. Mittaustilanne on toteutettu katkaisemalla kuormitus aina liitoksen avaamisen ajaksi ja kuormittamalla kytkentää, kunnes ehjien liitosten johtimien lämpötila oli noussut noin 27 °C:een. Lämpökuvat on skaalattu kuvasarjan viimeisen, suurimman lämpötilamuutoksen aiheuttaneen lämpökuvan mukaan, joten myös alkupään kuvien lämpötilaerot olisivat helposti havaittavissa visuaalisesti kuvaustilanteeseen sopivan skaalauksen avulla.



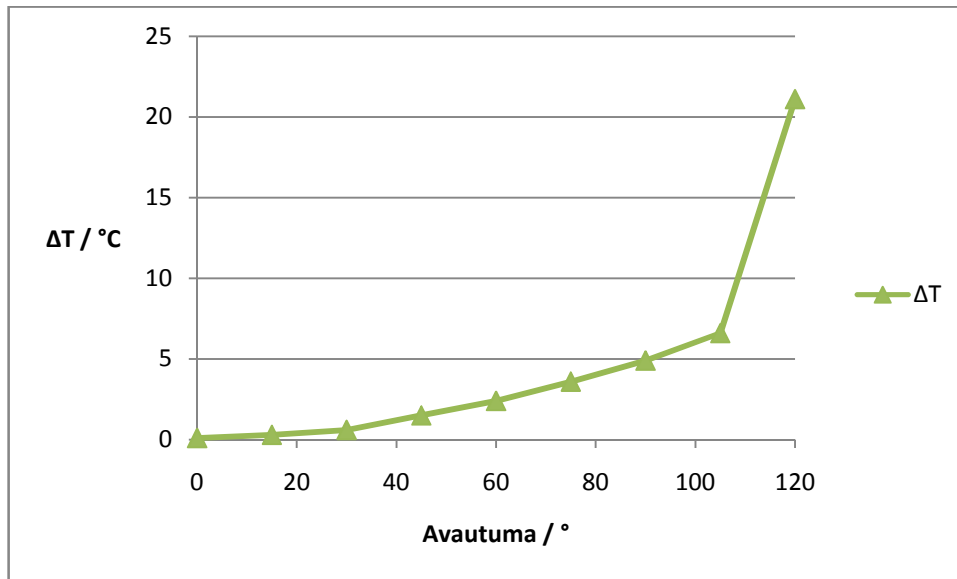
Kuva 19. Lämpökuvasarja liitoksen avautumisesta

Taulukossa 13 esitetään lämpökameralla mitatut johtimien pinnan lämpötila-arvot tulokittuna heti riviliittimen yläpuolelta.

Taulukko 13. Johtimien pintalämpötilat

Avautuma/°	Ehjä liitos/°C	Avautunut liitos/°C	ΔT/°C
0	26,6	26,7	0,1
15	26,6	26,9	0,3
30	26,8	27,4	0,6
45	26,7	28,2	1,5
60	26,8	29,2	2,4
75	27,0	30,6	3,6
90	27,0	31,9	4,9
105	27,1	33,7	6,6
120	27,2	48,3	21,1

Kuvassa 20 esitetään graafisesti ero ehjän ja avautuneen liitoksen johtimien pintalämpötilojen välillä liitoksen avautumisen funktiona.



Kuva 20. Johtimen pintalämpötilaero avautumisen funktiona

Lämpökuvasarjasta, taulukosta 13 ja kuvasta 20 huomataan selkeästi, miten liitoksen avautumisen aiheuttama ylimeno-resistanssin kasvu aiheuttaa johtimen pintalämpötilan rajun nousun.

4 Johtopäätökset

Tämän insinööriyön lämpökuvausta käsittelevästä osiosta voidaan vetää johtopäätös, että lämpökameralaitteistot ovat kehittyneet tasolle, jolla ne ovat lähes joka osaluokalla ylivoimaisia kappaleiden pinta-lämpötilojen mittaamiseen soveltuvia mittalaitteita. Lämpökuvauksen mahdollistavat fysikaaliset ilmiöt tunnetaan myös hyvin, eikä tekniikan kannalta absoluuttisen oikean mittaustuloksen saamisen esteenä ole kuin käytetyn ilmaisintekniikan rajoitukset. Työssä ei kuitenkaan käsitelty eikä ohjeistettu käytännön lämpökuvausta, joten kuvauksesta syntyvät virhelähteet olisivat lisätutkimuksen ja selvityksen aihe.

