

Juuso Kantola

Testerin rakentaminen

Lämmönsiirtorasvan kiihdytetty elinkaaritestausta



ALKULAUSE

ABB on maailman johtava sähkövoima- ja automaatioteknologiayhtymä, jonka tuotteet, järjestelmät ja palvelut parantavat teollisuus- ja energiayhtiöasiakkaiden kilpailukykyä ympäristömyönteisesti. ABB:n palveluksessa on yli 117 000 henkilöä noin sadassa maassa. Suomen ABB Oy Drives on osa Low Voltage AC Drives -divisioonaa, joka valmistaa nimensä mukaisesti pienjännitteisiä taajuusmuuttajia.

Tämä insinöörityö tehtiin ABB Drives Oy:n Low Power AC -tulosityksikön Product Engineering -osastolle. Kiitän koko osaston henkilökuntaa avusta, jota olen saanut työskennellessäni yrityksessä sekä tämän insinöörityöni eri vaiheissa. Erityisesti haluan kiittää työni ohjaajaa diplomi-insinööri Martti Mattilaa sekä diplomi-insinööri Ilmari Varjosta ABB:ltä. Kiitän työni valvojaa diplomi-insinööri, lehtori Krister Wikströmiä Mertropolia Ammattikorkeakoulusta.

Helsingissä 7.3.2011

Juuso Kantola

Tekijä Otsikko	Juuso Kantola Lämmönsiirtorasvan kiihdytetty elinkaaritetaus
Sivumäärä Aika	37 sivua + liite 7.3.2011
Tutkinto	Ammattikorkeakoulututkinto
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaaja(t)	diplomi-insinööri, lehtori Krister Wikström diplomi-insinööri Martti Mattila
<p>Tämä insinööri työ tehtiin tilauksesta ABB Drives Oy:n Low Power AC -tulosityksikön Product Engineering -osastolle. Tässä insinööri työssä on esitelty lämmönsiirtorasvojen kiihdytetyn elinkaaritetauksen testauslaitteiston mekaniikka. Product Engineering -osasto on vastuussa tuotteestaan koko taajuusmuuttajan elinkaaren ajan. Kaikki elinkaaritetaukseen liittyvät testit ovat tärkeitä, jotta voitaisiin ymmärtää ikääntymisen vaikutus tuotteeseen. Testauksella pyritään simuloimaan todellista käyttöä nopeammin kuin odottamalla palautetta asiakkaalta vuosia.</p> <p>Työ aloitettiin perehtymällä taajuusmuuttajan sekä lämpöenergian teoriaan. Seuraavaksi syvennyttiin IGBT-moduulin rakenteeseen ja lämmönsiirtorasvan ominaisuuksiin sekä käsittelyyn. Teorian avulla saatiin ymmärrys siitä, miten testauskonsepti kannatti fyysisesti toteuttaa tilaajan suunnitteleman testauskonseptin vaatimusten mukaisesti.</p> <p>Työssä on selvitetty yksityiskohtaisesti testeriin päätyneet ratkaisut sekä vertailtu vaihtoehtoisia toteutustapoja. Koska kyseessä oli pilottihankkeen ensimmäinen kehitysversio, syntyi työn aikana monia parannuksia, mutta myös kompromisseja jouduttiin tekemään eri syistä.</p> <p>Insinööri työn lopputuloksena syntyi mekaanisesti valmis testauslaitteisto, jolla on mahdollista testata viiden erilaisen lämmönsiirtorasvan kiihdytettyä elinkaarta vakioteholla. Testeri on fyysisesti valmis ohjelmoitavaksi tilaajan tarpeiden mukaisesti. Lopuksi on esitelty ohjelmisto-osuudessa toteutettava testaussekvenssi.</p>	
Avainsanat	Lämmönsiirtorasva, IGBT-moduuli, kiihdytetty elinkaaritetaus, taajuusmuuttaja

Author Title	Juuso Kantola Thermal grease long-term stability test setup
Number of Pages Date	37 pages + appendix 7 March 2011
Degree	Higher vocational diploma
Degree Programme	Electrical engineering
Specialisation option	Electrical power engineering
Instructor(s)	Krister Wikström, Master of Science, Lecturer Martti Mattila, Master of Science
<p>This bachelor's thesis was prepared at Low Power AC Product Engineering department of ABB Oy Drives. The aim of the thesis was to build a long-term reliability test setup for thermal greases. The Product Engineering team has the responsibility for a frequency converter product during its whole life-time. Hence, all accelerated long-term test setups help the team to gather valuable reliability data needed to prevent the problems from occurring at field.</p> <p>The thesis begins with summarized theories on frequency converter, heat energy, IGBT-module and thermal greases that are necessary for understanding the test setup. The test setup was formed according to a specification, though some necessary improvements and compromises were done during the building process.</p> <p>The aim of the thesis was met since a mechanically ready test setup was completed in a given time frame. The test setup enables a simultaneous accelerated life-time test for five different thermal greases, providing a similar load for each grease type. The tester is physically ready to be programmed according to the subscriber's requirements. Also some requirements for the tester software are specified in the end of this thesis.</p>	
Keywords	Thermal grease, IGBT-module, long-term stability test setup, frequency converter

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Taajuusmuuttaja	2
3	Lämpöenergia, peruskäsitteet ja määritelmät	3
3.1	Lämmön johtuminen	4
3.1.1	Lämmönjohtavuus	5
3.1.2	Lämpöresistanssi	6
3.2	Lämmön konvektio	7
3.3	Lämmön säteily	8
3.4	Kontaktin lämpövastus	9
3.5	Kontaktivastus	10
3.6	Lämpörajapinnat	10
4	Lämmönsiirtorasvat	12
4.1	Ominaisuudet	12
4.2	Lämpörasvan asennus	13
5	IGBT-tehopuolijohdemuodi	17
5.1	IGBT-moduulin rakenne ja toiminta	17
5.2	Lämmön leviäminen	18
6	Testauskonsepti	19
6.1	Teholähde	19
6.2	IGBT-moduuli	21
6.3	Jäähdytyslementti	24
6.4	Tuulitunneli	27
6.5	Puhallin	28
6.6	Ilmanohjain	29
6.7	Kokoonpanon asennus testeriin	30
6.8	Kuparihäviöt	31
7	Lämpötilan mittaus	33

8	Testaussekvenssi	34
8.1	Korkean lämpötilanmuutoksen testi	35
8.2	Matalan lämpötilanmuutoksen testi korkealla syklimäärällä	35
9	Johtopäätökset	36
	LÄHTEET	37
	Liite IGBT FF450R12ME3 -datalehti	

LYHENTEET JA KÄSITTEET

ABB	Asea Brown Boveri; automaatio- ja sähkövoimatekniikan valmistaja
AC	Alternating Current; vaihtovirta
DC	Direct Current; tasavirta
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor; tehopuolijohde
IEC	International Electrotechnical Commission; kansainvälinen elektroniikan alan standardeja kehittävä järjestö
IP-luokka	Sähkölaitteiden tiiviyden määrittelyluokka (IEC 60529)
MOS	Metal Oxide Semiconductor; metallioksidipuolijohde
MRP	Material requirements planning code; materiaalikoodi
TIM	Thermal Interface Material; lämmönsiirtorasva

1 Johdanto

ABB:n taajuusmuuttajavalikoima on alun perin kehitetty suurien yksittäisten sähkömoottoreiden ohjaamiseen teollisessa käytössä. Myöhemmin tuotevalikoima on laajentunut sekä hyvin pieniin taajuusmuuttajiin että suuriin monen taajuusmuuttajan kokonaisuuksiin.

Uusina tulokkaina taajuusmuuttajamarkkinoille ovat tulleet aurinkoenergialla toimivat Solar- sekä tuulivoimalla toimivat Wind-taajuusmuuttajat. Yhteistä näille tuotteille on luonnon energiasta tuotettu sähkö, jota voidaan syöttää valtakunnan sähköverkkoon. Pitäjänmäen taajuusmuuttajatehtaan katolle (kuva 1) on hiljattain asennettu Pohjoismaiden suurin valtakunnan sähköverkkoon kytketty 181 kilowatin aurinkosähkövoimala. Aurinkopaneeleilla tuotettua sähköä käytetään tehtaalla muun muassa sähkötrukkien lataamiseen sekä kulutushuippujen leikkaamiseen.



Kuva 1. Aurinkovoimala Helsingin Pitäjänmäellä (kuva ABB)

Kasvat vaatimukset tehoelektronikassa johtavat väistämättä sovellusten määrän kasvuun yhä pienemmissä koteloinneissa. Pienemmistä laitteista otetaan tehoa ulos entistä enemmän, josta seuraa myös suuremmat häviöt. Tämä taas aiheuttaa elektroniikkatuotteelle tiukemmat vaatimukset lämmöntuoton ja -siirron suhteen, suorituskyvystä ja luotettavuudesta tinkimättä.

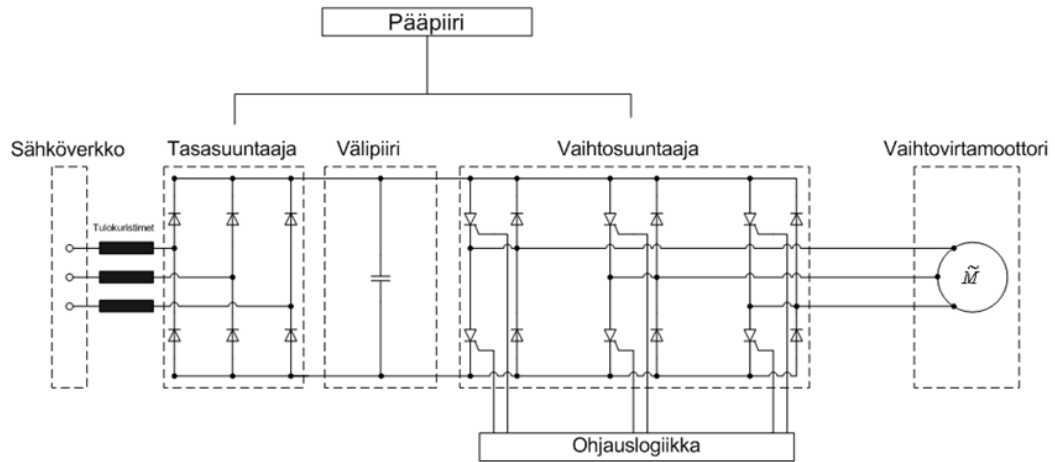
Tässä insinööriyössä perehdytään tehovuolihohteiden ja jäähdytuselementin välissä käytettävien lämmönsiirtorasvojen teoriaan sekä rakennetaan kiihdytetyn elinkaari-mallin testauslaite. Testauslaitteen rakennus on osa laajempaa projektia ja tässä työssä esitellään valmistettu ja dokumentoitu laitteen mekaniikkaosuus. Ohjelmisto-osuus, johon kuuluu myös laitteen fyysinen käyttöliittymä tehdään myöhemmin toisena insinööriyönä, joka toteutetaan mekaniikan valmistumisen jälkeen.

Työn ensimmäisessä osiossa käsitellään teoreettista taustaa, joka liittyy olennaisesti toteutettavaan testilaitteistoon. Tarkastelu lähtee liikkeelle taajuusmuuttajan ja lämpö-energian teorian ymmärtämisellä, minkä jälkeen syvennyttään IGBT-moduulin rakentamiseen. Seuraavaksi esitellään testerin rakentaminen sekä testauskonsepti. Työn loppu-osassa on enemmän dokumentointia rakennetusta laitteesta, päätelmiä siitä sekä työn edetessä tehtyjä johtopäätöksiä.