Sähkökomponenteissa kuormitusvirran vaikutuksesta syntyvät lämpöilmiöt ovat kunnossapidon kannalta mielenkiintoisia, koska ne voivat kertoa tietyn komponentin mahdollisesta sen suunnitellusta toiminnasta poikkeavasta toimintatilasta. Haastavuutta tähän aiheuttaa kuitenkin mitattujen lämpötilojen tulkinta: mikä on poikkeavaa ja mikä ei. Monimutkaisemmaksi tilanteen tekee vielä se, että kuormitusvirran lämmittävä vaikutus kasvaa neliöllisesti virran noustessa, joten kuormitus tilanne täytyy olla hyvin tiedostettu lämpötiloja arvioidessa.

Sähkökomponenttien lämpötiloja käsittelevässä osiossa esitettiin joitakin ohjeellisia lämpötila-arvoja lämpötilojen tulkintaa varten sekä tutkittiin teoreettisesti, miten erilaiset kuormitus tilanteet ja -mallit vaikuttavat hetkellisiin lämpötiloihin. Epälineaaristen kuormitusjaksojen sekä erisuurien lämpenemis- ja jäähtymisaikavakioiden aiheuttamat lämpövaikutukset vaativat syvällisempää matemaattista tarkastelua, jotta näissä tapauksissa saatuja mittaustuloksia pystyttäisiin suhteuttamaan oikein.

Työn kokeellisessa osiossa pyrittiin toistamaan teoreettisesti käsiteltyjä sähkökomponenttien lämpötilakäyttäytymisiä tietyissä kuormitus tilanteissa. Tuloksista huomattiin, että koejärjestelyt olisi tullut suorittaa huomattavasti kontrolloidummin, jotta teoriaa vastaavat lämpötilakäyttäytymiset olisi voitu käytännössä toistaa. Tämä kuitenkin vain osoittaa, että sähkökomponenttien lämpötilojen tulkinta on erittäin haasteellista, vaikka kuormitus tilanteet olisivatkin hyvin tiedossa. Käytettäessä sähkökomponenteissa esiintyviä lämpötiloja seurantaan perustuvan kunnossapidon työkaluna, tulisivat niissä esiintyvät, eri kuormitus tilanteiden aiheuttamat lämpötilat olla hyvin tutkittu, jotta lämpötilojen mittaustuloksista pystyttäisiin tulkitsemaan mahdollisia muutoksia.

Lähteet

- 1 Young, Maureen. 2008. Applications of thermography: benefits and pitfalls. Edinburgh, Skotlanti.
- 2 Mikron Infrared MikroScan 7600PRO Operator's Manual. 2006.
- 3 Maldague, Xavier. 2000. Applications of infrared thermography in nondestructive evaluation. Quebec, Kanada.
- 4 Flir InfraCAM User's manual. 2008.
- 5 Infrared. 2011. Verkkodokumentti. Wikipedia. <http://en.wikipedia.org/wiki/Infrared#Different_regions_in_the_infrared>. Luettu 12.1.2011.
- 6 Hamamatsu. Technical information SD-12, Characteristics and use of infrared detectors. 2002.
- 7 Electro-Optical Imaging Systems. Verkkodokumentti. Federation of American Scientists. http://www.fas.org/man/dod-101/navy/docs/es310/EO_image/EO_Image.htm>. Luettu 4.2.2011.
- 8 Gruner, Klaus-Dieter. 2003. Principles of Noncontact Temperature Measurement. Berliini, Saksa.
- 9 Measurement Fundamentals. 2010. Verkkodokumentti. National Instruments. <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/7108>> Luettu 4.2.2011.
- 10 Maxwell, J.C. 1871. Theory of heat. New York, Yhdysvallat: Greenwood Press Reprint.
- 11 Discourse on Heat and Work. Verkkodokumentti. Department of Physics and Astronomy, Georgia State University. <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/heat.html>>. Luettu 4.2.2011.
- 12 Schroeder, Daniel V. 2000. An introduction to thermal physics. San Francisco, Yhdysvallat: Addison-Wesley.
- 13 Smith, J.M., Van Ness, H.C., Abbot, M.M. 2005. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. Singapore, Kiina: McGraw-Hill.
- 14 Cawfield, Scott. 2003. Infrared Inspection Data: What's hot and what's not?
- 15 Lienhard, John H. 2004. A Heat Transfer Textbook. Cambridge, Englanti: Phlogiston Press.
- 16 Tina. 2011. Verkkodokumentti. Wikipedia. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Tina>>. Luettu 16.2.2011.
- 17 Lyon, Bernard R. Jr., Orlove, Gary L., Peters, Donna L. 2003. The relationship between current load and temperature for quasi-steady state and transient conditions. North Billerica, Yhdysvallat

- 18 Bethel, Noah P. 2007. Fault Zone Analysis: Six Part Series on Identifying Motor Defects. Tampa, Yhdysvallat.
- 19 Korpinen, Leena. 2008. Yliaalto-opus. Tampere.
- 20 IEC 60034-1. 2004. Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance.
- 21 Newton's Law of Cooling. 2007. Verkkodokumentti. Wolfram Research. <<http://scienceworld.wolfram.com/physics/NewtonsLawofCooling.html>>. Luettu 16.2.2011.
- 22 Teknisiä tietoja ja taulukoita. 2000. Vaasa : Suomalaiset ABB-yhtiöt.
- 23 Time constant. 2011. Verkkodokumentti. Wikipedia. <http://en.wikipedia.org/wiki/Time_constant>. Luettu 16.2.2011.
- 24 Heat transfer. 2011. Verkkodokumentti. Wikipedia. <http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_transfer>. Luettu 16.2.2011.
- 25 R-value (insulation). 2011. Verkkodokumentti. Wikipedia. <[http://en.wikipedia.org/wiki/R-value_\(insulation\)](http://en.wikipedia.org/wiki/R-value_(insulation))>. Luettu 16.2.2011.

Liite 1. Emissiivisyystaulukko

Seuraavan emissiivisyystaulukon erittely-sarakkeessa ilmaistaan lisäinformaatiota kyseisestä materiaalista. Lämpötila-sarakkeessa ilmoitetaan emissiivisyyden määrittämiseen käytetty lämpötila, jos se on ollut lähdetiedoissa saatavilla.

Taulukossa käytetyt lähteet ovat seuraavat:

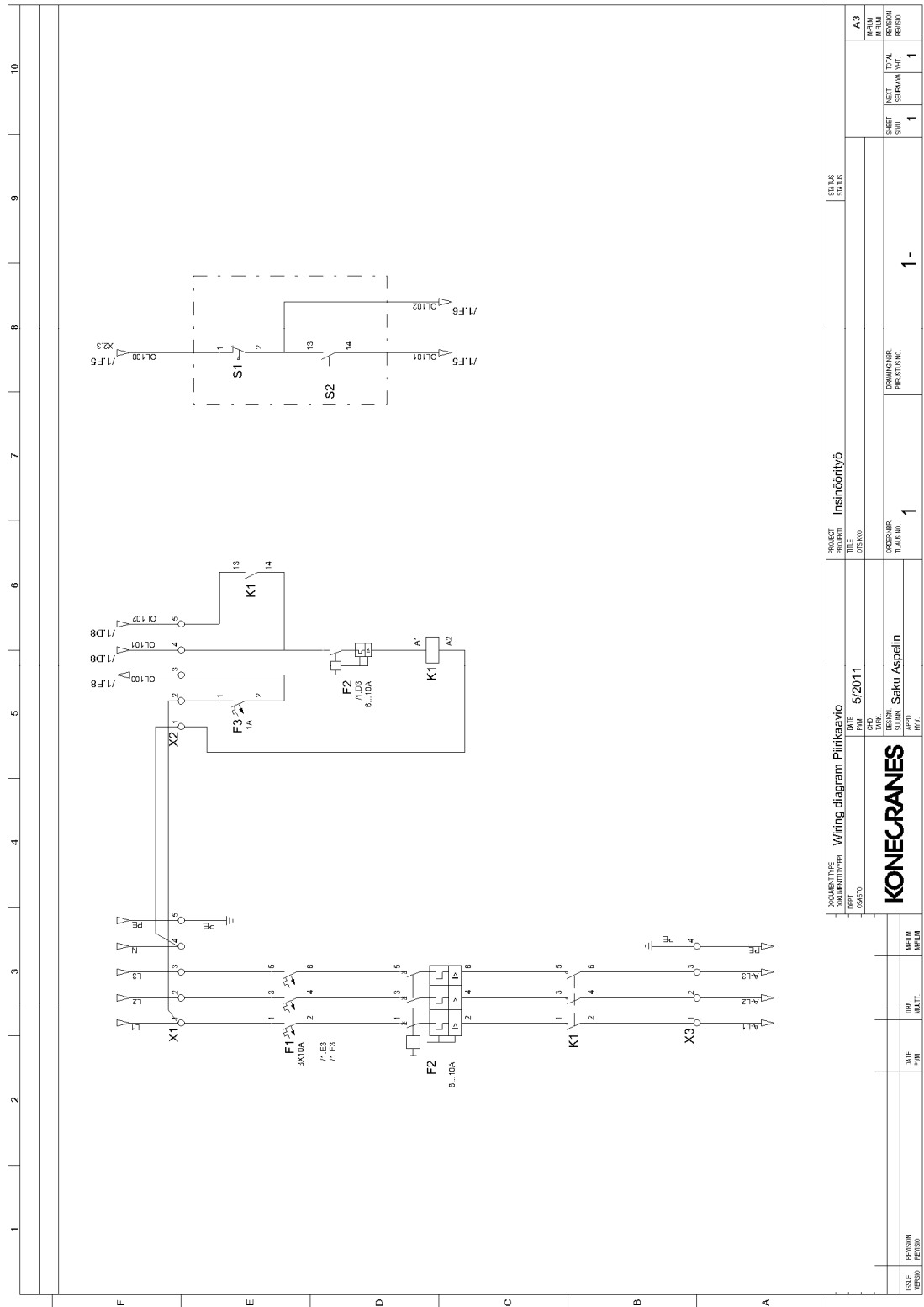
1. Bramson, Mikael A. Infrared Radiation, A Handbook for Applications. New York, Yhdysvallat: Plenum press.
2. Wolfe, William L., Zissis, George J. The Infrared Handbook. Washington, D.C., Yhdysvallat.
3. R. P., Madding. Thermographic Instruments and systems. Madison, Yhdysvallat.
4. Wolfe, William L. Handbook of Military Infrared Technology. Washington, D.C., Yhdysvallat.
5. Jones, Smith, Probert. External thermography of buildings. Lontoo, Englanti.
6. Paljak, Pettersson. Thermography of Buildings. Tukholma, Ruotsi.