Työn tilaajan kanssa on sovittu testilaitteen rakentamisesta mahdollisimman valmiiksi. Koska ohjelmisto-osuus ei ole osa tätä työtä, laitteen funktionaalinen testaus ei ole mahdollinen vielä tässä työssä. Joitain osa-alueita pystytään ehkä testaamaan. Tähän työhön pyritään kuitenkin dokumentoimaan mahdollisimman hyvin asiat, josta on helppo jatkaa laitteen rakentamista.

2 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttaja on tehoelektronikkalaite, jolla voidaan muuttaa sähköverkon vakio-taajuinen jännite halutun taajuiseksi ja suuruiseksi. Vastaavasti taajuusmuuttajaa voidaan käyttää myös generaattorialueella, jolloin se syöttää generaattoriin tuottaman energian sähköverkkoon. Yleisimmät taajuusmuuttajat ovat kolmivaiheisia jännite-välipiirillisiä taajuusmuuttajia. Ensimmäisessä vaiheessa vaihtosähkö tasasuunnataan ja varastoidaan DC-välipiiriin. Välipiiristä vaihtosuuntaaja eli yleisimmin IGBT-transistorit katkovat DC-jännitettä vaihtosähkön kaltaisiksi pulsseiksi. Vaihtosuuntaajan voi yksinkertaisesti kuvitella kytkimiksi, jotka vaihtavat tilaansa hyvin suurella nopeudella. Kytkimillä katkotaan DC-jännitteestä sopivia paloja. (Ks. Kuva 2, seur. s.)



Kuva 2. Taajuusmuuttajan periaatekytkentä (kuva ABB)

Taajuusmuuttajan avulla voidaan siis säätää moottorin pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia portaattomasti. Toinen merkittävä hyöty tulee energian säästöstä, joka taajuusmuuttajalla saavutetaan. Moottorin pyörittämiseen käytetään vain se energia, jolla saavutetaan haluttu pyörimisnopeus ja momentti.

3 Lämpöenergia, peruskäsitteet ja määritelmät

Lämpöenergia on atomien tai molekyylien välistä värähtelyliikettä. Koska kyseessä on kappaleen liikkeeseen varastoitunut energia, tunnetaan se paremmin nimellä kineettinen energia. Ihmisen lämpökäsitys perustuu tuntoaistiin, esimerkiksi *kylmän* ja *kuuman* tuntemiseen. Tuntoaisti suojelee palamiselta ja palettumisilta, mutta käytetäessä lämpötilan määritelmää objektiiviseen ja absoluuttiseen analyysiin on sovitettava vertailukelpoisia ehtoja. Käytetään korjattua lämpötilamallia, jossa esimerkiksi Celsius-lämpötilaasteikolla on sovittu normaalilla ilmanpaineella veden jäätymispisteeksi $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja veden kiehumispisteeksi $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tässä työssä käytetään yleisesti Suomessa tunnettuja lämpötilan ehtoja.

Lämpöenergia on energian siirtymistä korkeammasta potentiaalista matalampaan eli kansankielellä *kuumasta kylmään*. Tätä ilmiötä kutsutaan lämpösiirtymäksi. Jos esimerkiksi koskettaa huoneenlämmössä kahvikupin lusikkaa, se tuntuu kylmältä, vaikka lusikka on huoneenlämpöinen. Tämä johtuu siitä, että lusikka on metallia, joka

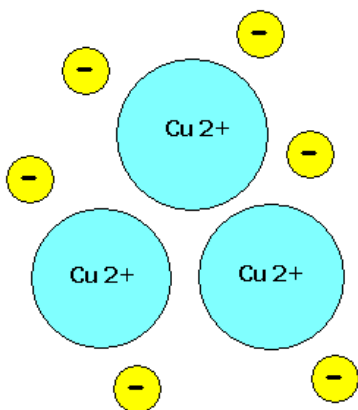
on hyvä lämmönjohdin. Sormien lämpöenergia pyrkii siis tasaantumaan lusikkaa pitkin muuhun osaan lusikkaa, ja siksi lusikka tuntuu hetken kylmältä. Sama ilmiö toimii päinvastoin, kun kahvikuppiin kaadetaan kuumaa kahvia. Lämpöenergia pyrkii tasaantumaan kuumemmasta kylmempään, ja lusikka lämpenee.

Lämmönsiirtymisellä on kolme erilaista tapaa: konvektio, säteily ja johtuminen. Nämä ilmiöt esiintyvät usein tarkasteltavassa systeemissä yhdessä, joten lämpömallinnuksessa on otettava huomioon kaikki lämmönsiirtotavat.

3.1 Lämmön johtuminen

Lämmönsiirto johtumalla tarkoittaa lämmön hajautumista materiaalin sisällä tai materiaalista toiseen. Lämpöenergia siirtyy aina korkeamman energian potentiaalista matalamman energian suuntaan. Mikäli lämmön potentiaaleilla ei ole eroa, lämmön siirtymistä ei tapahdu. Jokaisella aineella on oma ominaislämpökapasiteettinsa, joka määrittää, kuinka paljon lämpöenergiaa voi sitoutua lämpötilaeroa ja massaa kohden. SI-järjestelmän mukainen ominaislämpötilakapasiteetin (c) yksikkö on joulea kelvininä kilogrammaa kohden eli $[J/(K * kg)]$.

Kuvassa 3 on kuvattu metallien erittäin hyvää lämmönjohtavuutta, joka perustuu vapaisiin elektroneihin. Vapaina elektronit pääsevät liikkumaan nopeasti ja näin ollen siirtämään energiaa hyvin tehokkaasti paikasta toiseen.



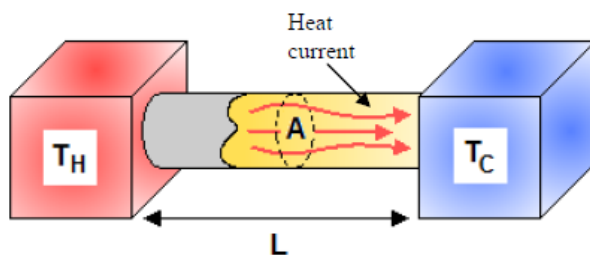
Kuva 3. Vapaat elektronit kupariatomilla

Vastaavasti eristeissä vapaita elektroneja ei ole, jolloin lämpöenergian johtuminen tapahtuu atomien värähdellessä tasapainoasemansa ympärillä ja värähdysliikkeen välittyessä atomilta toiselle. Värähdysliikkeen sisältämä energia, eli värähtelyn taajuus on verrannollinen lämpötilaan.

3.1.1 Lämmönjohtavuus

Lämpövirtaus eli *heat current* (H) (1) on suoraan verrannollinen johtavan kerroksen lämmönjohtavuuskertoimeen (k), pinta-alaan (A) ja kerroksen eri puolilla vallitsevaan lämpötilaeroon ($\Delta T = T_H - T_C$). Lämpövirtaus on kääntäen verrannollinen kerroksen paksuuteen (L). Kuva 4 havainnollistaa lämpövirtausta.

$$H = \frac{dQ}{dt} = k * A * \frac{T_H - T_C}{L} \quad (1)$$



Kuva 4. Lämmön johtuminen [1, s. 6]

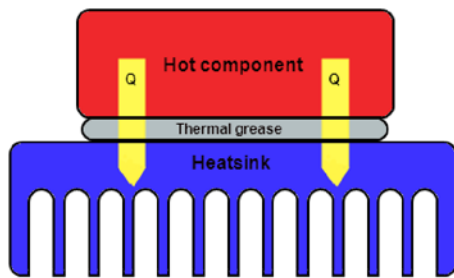
Materiaalit, jotka omaavat suuren lämmönjohtavuuskertoimen (k), ovat hyviä johteita ja vastaavasti pienen kertoimen materiaalit ovat eristeitä. Yksikötarkastelussa saadaan lämmönjohtavuuskertoimen yksiköksi [W/mK] seuraavalla tavalla:

$$\frac{[J]}{[s]} = k * [m^2] * \frac{[K]}{[m]} \Rightarrow k = \frac{\frac{[J]}{[s]}}{[m^2] * \frac{[K]}{[m]}} = \frac{[W]}{[m] * [K]} = \left[\frac{W}{m * K} \right]$$

Tässä työssä tutkitaan lämmönsiirtorasvoja, joten edellä opittua voidaan soveltaa yksinkertaisesti käyttämällä (x) [m] arvoa lämpörasvan paksuutena.

Lämmönsiirtorasvan lämmönjohtavuuskerroin (k) [W/mK] saadaan valmistajan ilmoittamasta datalehdessä ja rasvan pinta-ala (A) [m^2] voidaan laskea tehpuoli-johdemuodulin pohjalevystä. (ΔT) kuvaa lämpötilaeroa lämmönlähteen sekä jäähdytys-elementin välillä.

$$H = \frac{dQ}{dt} = k * A * \frac{\Delta T}{x} \quad (2)$$



Kuva 5. Tutkittava jäähdytys kokonaisuus

Koska etenkin jäähdytys-elementtien, työelämässä myös *heatsinkeiksi* kutsuttujen komponenttien valmistajat kuvaavat tuotteidensa lämmönjohtavuutta lämpöresistanssien avulla, työssä käsitellään myös tämän käsitteen teoria (ks. 3.1.2).

3.1.2 Lämpöresistanssi

Lämpöresistanssit (θ) (3), joita käytetään kuvaamaan lämmönsiirtotietä ovat käytännöllisiä kuvaamaan lämmönsiirtomekanismin tehokkuutta. Lämpöresistanssi saadaan jakamalla lämpötilan muutos (ΔT) [$^{\circ}C$] lämpöteholla (q_k) [W]. Tästä johtamalla sama tulos saadaan jakamalla kappaleen pituus (L), kuten lämpörasvan paksuus lämmönjohtokertoimen (k) ja kosketuspinta-alan (A) [m^2] tulolla

$$\theta = \frac{\Delta T}{q_k} = \frac{L}{kA} \quad (3)$$

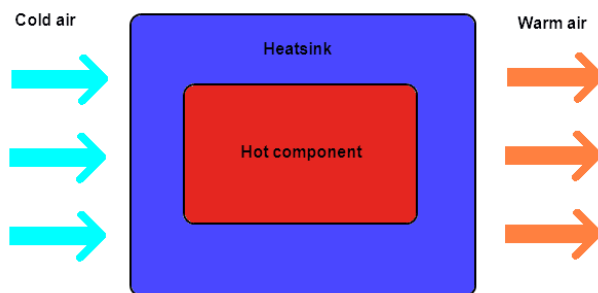
Yhteenvedona näistä kaavoista, voidaan päätellä lämpörasvan paksuuden sekä materiaalien lämmönjohtavuuskertoimien olevan hyvin tärkeitä tekijöitä tehoelektronikassa

maksimaalisen jäähdytystehon saavuttamiseksi. Kuten johdannossa todettiin, tulevaisuuden kasvavat vaatimukset pienemmistä laitteista rajoittavat jäähdytys-elementtien fyysisen koon kasvattamista, jolla vastaavasti saataisiin jäähdytysteho paremmaksi.

3.2 Lämmön konvektio

Konvektio elektroniikkalaitteessa tarkoittaa ilmavirtauksella tapahtuvaa lämmön siirtymistä. Se voi olla luonnollista tai esim. tuulettimen avulla pakotettua. Lämmön siirtyminen (Q_c) (4), on oleellisesti riippuvainen konvektion lämmönsiirtokertoimesta (h_c) [$W/cm^3 * ^\circ C$], lämmönsiirtoon käytetystä poikkipinta-alasta (A) [cm^3] sekä pintojen välisestä lämpötilaerosta (ΔT) [$^\circ C$]. Kuva 6 havainnollistaa jäähdytys-elementin konvektiota ylhäältä päin katsottuna. Kuvassa vasemmalta jäähdytys-elementtiin virtaava jäähdytysilma lämpenee ja virtaa lämpimänä ulos. Siihen on siis siirtynyt energiaa konvektion avulla.

$$Q_c = h_c A \Delta T \quad (4)$$



Kuva 6. Konvektion havaintokuva

Kaavasta (4) huomataan, että lämmönsiirtokertoimen (h_c) arvo voi olla haasteellista selvittää. Kerroin riippuu mm. pinnan geometriasta, lämpötilasta, paine-erosta sekä virtausnopeudesta. Lämmönsiirtokertoimelle on usein johdettu kirjallisuudessa erilaisia analyttisiä yhtälöitä, joita voidaan käyttää laskettaessa konvektion karkeaa vaikutusta jäähdytystä mitoitettaessa. Myös jäähdytys-elementtien toimittajat auttavat tarvittaessa selvittämään omien tuotteidensa lämmönsiirtokertoimet.