Taulukko 1. Emissiivisyystaulukko

Materiaali	Erittely	Lämpötila/°C	Emissiivisyys
Alumiini	hapettunut, voimakkaasti	50 - 500	0,20 - 0,30
Alumiini	karkea pinta	20 - 50	0,06 - 0,07
Alumiini	kiillotettu	50 - 100	0,04 - 0,06
Asbesti	kangas		0,78
Asfalttipäällyste		4	0,97
Betoni		20	0,92
Emali			0,90
Graniitti	karkea	21	0,88
Hopea	kiillotettu	100	0,03
Iho	ihmisen	32	0,98
Kalkki			0,30 - 0,40

Materiaali	Erittely	Lämpötila/°C	Emissiivisyys
Kangas	musta	20	0,98
Kipsi		20	0,80 - 0,90
Kromi	kiillotettu	50	0,10
Kuitulevy	kovalevy	70	0,75 - 0,88
Kuitulevy	lastulevy	70	0,77 - 0,89
Kulta	kiillotettu	100 - 600	0,02 - 0,03
Kumi		20	0,95
Kupari	kiillotettu	20 - 100	0,008 - 0,03
Kupari	hapettunut	20 - 50	0,60 - 0,80
Laasti	kuiva	36	0,94
Maali	muovi, musta	20	0,95
Maali	muovi, valkoinen	20	0,84
Muovi	PVC, muovilattia	70	0,94
Paperi	keltainen		0,72
Paperi	musta		0,90
Paperi	punainen		0,76
Paperi	sininen		0,84
Paperi	valkoinen		0,70 - 0,90
Paperi	vihreä		0,85
Polystyreeni	eriste	37	0,60
Posliini	lasitettu	20	0,92
Puu	hiottu		0,50 - 0,70
Puu	höylätty		0,80 - 0,90
Rappaus		17	0,86
Rauta ja teräs	elektrolyyttinen	20 - 100	0,05
Rauta ja teräs	hapettunut	100	0,74
Rauta ja teräs	pahoin ruostunut	17	0,96
Savi	poltettu	70	0,91
Tiili	punainen, yleinen	20	0,93
Valurauta	hapettunut	38 - 260	0,63 - 0,66
Valurauta	kiillotettu	38 - 200	0,21
Vesi	jää		0,96 - 0,98
Vesi	lumi		0,80 - 0,85
Vesi	tislattu	20	0,96
Volframi	hehkulanka	3 300	0,39