3.3 Lämmön säteily

Lämmön siirtyminen säteilemällä tarkoittaa jäähtymistä sähkömagneettisena säteilynä. Suurin säteilyenergia siirtyy aina infrapunasäteilynä. Säteilyyän vaikuttaa kolme parametria: kappaleen ja ympäristön lämpötilaero, kappaleen ja ympäristön pinnan rakenne ja kappaleen näkyvyys, jolla kappale näkyy ympäristölle.

Säteilyn oletetaan virheellisesti usein olevan merkityksetön lämmönsiirtomekanismi. Säteilymekanismin suhteellinen merkitys riippuu tasosta millä lämmönsiirtoa tarkastellaan, komponentti-, piirikortti- vai laitekotelotasolla. Piirikortille liitetyn komponentin lämmönsiirtomekanismina dominoi johtuminen, minkä suhteellinen osuus jäähtytykseen voi olla noin 80 %. Säteilyn ja konvektion osuus piirikorttitasolla on molemmilla noin 10 %.

Piirikortin tasolla säteily hallitsee jäähtytystä (kuva 7), koska johtumispinta-ala on rajoitetun pieni johtuen esimerkiksi korotusjaloista, joiden päällä piirikortti lepää.



Kuva 7. Piirikortin jäähtytys (Kuva ABB image bank)

Pakotetun konvektion avulla lämmönsiirtyminen on tehokkaampaa, mutta sitä ei ole aina mahdollista toteuttaa kuten korkeampien IP-luokkien laitteissa. Näissä ratkaisuissa on pyritty toteuttamaan jäähtytys riittävän suurilla jäähtytyspinta-aloilla ja käyttämään johtumista lämmönsiirtokeinona.

Erilaiset ja eriväriset pinnat säteilevät lämpöä eri tavoin. Tätä ominaisuutta kutsutaan emissiviteetiksi (ε)

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b}. \quad (5)$$

Emissiviteetin määritelmässä E on kappaleen säteilyvuo ja E_b on mustan kappaleen säteilyvuo. Musta kappale on paras säteilijä, joten emissiviteetti kuvaa, kuinka hyvä säteilijä jokin osa on mustaan kappaleeseen nähden. Mustalla kappaleella emissiiviteetti on siis yksi, ja täydellisellä heijastajalla se on nolla. Tästä voi olla hyötyä lämpösuunnittelussa, jos laitetta käytetään esimerkiksi auringonvalossa. Kiiltävän alumiinin emissiiviteetti on esimerkiksi vain 0,04, kun taas mustaksi anodisoituna emissiiviteetti on jopa 0,8.

3.4 Kontaktin lämpövastus

Elektroniikkatuotteissa esiintyy satoja erilaisia mekaanisia rajapintoja, jotka toimivat osittain myös lämmönsiirrossa. Tässä työssä lähempään tarkasteluun joutuvat seuraavien komponenttien väliset rajapinnat: tehopuolijohde, lämpörasva ja jäähdytys-elementti. Lämpörasva esitellään omassa luvussaan, se aiheuttaa myös oman vastuksensa lämmönsiirtoon. Kontaktin lämpövastus riippuu mm. pinnan karkeudesta, lämmönjohtavuudesta, materiaalien kovuudesta ja kontaktiin kohdistuvasta puristusvoimasta. Kontaktiin kohdistuvaa vastusta kuvataan efektiivisen lämmönsiirtokertoimen (Q_c) avulla, joka on tuttu konvektion teoriasta. Kontaktin lämpövastuksen (θ_c) (6) [$^{\circ}C/W$] kaavaksi saadaan samalla tavalla kontaktipinnan pinta-alan (A_s) [m^2] ja liitoksen lämmönsiirtokertoimen (h_c) [$W/m^2 * ^{\circ}C$] avulla

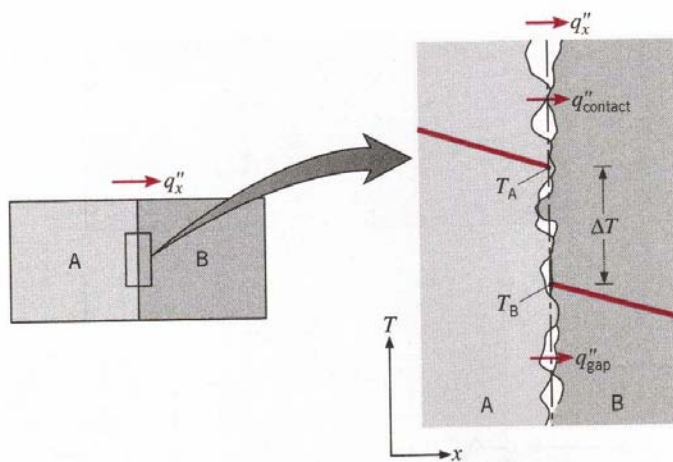
$$\theta_c = \frac{1}{h_c A_s}. \quad (6)$$

Tässä työssä käytettävien komponenttien liitokset tehopuolijohteen ja jäähdytys-elementtien välillä muodostetaan puristuskontaktilla. Hyvän termisen kontaktin aikaansaamiseksi tarvitaan sekä suuri puristava voima että oikea määrä lämpörasvaa.

Huonosta kontaktista seuraa tässä liitoksessa huonompi lämmönsiirtokyky ja siten komponentin suurempi lämpeneminen. Pitkäaikainen termien raskuus lyhentää komponentin elinikää tai jopa tuhoaa sen.

3.5 Kontaktivastus

Rajapinnoilla on lämmönsiirron kannalta suuri vaikutus. Rajapinnat sisältävät runsaasti pistekontakteja sekä ilmataskuja, joiden lämmönjohtavuus on hyvin heikkoa. Kuva 8 havainnollistaa tilannetta mikroskooppisella tasolla:



Kuva 8. Rajapinta mikroskooppisella tasolla [4]

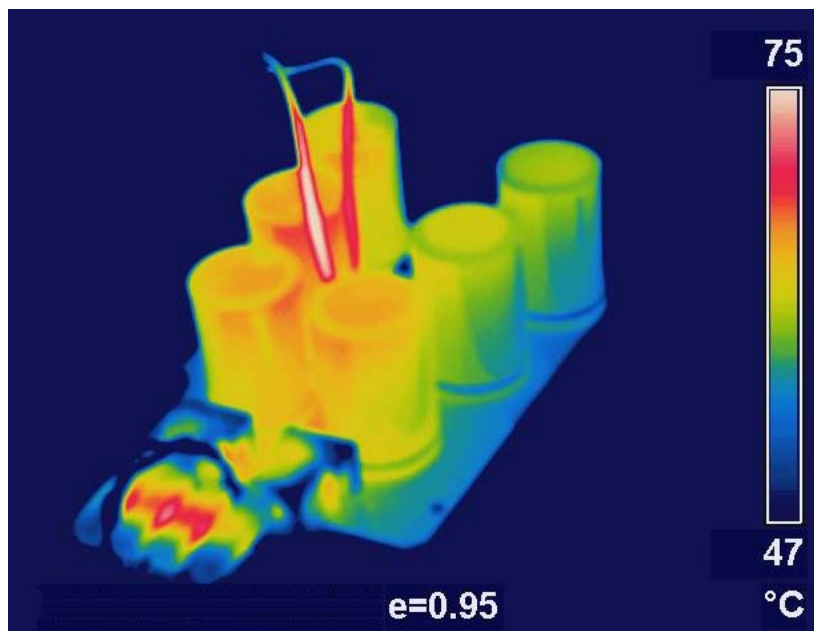
Ilmataskujen ja pintojen epätasaisuuksien eliminointi on erittäin tärkeää komponenteille, joiden toiminta on riippuvainen jäähdytys-elementeistä.

3.6 Lämpörajapinnat

Lämmönsiirron tehokkuus rajapintojen välillä riippuu käytettyjen materiaalien lämpöteknisistä ominaisuuksista. Lämpötekniset rajapinnat voidaan jakaa kahteen luokkaan, sisäisiin ja ulkoisiin rajapintoihin. Ulkoisilta rajapinnoilta lämpö siirtyy ympäristöön, joten näiden rajapintojen ominaisuudet sekä niillä tapahtuvat lämmönsiirtoilmiöt määräävät lämpötilan lämmönlähteen ja ympäristön välillä. Sisäiset rajapinnat määrittävät lämmönsiirtoreitit laitteen sisällä. Suuret lämpötilaerot laitteen sisällä voivat olla merkki huonosti suunnitelluista sisäisistä lämmönsiirtoreiteistä. Sisäiset rajapinnat

ohjaavat lämpövirtoja laitteen sisässä eli tasaavat lämpötilaeroja. Nämä lämpövirrat siirtyvät lopulta ulkoisten rajapintojen kautta ympäristöön.

Lämpörajapintojen tutkiminen on tehokkainta tehdä laitteella, joka mittaa lämmönlähteen lähettämää sähkömagneettista säteilyä. Näin säästytään hankalilta termoelementtien sijoitukselta, joilla kuitenkin saadaan vain tietyn pistekontaktin lämpötila. Jos tuntematon komponentti kävisi normaalia kuumempänä, sitä ei välttämättä huomattaisi virheellisellä termoelementin sijoituksella. Lämpökameralla otettu kuva 9 havainnollistaa lämpötilaeroja laitteen sisällä:

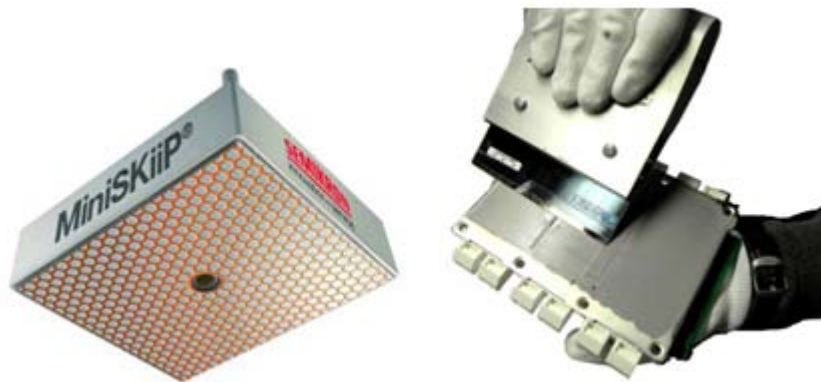


Kuva 9. Lämpökamerakuva piirikortilta

Punertavat alueet kuvastavat kuumimpia alueita ja siniset viileämpiä alueita. Kyseisessä kuvassa kondensaattorit jäähtyvät paremmin reunoilta, koska niiden välissä on pienempi ilmavirtaus. Lämpökamerakuvat antavat erittäin hyvää tietoa laitteen sisäisistä lämmönsiirtoreiteistä sekä komponenttien lämpötiloista. Tämä taas helpottaa lämpösuunnittelua, kun mietitään komponenttien sijoitusta tehokkaimmille lämmönsiirtoreiteille. Eniten jäähdystystehoa vaativat komponentit pitää sijoittaa laitteessa parhaille lämmönsiirtoreiteille, ja lämmölle arimmat komponentit mahdollisimman kauas kuumista komponenteista.