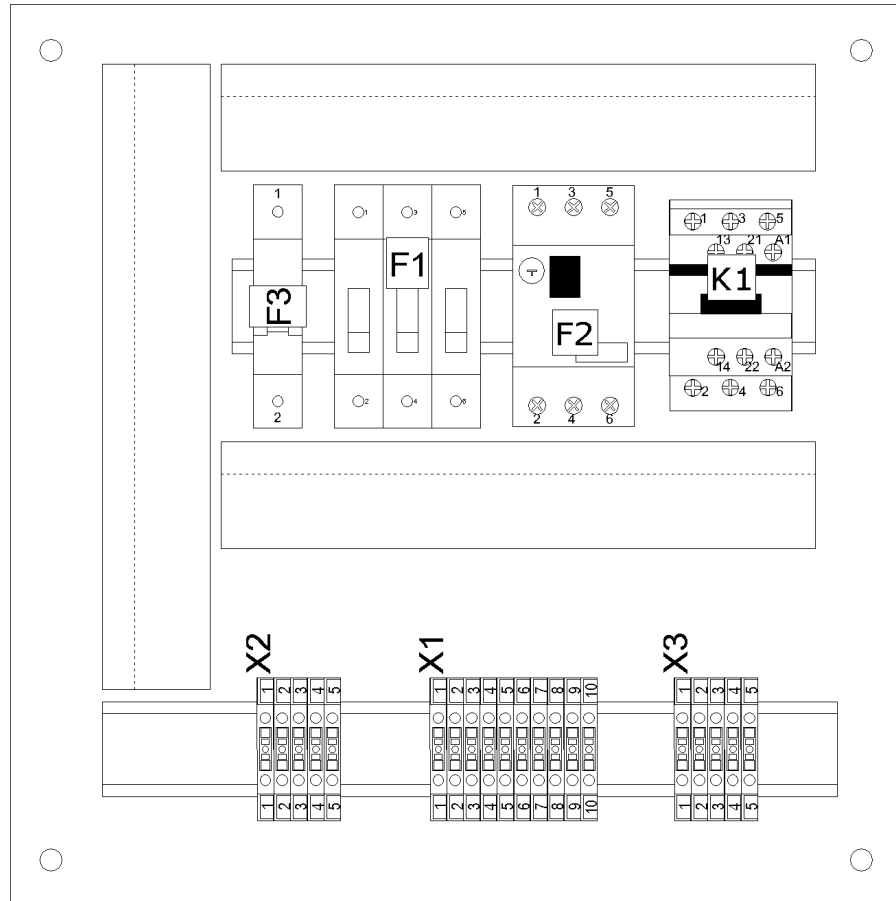
Liite 2. Koelaitteiston piirikaavio ja osasijoittelukuva



Kuva 1. Koelaitteiston piirikaavio

DOCUMENT TYPE DOKUMENTITYPPI		Wiring diagram Piirikaavio		PROJECT PROJEKTIN OTOUMANO		Insinööriyö		STATUS STATUS		A3	
DRAWN KUVASTI		5/2011		CHD P.H.		5/2011				A3	
DESIGN SUUNNITTELIJA		Saku Aspelin		CHECKED TARKASTAJA		1				SHEET SIVU	
ISSUE VERSIO		DATE PÄIVÄ		DATE PÄIVÄ		DATE PÄIVÄ		DATE PÄIVÄ		SHEET SIVU	
REVISION MUTAKORJAUS		DATE PÄIVÄ		DATE PÄIVÄ		DATE PÄIVÄ		DATE PÄIVÄ		SHEET SIVU	
TOTAL YHTEENSÄ		1		TOTAL YHTEENSÄ		1		TOTAL YHTEENSÄ		1	

Cubicle layout Kojekaappi-layout



KONECRANES	CUSTOMER ASIAKAS	Insinööriyö			
	DEPT. OSASTO		ORDER NBR. TILAUS NO.	1	SHEET SIVU
	DESIGN SUUNN.	Saku Aspelin	DRAWING NBR. PIIRUSTUS NO.	1 -	2
					NEXT SEURAAVA
					TOTAL YHT.
					2
					A4

Kuva 2. Koelaitteiston osasijoittelukuva