4 Lämmönsiirtorasvat

Lämmönsiirtorasvat (TIM), joita kutsutaan yleisimmin lämpörasvoiksi, ovat kehitetty pienentämään kontaktivastusta lämmönlähteen ja jäähdytys-elementin välillä. Lämpörasvat ovat usein silikoneja, jotka on kyllästetty hyvin lämpöä johtavilla partikkeleilla kuten pii-, hopea-, alumiini- tai sinkkioksideilla. Tehoelektronikassa pyritään käyttämään muita kuin silikonipohjaisia lämpörasvoja, jotta tuotteet soveltuisivat teollisuuden vaativiin käyttöihin kuten autoteollisuuteen. Lämpörasvoja on saatavilla lukuisia erilaisia tyyppisiä, jotka soveltuvat eri tarkoituksiin sekä erilaisiin asennuksiin. Kuvassa 10 on esitelty kaksi erilaista asennustapaa:



Kuva 10. Lämpörasvan asennustapoja [4]

Lämpörasva voi olla *maskattu* jo alihankkijalla komponentin pohjalevyyn, tai rasva voidaan levittää manuaalisesti vasta asennusvaiheessa. Molempien käyttötapojen edut käsitellään edempänä työssä.

4.1 Ominaisuudet

Lämpörasvat johtavat lämpöä paremmin kuin ilma ja niiden lämmönjohtokerroin (λ) vaihtelee rasvatyyppistä riippuen välillä $0,5 \dots 10 \text{ [W/m} \cdot \text{K]}$. Toisin sanoen niiden lämmönjohtokyky voi olla satoja kertoja parempi kuin ilman, ja siksi niitä käytetään täyttämään ilmataskut jäähdytys-elementin ja tehopuolijohteen välillä.

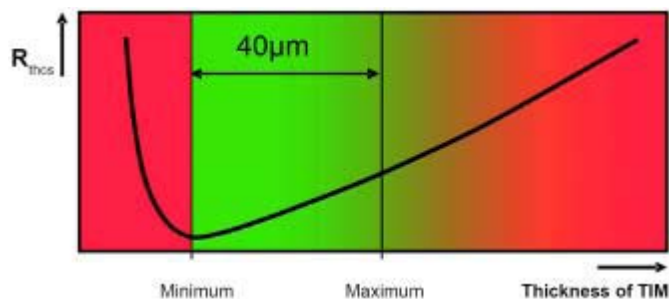
Lämpörasvojen pitkän aikavälin käyttäytymistä erityisesti syklisessä käytössä on tutkittu hyvin vähän. Syklisessä käytössä olevat lämpörasvat altistuvat huomattaville

lämpötilavaihteluille, jotka voivat aiheuttaa rasvan ominaisuuksien muuttumista tai jopa ilman pääsyn tehpuolijohteen ja jäähdytyslementin väliin.

4.2 Lämpörasvan asennus

Kuten aiemmin todettiin pieneltäkin tuntuva asia voi olla hyvin suuressa roolissa. Tämä pätee myös lämpörasvan paksuuteen ja oikeaan asennustapaan. Eri lämpörasvatyypeillä on omat optimaaliset asennustavat ja paksuudet. Ne riippuvat rasvan ominaisuuksista sekä käyttötarkoituksesta. Tehpuolijohteiden kanssa käytettävien rasvojen ensisijainen tarkoitus on minimoida lämpövastus poistamalla liitoksesta ilma sekä epätasaisuudet. Toiseksi tärkeimpänä ominaisuutena on taata mahdollisimman stabiilit ominaisuudet koko tuotteen elinkaaren aikana.

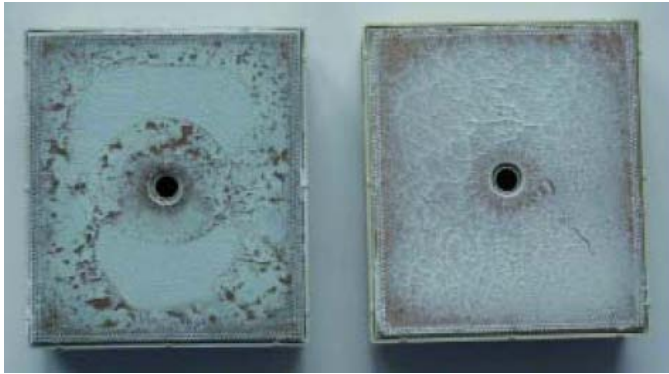
Lämpörasvan oikea paksuus löytyy rasvan toimittajan tarjoamasta datalehdessä. Tosin kerroksen paksuus on ilmoitettu ihanteellisissa olosuhteissa, joten mahdolliset asennuspintojen epätasaisuudet ja kuperuus on otettava huomioon. Kuvassa 11 on havainnollistettu erään lämpörasvan oikeaa asennusmäärää. Tässä ihanteellinen määrä rasvaa on rajattu $40\ \mu\text{m}$ alueelle.



Kuva11. Lämpörasvan oikea määrä eräälle rasvalle [4]

Liian pieni määrä rasvaa ei riitä täyttämään ilmataskuja, jotka taas aiheuttavat komponentin liiallista lämpenemistä.

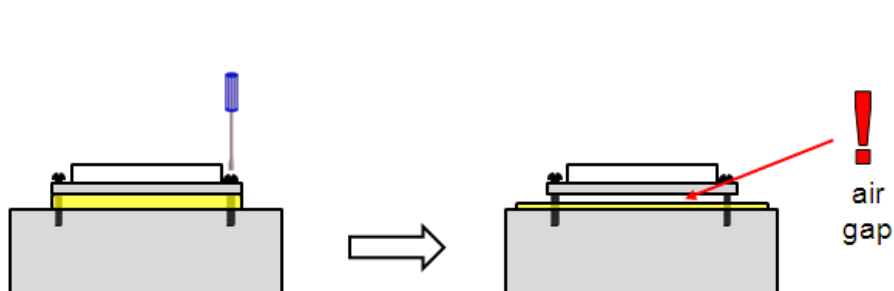
Kuvassa 12 vasemmalla lämpörasvaa on laitettu liian pieni määrä noin $30\ \mu\text{m}$, jolloin tuloksena on ollut metalli-ilma-metalli-kontakti, ja ilmataskut ovat toimineet eristimenä, josta on seurannut komponentin lämpeneminen. Ajan kuluessa tämäkin komponentti olisi luultavasti vikaantunut.



Kuva 12. Ilmataskuja lämpörasvassa [4]

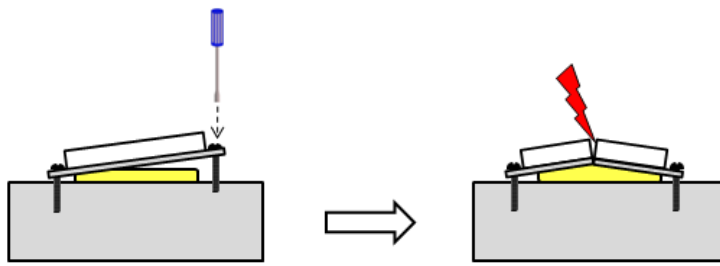
Oikealla olevassa kuvassa olevaa rasvaa on juuri oikea määrä noin $50\ \mu\text{m}$. Se on levinnyt tasaisesti ja toiminut oikein.

Liian suuri määrä rasvaa aiheuttaa sen valumisen pois ajan saatossa ja ilmavälin, josta seuraa taas lämpenemistä. Ongelmana on myös rasva-metalli-liitos, joka on paljon huonompi kuin metalli-metalli-kontakti. Kuvat 13 ja 14 havainnollistavat liian suuren rasvamäärän aiheuttamia ongelmia:



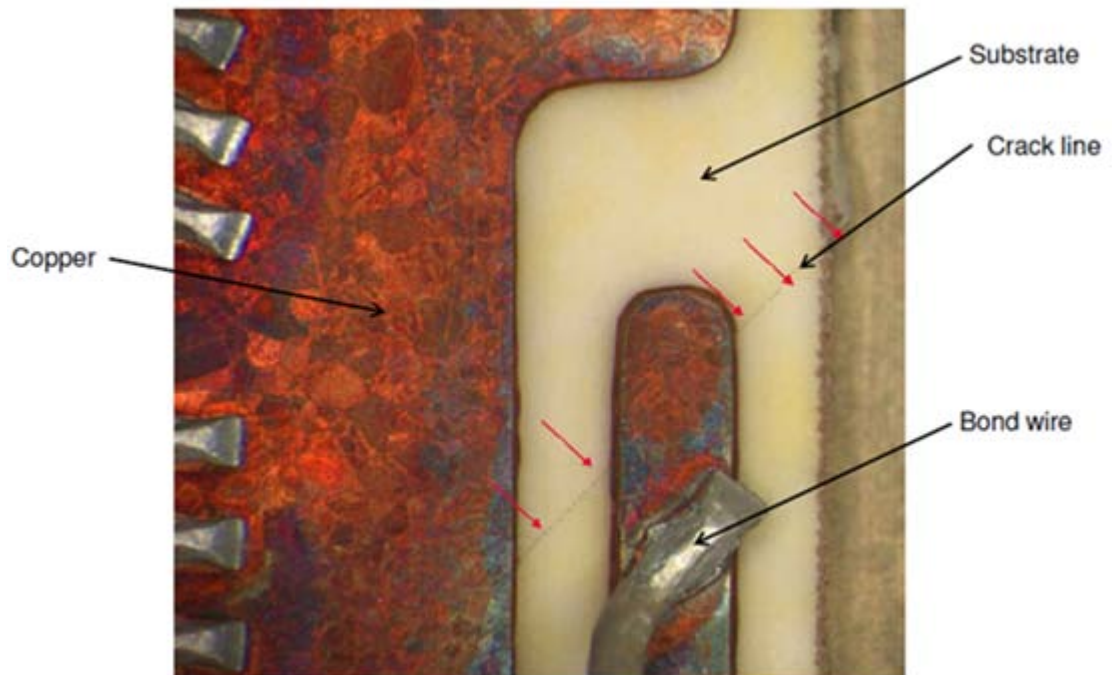
Kuva 13. Liiallinen määrä lämpörasvaa

Lisäksi vaarana on kiristää komponentti rikki, jos rasvaa on liian paljon välissä.



Kuva 14. Liiallinen määrä lämpörasvaa ja kiristys

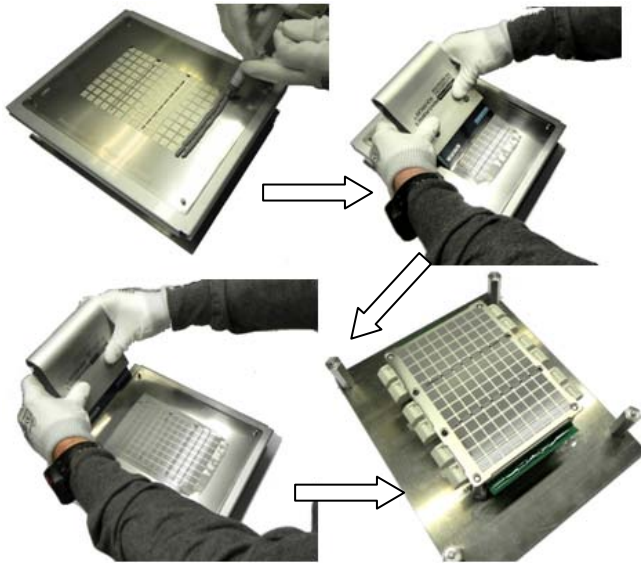
Oikea murtumalinja ei ole aivan havainnolliskuvan 14 näköinen komponentin katkeaminen. Kuva 15 on otettu mikroskoopilla oikean tehpuolijohteen murtumalinjasta:



Kuva 15. Mikroskoopilla otettu kuva murtumalinjasta

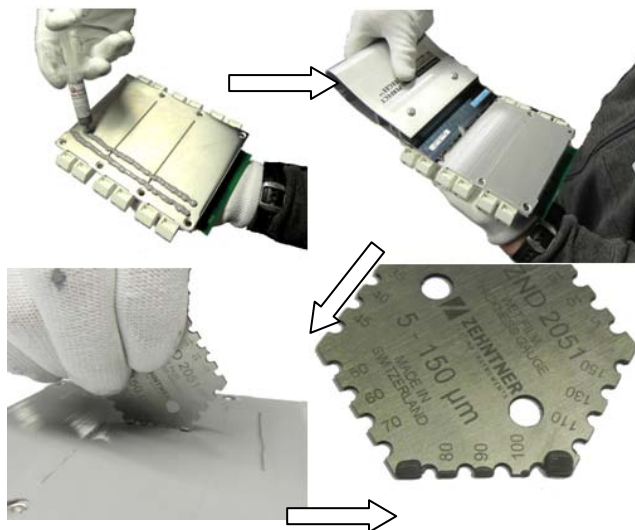
Hiusmurtumat tehpuolijohdemuulien substraateissa ovat aina vakavia, koska lämpölaajeneminen avaa murtumalinjan, josta seuraa läpilyönti. Tästä puolestaan seuraa joko maasulku tai tehpuolijohteen tuhoutuminen. Suurilla virroilla läpilyöntien aiheuttama jälki on usein lohdutonta katsottavaa.

Oikean määrän rasvaa voi varmistaa käyttämällä stensiiliä levitettäessä rasvaa. Seuraavan sivun kuvassa 16 on oikea levitystapa stensiilin avulla käyttäen lastaa.



Kuva 16. Lämpörasvan levitys stensiilin avulla

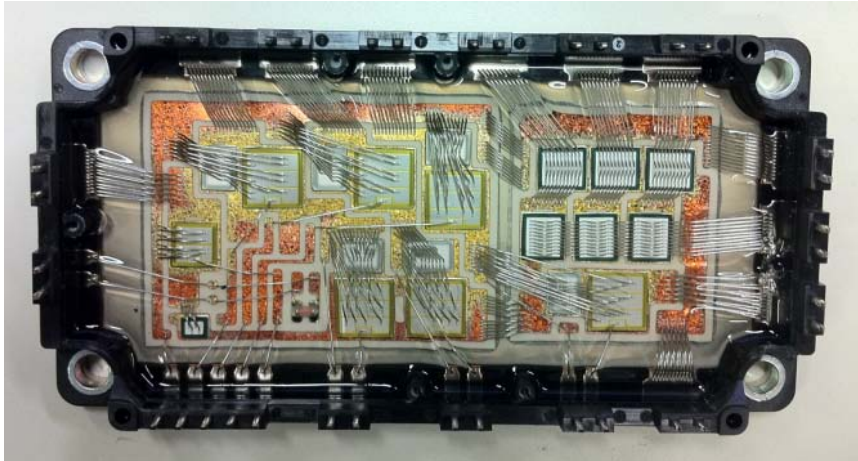
Jos stensiiliä ei ole käytettävissä on rasva levitettävä tarkkuuslastalla sekä varmistettava oikea rasvamäärä mittatyökalulla (kuva 17). Näin voi käydä esimerkiksi asiakkaan tiloissa työskentelevälle huoltomiehelle.



Kuva 17. Rasvan levitys ilman stensiiliä

5 IGBT-tehpuolijohdemoduuli

Vaihtosuuntauksessa käytettävä transistoreista ja diodeista koostuva kytkentä voidaan toteuttaa yhden tai useamman IGBT-moduulin avulla (kuva 2). Laitteen suunnittelusta riippuen yksi moduuli voi sisältää joko yhden tai kaikkien vaiheiden vaihtosuuntaukseen tarvittavat komponentit. Todella suurissa laitteissa tarvitaan myös useita vaihemoduuleja. Moduuleita on saatavilla alihankkijoilta satoja erilaisia tyyppisiä.

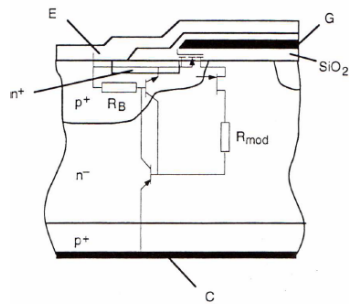


Kuva 18. Tasa- ja vaihtosuuntaajat samassa komponentissa

Kuva 18 havainnollistaa eräässä taajuusmuuttajassa käytettyä IGBT-tehpuolijohdemoduulia, joka sisältää kaikki tarvittavat komponentit tasasuuntauksen sekä vaihtosuuntauksen toteuttamiseen. Tämän lisäksi moduulissa on yksi tehpuolijohde jarrukatkojaa varten. Tällä kytkennällä voidaan syöttää liika energia ulkoiseen jarruvastukseen, jos laitteen DC-piiri ei kykene varastoimaan kaikkea moottorista vapautuvaa energiaa esimerkiksi jarrutustilanteessa.

5.1 IGBT-moduulin rakenne ja toiminta

Yhden IGBT-alkion rakenne on esitelty seuraavan sivun kuvassa 19. Käytännössä kaikkien IGBT-tehpuolijohdeiden toimintaperiaate on sama. Alkioita kytketään tarpeen mukaisesti IGBT-paketeissa sarjassa tai rinnan, joka parantaa komponentin virrankestoisuutta.

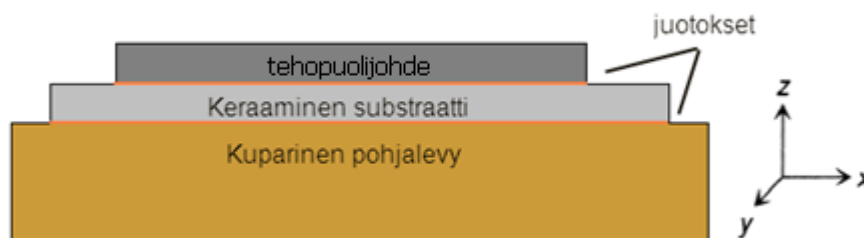


Kuva 19. IGBT-alkion rakenne [2]

Kuvan IGBT-alkio koostuu pnp-transistorista, jota ohjataan MOS-transistorin avulla. Kun hilan (G) ja emitterin (E) välinen jännite ylittää kynnsjännitteen, emitterimetallonnin alla sijaitsevan pnp-transistorin estosuuntainen pn-rajapinta häviää p-alueen muuttuessa n-alueeksi. Tällöin MOS-transistori alkaa syöttää pnp-transistorin kannalle ohjausvirtaa, jonka ansiosta pnp-transistori siirtyy johtavaan tilaan. Tämä taas avaa yhteyden IGBT:n kollektorilta (C) emitterille, jolloin virta alkaa kulkea ja IGBT kytkeytyy [2;3.].

5.2 Lämmön leviäminen

Koska tehpuolijohdemuodulienalkiot, ns. *chipit*, ovat hyvin pieniä ja kuumia komponentteja, lämmön on päästävä leviämään laajemmalle alueelle riittävän jäähdytystehon aikaansaamiseksi.



Kuva 20. Lämpövuon leviäminen

Kuvassa 20 on esitelty lämpövuon kasvattamista x- ja y- suuntiin laittamalla hyvin johtavaa materiaalia lämmönsiirtopolulle.

6 Testauskonsepti

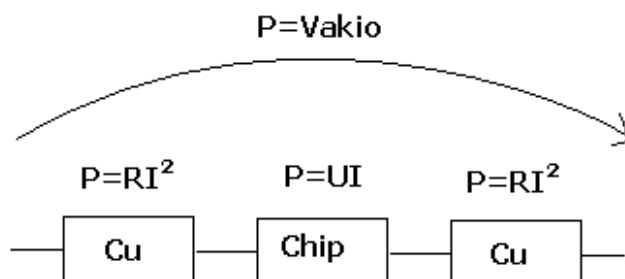
Lämmönsiirtorasvojen ikääntymistä pystytään testaamaan usealla eri tavalla kuten lämmitettävillä sähkövastuksilla. Koska tässä toteutettavan testauskonseptin haluttiin olevan mahdollisimman lähellä todellista syklistä käyttöä, päädyttiin käyttämään oikeita IGBT-moduuleja. Haluttiin tutkia viittä erilaista lämmönsiirtorasvaa kerralla ja virheen minimoimiseksi päädyttiin kahteen näytteeseen per/rasva. Tästä seurasi kymmenen IGBT-jäähdytyslementtipaketin valmistaminen.

Testauskonseptin haluttiin mekaanisesti jäljittelevän mahdollisimman pitkälle taajuusmuuttajakäyttöä. Osat kuten puhaltimet, IGBT-moduulit ja jäähdytyslementit piti olla tehtaan sisäisiltä tuotantolinjoilta löytyviä komponentteja, jotta varaosien mahdollinen saatavuus olisi turvattu. Lisäksi komponenttien mahdolliset muutokset piti dokumentoida selkeästi, jotta ainut tieto laitteen käytöstä ei olisi tämän työn tekijällä.

6.1 Teholähde

Taajuusmuuttajakäytössä tehopuolijohdealkion päästöjännite kasvaa komponentin lämmetessä. Tämä taas kasvattaa, puolijohdealkion lämpötilaa entisestään, jolloin taajuusmuuttaja kompensoi tilannetta pienentämällä kytkentätaajuutta.

Teoreettisella tasolla tarkasteltuna vakioteholla päästöjännitteen kasvaessa häviöt ovat pienemmät muualla kuin tehopuolijohdealueella. Näin ollen pohjalevyn lämpöprofiili muuttuisi ajan kuluessa jos päästöjännite kasvaisi. Kuva 21 havainnollistaa tilannetta tehopuolijohdealueen tasolla tarkasteltuna:



Kuva 21. Vakiotehon vaikutus tehopuolijohdeeseen

Vakiovirtalähdettä käytettäessä kuparihäviöt olisivat samat, mutta tehpuolijohteen häviöt kasvaisivat. Tästä seuraisi automaattisesti myös lämpöprofiilin muutos.

Molempia vaihtoehtoja puntaroidessa tehpuolijohteen lämpöprofiili tulee muuttumaan päästöjännitteen kasvaessa. Valittiin käytettäväksi vakioteholähde, koska haluttiin minimoida IGBT-tehoduulien häviöistä tai eroista aiheutuneiden ominaisuuksien muutokset. Tällöin pystyttiin keskittymään itse rasvassa tapahtuvan muutoksen seuraamiseen paremmin kuin vakiovirtalähteen avulla. Käytettäessä vakioteholähdettä saadaan lämmönsiirtorasvan kuormitus pidettynä vakiona koko testin ajan.

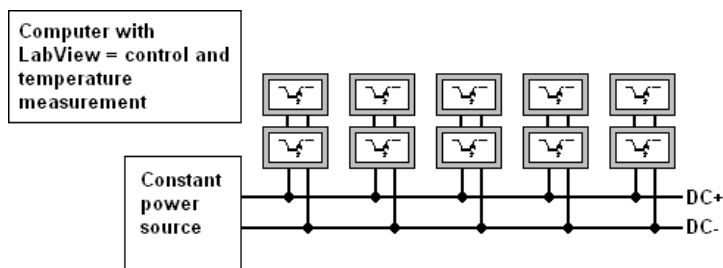
Teholähteeksi hankittiin TDK-Lambdan valmistama ohjelmoitava 10 kW:n vakio-
teholähde (kuva 22). Laite on kykenevä siis tuottamaan jatkuvasti 1 000 A virran 10 V:n jännitteellä.



Kuva 22. Testauslaitteiston vakioteholähde

Lisäksi laitteen ohjelmoitavuus sekä sisäänrakennetut suojaustoiminnot olivat päätökseen vaikuttaneita kriteereitä. Laitteeseen saa ohjelmoitua ylijänniterajan, jolloin oikosulun sattuessa laite kytkeytyy pois päältä ja lähettää vikailmoituksen.

Seuraavalla sivulla esitelty testauskytkentä (kuva 23) päätettiin toteuttaa kytkemällä kaksi IGBT-moduulia sarjaan, koska yhtä rasvaa tutkitaan kahdella näytteellä. Kaksi näytettä yhtä rasvaa kohden pienentää virhemahdollisuutta huomattavasti.



Kuva 23. Testauskytkentä

Etuna tällä kytkennällä saadaan vakiooteho kulkemaan aina yhden lämmönsiirto-rasvarin läpi samana, vaikka komponenttien ominaisuuksien välillä olisikin eroa.

6.2 IGBT-moduuli

Fyysiseltä kooltaan pienen, mutta suurien häviöiden tuottamiseen valittiin Infineonin EconoDual3 FF450R12ME4 IGBT-moduulit. Infineonin datalehdessä (liite1) tutkittuna kyseinen komponentti sopi testauslaitteistoon parhaiten. Infineolta tilattiin kyseisiä komponentteja 20 kappaletta (kuva 24). Määrällä haluttiin varmistaa mahdollisimman tasalaatuinen komponenttien otanta sekä mahdollisten asennuksissa rikottujen komponenttien korvaaminen nopeasti.



Kuva 24. Testerin IGBT moduulit

Kaikissa tehopuolijohteissa on valmistusteknisistä syistä johtuen pieniä eroja, kuten myös IGBT-moduuleissa. Koska tutkittavat lämpötilanmuutokset ovat hyvin pieniä, päätettiin kysyä IGBT-komponenttien alihankkijalta päästöjännitetestin (taulukko 1) tulokset, jotta osattiin valita jokaiselle lämpörasvalle mahdollisimman samanlaiset IGBT-moduulit.

Taulukko 1. Komponenttien päästöjännitetestin tulokset

Component sn.	VCE System 1	VF System 1	VCE System	VF System	Result
#03081280502235104900046	1,507	1,418	1,56	1,479	PASS
#03081280502235104900047	1,517	1,417	1,564	1,477	PASS
#03081280502235104900048	1,504	1,42	1,557	1,485	PASS
#03081280502235104900053	1,517	1,422	1,565	1,481	PASS
#03081280502235104900054	1,517	1,433	1,57	1,495	PASS
#03081280502235104900056	1,495	1,397	1,555	1,467	PASS
#03081280502235104900057	1,509	1,398	1,568	1,466	PASS
#03081280502235104900063	1,519	1,398	1,57	1,462	PASS
#03081280502235104900068	1,507	1,423	1,561	1,485	PASS
#03081280502235104900069	1,509	1,418	1,564	1,48	PASS
#03081280502235104900432	1,501	1,414	1,559	1,477	PASS
#03081280502235104900438	1,505	1,404	1,56	1,466	PASS
#03081280502235104900439	1,5	1,403	1,556	1,468	PASS
#03081280502235104900440	1,508	1,396	1,561	1,461	PASS
#03081280502235104900441	1,503	1,397	1,561	1,46	PASS
#03081280502235104900442	1,505	1,405	1,563	1,465	PASS
#03081280502235104900443	1,509	1,413	1,568	1,474	PASS
#03081280502235104900444	1,51	1,411	1,563	1,473	PASS
#03081280502235104900445	1,511	1,405	1,564	1,463	PASS
#03081280502235104900460	1,511	1,409	1,567	1,473	PASS

Taulukossa Vce1 kuvaa ylähaaran päästöjännitettä, Vce2 alahaaran päästöjännitettä, Vce system kuvaa IGBT-päästöjännitettä ja Vf system diodin päästöjännitettä. Testerissä diodin päästöjännitteen arvo on merkityksetön. Diodia ei käytetä testissä, koska laitteella ei vaihtosuunnata DC-jännitettä. AC-terminaalit jätetään siis kytkemättä kokonaan. Päästöjännitetestin tulokset vaikuttavat alihankkijalla komponenttien luokitteluun. Tyypillisesti vastavalmistettujen moduulien päästöjännitteiden erot vaihtelevat välillä +/- 30-50 mV. Jos sarjaan kytkettyjen IGBT-moduuleiden päästöjännitteet eivät olisi lähellä toisiaan, se aiheuttaisi rasvoille erilaisen rasituksen kytkettäessä yhden rasvan IGBT:t sarjaan.

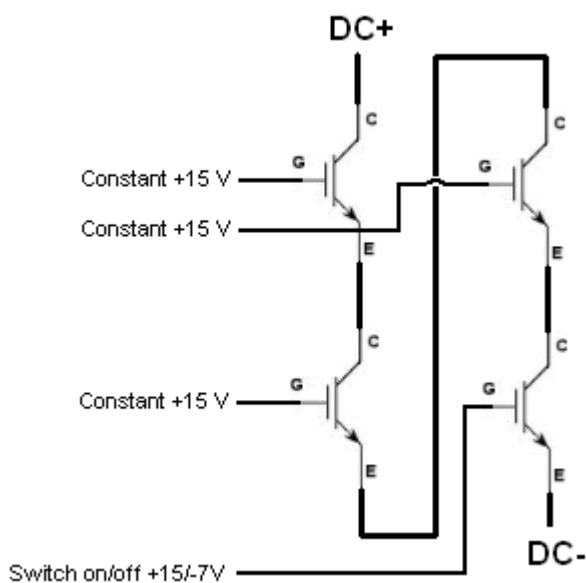
Valintakriteerinä sopiville pareille oli Vce1 ja Vce2 arvojen olevan mahdollisimman lähellä toisiaan. Valittiin taulukosta 1 sopivat parit jotka on esitelty seuraavan sivun taulukossa 2.

Taulukko 2. Valitut parit

	IGBT 1	IGBT 2
Grease 1	#03081280502235104900069	#03081280502235104900444
Grease 2	#03081280502235104900443	#03081280502235104900057
Grease 3	#03081280502235104900068	#03081280502235104900442
Grease 4	#03081280502235104900047	#03081280502235104900053
Grease 5	#03081280502235104900438	#03081280502235104900441

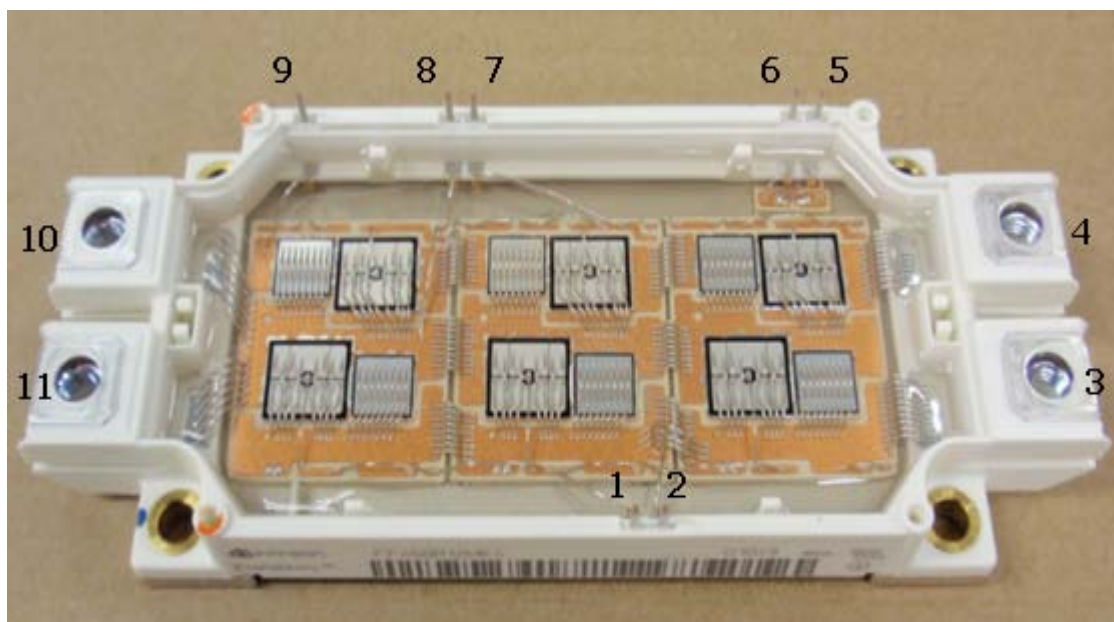
Valintojen kriteereinä oli alihankkijan testaustuloksiin perustuneet päätelmät. Toteutettiin vielä ennen moduulien kytkentää *curve tracer* -mittaus, jolla voitiin varmistaa päästöjännitteiden olevan lähellä toisiaan.

IGBT-moduulien ohjaus toteutettiin kuvan 25 tavalla. Kahden sarjaankytketyn IGBT-moduulin ohjaus toteutettiin syöttämällä kolmelle hilalle jatkuva jännite ja kytkemällä vain yhtä hilaa.



Kuva 25. Toteutettu IGBT:n-kytkentä sekä ohjaus

Kun viimeistä hilaa kytketään, siirtyy koko sarjaankytketty ketju johtavaan tilaan ja moduulit alkavat lämmitä vakioteholla. Vastaavasti koko ketju sammuu myös sammutettaessa viimeinen hila. Edellä esitetty havainnolliskuva vastaa laitteen kytkentää. Seuraavan sivun kuvasta 26 ilmenee IGBT-moduulin rakenne ja liittimet joihin kytkentä toteutetaan:



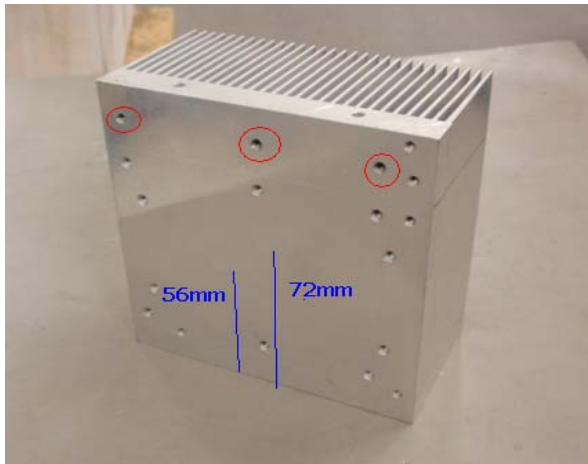
Kuva 26. IGBT:n rakenne

Terminaalien selvitykset löytyvät datalehdestä (liite s.2). Tässä työssä jätettiin kytkemättä lämpötilanmittaus pinnit 5 ja 6 sekä AC-terminaalit 10 ja 11. Hilan ohjaukseen käytetään pinnejä 1 ja 7.

6.3 Jäähdytyslementti

IGBT:n valinta asetti kriteerit jäähdytyslementille. Jäähdytystehon piti olla riittävän suuri, mutta fyysinen koko ei saanut paisua kohtuuttoman suureksi asennustilan ollessa rajallinen. Testerin piti viedä mahdollisimman vähän tilaa ja olla helposti liikuteltavissa paikasta toiseen.

Vertailemalla tuotannosta löytyneiden jäähdytyslementtien fyysisiä mittoja, päädyttiin käyttämään jäähdytyslementtinä ACS880-tuoteperheen raamikoon 4 laitteen jäähdytyslementtiä. Käytetty jäähdytyslementti on esitelty seuraavan sivun kuvassa 27. Siihen on myös merkitty muutokset tuotantomalliin verrattuna.



Kuva 27. ACS880 R4-jäähdytyslementti

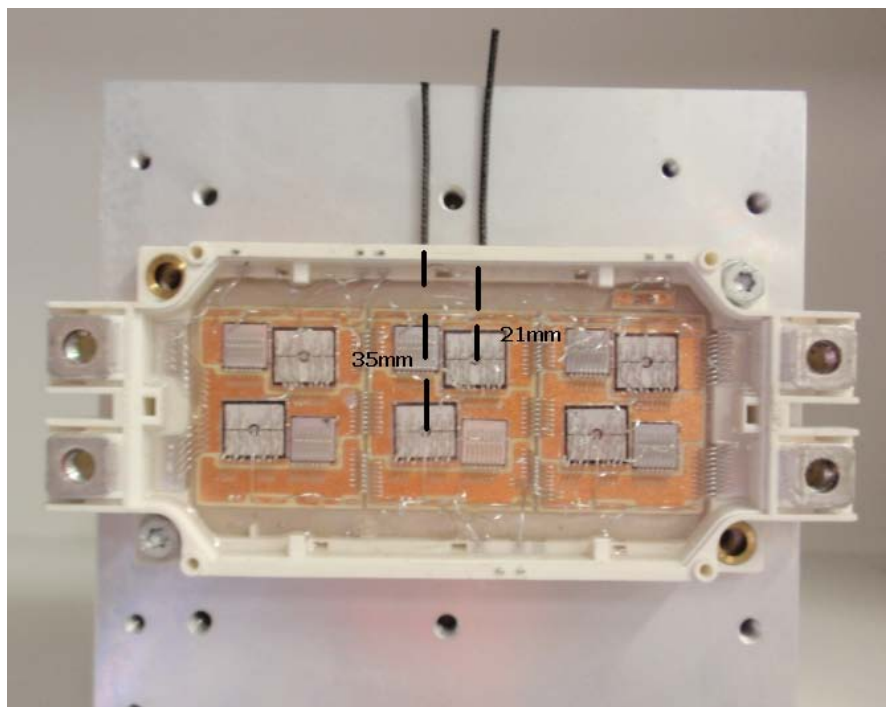
Kuvassa punaisella ympyröidyt reiät sijaitsevat 13 mm päästä pohjasta. Ne porattiin 12 mm syvyyteen ja näistä rei'istä tapahtuu kiinnitys tulevaan tuulitunneliin. Siniset reiät ovat porattu jäähdytyslementtiin ylemmästä päädystä. Poraus tehtiin käyttäen vesi-vaakaa ja erikoispitkiä 1,7 mm:n paksuja bi-metalli poranteriä, jolla oli mahdollista saavuttaa termoelementille oikea paikka IGBT:n tehopuolijohteen alla jäähdytys-elementin puolella.



Kuva 28. Termoelementin poraus jäähdytyslementtiin

Kuvan 28 poraus oli hyvin haasteellinen, kun terä oli erittäin ohut, koska alumiini on metallina suhteellisen pehmeä. Poranterä piti saada kulkemaan 1,5 mm jäähdytselementin pinnasta 72 mm:n syvyyteen asti. Vaikka pienillä poranterillä pitäisi käyttää suurta pyörimisnopeutta, käytettiin reiän syvyyden takia hieman ohjearvoa pienempää nopeutta sekä leikkuuöljyä pienentämään kitkaa. Pienikin poikkeama aiheutti terän ohjautumisen vinoon, joka johti joko terän katkeamiseen tai jäähdytselementin pinnan vaurioitumiseen. Kaksi jäähdytselementtiä tuhoutui porauksissa edellä mainituista syistä käyttökelvottomiksi.

Vastaavasti termoelementit porattiin IGBT-moduulin pohjalevyyn keskimmäisten tehopuolijohteiden alle. Tutkimuksissa on todettu keskimmäisten tehopuolijohteiden käyvän kaikkein kuumimpina, joten lämmönsiirtorasvan tutkiminen näiden neljän termoelementin välillä luo parhaat edellytykset löytää lämmönsiirtorasvoille eroja. Kuvassa 29 on esitelty läpileikkauksena IGBT:n pohjalevyyn poratut termoelementit.



Kuva 29. Läpileikkaus asennetuista termoelementeistä

Koska kuparinen pohjaelementti oli vain 3 mm paksu oli, 1,7 mm:n reikien poraaminen lähes yhtä vaikeaa, kuin alumiiniseen jäähdytselementtiin. Kupari osoittautui huomattavasti kovemmaksi aineeksi alumiiniin verrattuna.

Jäähdytyslementin alaosaan asennettiin vielä muovista kouru estämään mahdollisesti olomuotoaan muuttaneen lämmönsiirtorasvan valuminen tuulitunneliin. Jos mahdollisia valumia tulee, on ne helppo havaita läpinäkyvän muovin päältä. Valuva rasva tai jokin osa rasvasta, esimerkiksi juoksute voi todellisessa sovelluksessa aiheuttaa vaaran jos sähköä johtavaa liuosta pääsee valumaan väärään paikkaan. Koska jäähdytyslementit päädyttiin asentamaan luonnolliseen pystyasentoon, voidaan tämäkin arvokas tieto selvittää tällä testilaitteistolla.

6.4 Tuulitunneli

Jotta tutkittavien lämmönsiirtorasvojen erot voitaisiin selvittää vertailukelpoisesti oli olosuhteiden vaikutus minimoitava. Olosuhteet pyrittiin luomaan mahdollisimman stabiileiksi kaikkien testikohteiden välille. Useita eri asennustapoja harkittiin. Lisäksi pohdittiin mahdollisuutta käyttää yhtä isoa tuulitunnelia, josta ilma jaettaisiin jäähdytyslementeille. Yksi iso kokonaisuus, johon kaikki jäähdytyslementit olisi kiinnitetty, olisi vaatinut harjaantuneempia mekaniikan suunnittelutaitoja sekä mahdollisesti osien teettämistä alihankintana. Lisäksi paine-erojen aiheuttama lämmön jakautuminen olisi pitänyt mallintaa tietokoneella, jos oltaisi käytetty yhtä isoa puhallinta sekä lukuisia ilmanohjaimia ohjaamaan jäähdytysilmaa oikeaan paikkaan.

Lopulta päädyttiin rakentamaan viisi yksinkertaista tuulitunnelia (kuva 30), jotka olivat yksinkertaisesti kantattavissa pellosta. Tuulitunnelin pituuden määräsi jäähdytyslementin sekä puhaltimen leveys.



Kuva 30. Tuulitunneli

Ilman haluttiin jakaantuvan tasaisesti jäähdytyslementeille, joten oli annettava riittävästi tilaa puhaltimen aiheuttamien pyörteiden tasaantumiseen tunnelissa. Tästä seuraa paine-ero jäähdytyslementin yli, jolloin ilmavirta jäähdyttää tasaisesti koko jäähdytyslementin pinta-alalla. Nyrkkisääntönä hyvälle ilman jakaantumiselle on yhtä pitkä tyhjä tila puhaltimen ja jäähdytyslementin välille kuin jäähdytyslementin pituus. Tuulitunnelin reunoille kantattiin vielä asennuskehukset, joiden avulla kiinnitys testipöytään oli mahdollista. Kaikki peltien väliset liitokset tehtiin vetoniittejä käyttäen.

6.5 Puhallin

Taajuusmuuttaja asennetaan tosielämässä yleensä pystyasentoon. Jäähdytysilma kulkee alhaalta ylöspäin laitteen sisäisiä lämmönsiirtoreittejä. Puhaltimeksi valittiin pienen taajuusmuuttajan IP55-luokan 24 V:n ja 0,48 A:n puhallin (MRP 64408356). Samaa puhallinta käytetään myös laitteessa, jonka jäähdytyslementti valittiin testeriin. Kuvassa 31 on esitelty käytetty puhallin, joka on tyypiltään imevä.



Kuva 31. Testauslaitteistossa käytetty puhallin

Puhaltimen runkopelti muotoiltiin kanttikoneella vastaamaan rakennetun tuulitunnelin muotoja. Lisäksi tuulitunneliin asennettiin vetoniiteillä kierteet, joihin puhallin on helppo kiinnittää sekä irrottaa, jos puhallin pitää uusia.

6.6 Ilmanohjain

Identtisen ilmavirtauksen takaaminen eri jäähdytyselementtien välillä vaati ilmanohjaimien lisäämisen jäähdytyselementtien välille. Tällä ratkaisulla eliminoitiin myös jäähdytyselementtien fyysinen kontakti toisiinsa. Ilmavirtaus ei siis pääse sekoittumaan yhden rasvan näytteen molempien jäähdytyselementtien välillä. Lisäksi parannettiin ylipainepuolta eli jäähdytyselementtien yläpuolta rakentamalla ilmanohjaimet jokaisen jäähdytyselementin päälle. Koska koko testerin päälle asennetaan käyttöturvallisuuden lisäämiseksi kovamuovinen suoja, päätettiin myös nämä ilmanohjaimet tehdä muovista, jolloin ne pysyvät kosketusturvallisina vaikka laitteeseen tulisi sähkövika. Laitteen kaikki sähkölle alttiit osat haluttiin suojata mahdolliselta kosketukselta tai esimerkiksi putoavalta työkalulta. Kuvalla 32 havainnollistetaan muovin muotoilua. Ensin lämmitettiin sopiva kappale kuumailmapuhaltimella, sitten kantattiin sopivat kulmat kanttikoneella, ja lopuksi jäähdytettiin muoto pysyväksi kylmäspraylla.



Kuva 32. Muovin kanttaamisen työvaiheet

Kyseisillä työvaiheilla saatiin muovi muotoutumaan suorakulmaan ilman että muovi olisi muuttanut ominaisuuksiaan. Jos muovia lämmitetään liian pitkään, se venyy tai alkaa palaa. Käyttämällä kylmäspraytä saatiin muovin muoto jäähdytettyä hetkessä pysyväksi, eikä muodonmuutosta ehtinyt tapahtua.

Kuva 33 havainnollistaa valmista elementin päälle asennettua ilmanohjainta. Huomaa myös kuvassa jäähdytyslementtien väliin asennettu ilmanohjain. Ilmanohjaimen liitokset tehtiin käyttäen useaa muoviruuvia, jotta metallisia osia ei ole kosketettavissa laitteen ollessa toiminnassa.



Kuva 33. Jäähdytyslementin ilmanohjaimet

6.7 Kokoonpanon asennus testeriin

Karkean *layout* -suunnittelun tuloksena saatiin jäähdytyslementtien tarvitsemaksi tilaksi pituussuunnassa 90cm. Vakioteholähde painoi yli 40 kilogrammaa joten se piti asentaa alatasolle, tällä haluttiin pitää testauslaitteiston painopiste mahdollisimman alhaalla. Näiden ehtojen perusteella Trestonin kuvastosta löytyi sopiva SAP 710-työpöytä. Kokoa pöydällä oli tarvittava 700x1000 mm ja kantavuutta riittävät 150 kg. Sopiva pöytä tilattiin Trestonilta vielä yhdellä ylimääräisellä välitasolla johon vakioteholähde voitaisiin kiinnittää.

Trestonin pöydän saavuttua päästiin asentamaan jäähdytyslementti kokoonpanoja ja suunnittelemaan lopullista *layoutia*. Päätettiin toteuttaa asennus alkuperäisen suunnitelman mukaisesti asettelemalla jäähdytyslementit riviin pöydän toiseen reunaan. Asennuksen etuna oli tulevien mittalaitteiden sijoitus jäähdytyslementtien etupuolelle sekä jännitteellisten DC-kiskostojen asentaminen jäähdytyslementtien taakse. Kun jännitteelliset kiskot ovat yhdessä paikassa ne on helpompi suojata, jolloin laitteen käyttöturvallisuus paranee. Seuraavan sivun kuvassa 34 on esitelty lopullinen *layout*:

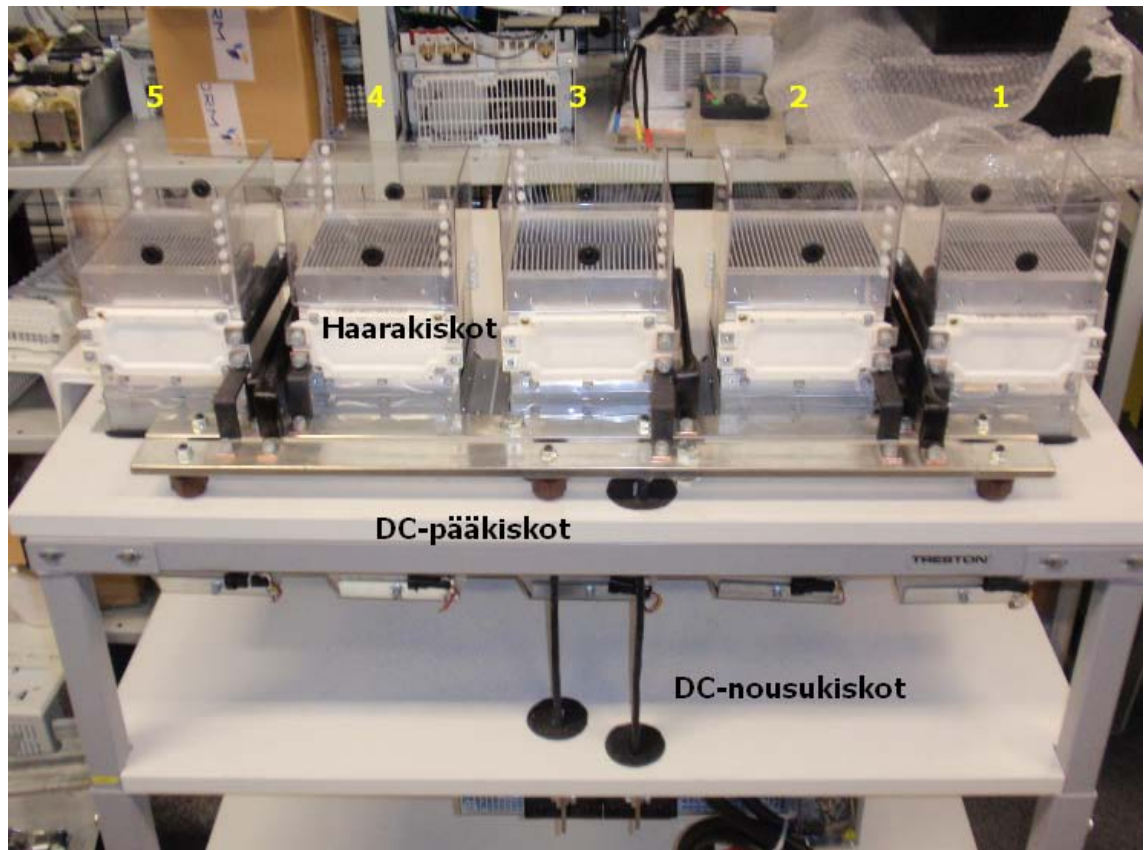


Kuva 34. Jäähdytys-elementit asennettuna pöydälle

Kuva on otettu takapuolelta pöytää ja katsojasta nähden pöydän etureunaan asennetaan DC-kiskosto. Jäähdytys-elementtien reiät on sahattu pöytään kuviosahalla ja ne on tiivistetty asennusnauhalla varmuuden vuoksi. Elementit ovat myös sijoitettu identtisen matkan päähän toisistaan, jolloin ilma jakaantuu puhaltimien kesken mahdollisimman ideaalisesti.

6.8 Kuparihäviöt

Koska kiskostot olivat fyysisesti vaikea rakentaa identtisiksi, tyydyttiin rakentamaan jäähdytys-elementeille kaksi DC-nousukiskoa sekä DC-pääkiskot, joista jokaiselle rasvaparille haaroitettiin pienemmät kiskostot. Haarakiskostojen pituus pidettiin samana jäähdytys-elementtien välillä. Koska kiskojen väliset liitännätpisteet olivat eri etäisyydellä nousukiskojen sekä pääkiskojen liitoskohdasta, piti jokaiselle haarakiskostolle laskea omat kuparihäviöt, joita voidaan käyttää hyväksi tulevaisuudessa analysoitaessa tuloksia. Seuraavan sivun kuvassa 35 on havainnollistettu DC-kiskojen lopullista toteutustapaa:



Kuva 35. Testilaitteen DC-kiskostot

Kuvassa on numeroitu myös jäähdytys-elementit järjestysnumeroineen. Alla olevassa taulukossa 3 on esitelty kiskostojen mitatut pituudet (l) sekä laskettujen resistanssien ($R = \rho * l / A$) arvot kuparin ominaisresistanssin avulla. Taulukosta huomataan resistanssin olevan pienin elementillä 3, koska kiskostojen pituus on suhteessa lyhyin.

Taulukko 3. Kiskostojen mitat ja resistanssit

Cu ominaisresistanssi		1,68E-08	Ωm				
				DC-nousukisko	DC-pääkiskon	DC-haara	
	pituus /m	leveys /m	paksuus /m	Etäisyys /m	resistanssi Ω	resistanssi Ω	Resistanssitot Ω
DC-nousukisko	0,45	0,03	0,005			0,000050	
DC-pääkisko	0,78	0,04	0,01				
Haarakiskot 1	0,61	0,018	0,003	0,59	2,48E-05	0,000190	2,65E-04
Haarakiskot 2	0,61	0,018	0,003	0,51	2,14E-05	0,000190	2,62E-04
Haarakiskot 3	0,61	0,018	0,003	0,12	5,04E-06	0,000190	2,45E-04
Haarakiskot 4	0,61	0,018	0,003	0,55	2,31E-05	0,000190	2,63E-04
Haarakiskot 5	0,61	0,018	0,003	0,62	2,60E-05	0,000190	2,66E-04

Edellisestä taulukosta 3 laskettujen arvojen perusteella voitiin selvittää jännitehäviöt, jotka aiheutuivat epälinearisista kiskojen pituuksista. Jännitehäviöt laskettiin Ohmin lakia käyttäen ($U = RI$). Taulukko 4 esittää jännitehäviöt koko kiskostolle kahdella teoreettisilla virran arvoilla 200 ja 400 ampeeria:

Taulukko 4. Jännitehäviöt esimerkin virran arvoilla

	resistanssi tot Ω	virta 200A	virta 400A
		jännitehäviö /V	jännitehäviö /V
Elementti 1	2,65E-04	0,053	0,106
Elementti 2	2,62E-04	0,052	0,105
Elementti 3	2,45E-04	0,049	0,098
Elementti 4	2,63E-04	0,053	0,105
Elementti 5	2,66E-04	0,053	0,106

Laskennalliset kuparikiskoista johtuvat jännitehäviöt 200 A:n virran arvoilla ovat noin 50 mV elementtiä kohden. Jännitehäviö kasvaa kun nostettaessa virtaa, luonnollisesti tämä aiheuttaa myös kiskostojen lämpenemistä joka puolestaan kasvattaa resistanssia.

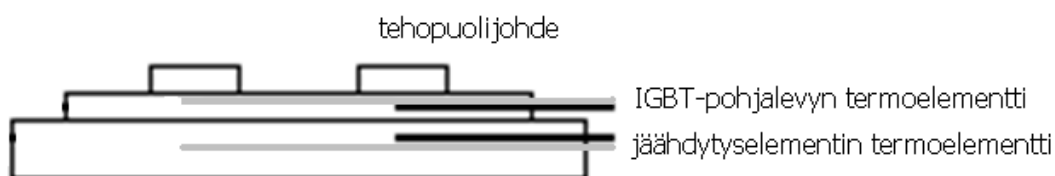
Todellisuudessa jännitehäviöt ovat paljon suuremmat johtuen kiskostojen ja IGBT-moduulien liitoksista. Pienetkin epäpuhtaudet lisäävät resistanssia, joka voi aiheuttaa millivolttien suuruisia jännitehäviöitä liitoksissa. Kiskostojen epäpuhtaudet pyrittiin minimoimaan putsamalla kaikki liitospinnat ensin vesihiomapaperilla sekä poistamalla rasva teollisuusliuottimella.

7 Lämpötilan mittaus

Lämpötilan mittaukseen valittiin J-tyyppin termojohdot. Johdin toimitettiin pitkässä rullassa, josta oikean pituiset johdot leikattiin ja päät juotettiin kiinni. Lämpötilanmittaus tapahtuu mittaamalla korkein ja matalin lämpötilan arvo hetkellä jolloin ohjaussignaali kytketään tai vapautetaan. Eräs vaihtoehto on lukea esimerkiksi 10 kytkennän sarjan lämpötila ja laskea tästä keskiarvo. Vaihtoehtojen puntarointi ja toteutus ei kuitenkaan kuulu tähän työhön, vaan se toteutetaan ohjelmisto-osuudessa. Lämpötilanmittauksen testauksessa on kuitenkin tarkoitus kytkeä ensimmäiset 50...100 kytkentää 1 sekunnin kytkentänopeudella, jolloin voidaan tarkastaa toimiiko lämpötilan mittaus halutulla tavalla. Tuloilman lämpötilaa ei kontrolloida, joten yksi lämpötilan

mittaus tälle riittää. Tämä lämpötila tulee olemaan huoneen lämpötila. Myös tämä lämpötila tulee tallentaa. Jos huoneen lämpötila nousee paljon yli normaalin, aiheuttaa se päästöjännitteen kasvamista. Tämä ei kuitenkaan ole ongelma käytettäessä vakio-teholähdettä, sillä teholähde kompensoi syötettävän tehon. Huoneilman lämpötilan nousu esimerkiksi 30 °C asteeseen ei häiritse mittausta.

Fyysisen kokonsa takia valittiin käytettäväksi J30-2-305-IEC -tyypin termojohdin, joita asennettiin lopulta laitteeseen 40 kpl. Mittaustarkkuudeltaan tarkemmat ja pienemmän saturaation omaavat termoelementit olisivat paremmat, mutta koska IGBT:n pohjalevy on vain 3 mm paksu ja poratut reiät 1,7 mm halkaisijaltaan asetti se kokonsa puolesta rajat myös termoelementeille. Seuraava kuva 36 havainnollistaa läpileikkausta IGBT-moduuliin kytketyistä termojohdimista sivultapäin katsottaessa:



Kuva 36. Termoelementtien sijoitus

Koska laitteessa osa IGBT-moduuleista on asennettu peilikuvana toisiinsa nähden, piti termoelementin oikea korkeus heatsinkin puolella varmistaa useaan kertaan mitaamalla. Vastaavasti osa termoelementtien paikoista IGBT-moduulissa asennettiin eri syvyydelle, tismalleen keskimmäisten tehopuolijohteiden alle. IGBT-moduulit myös numeroitiin selkeästi, jottei niitä ole mahdollista sekoittaa testien välissä.

8 Testaussekvenssi

Ohjelmisto-osuudessa toteutettava testaussekvenssi sisältää kaksi erityyppistä testiä. Testien tarkoituksena on simuloida erityyppisiä todellisuuden käyttöjä. Näiden testityyppien esittely päätettiin sisällyttää tämän työn dokumentaatioon, jotta kokonaiskuva työn tarkoituksesta selviää.

8.1 Korkean lämpötilanmuutoksen testi

Korkean lämpötilavaihtelun omaavia laitteita ovat esimerkiksi nosturit ja hissit. Kuorma nostetaan suurella teholla nopeasti, jolloin IGBT-moduulit ja tehopuolijohteet lämpenevät erittäin nopeasti. Tämän jälkeen kuorma on saatu nostettua ja laite pysäytetään. Lämpötilan nopeasta laskusta seuraa suuret lämpötilanvaihtelut lämmönsiirtorasvalle.

Testissä pyritään saamaan mahdollisimman suuri terminen rasitus lämpörasvalle. Ajetaan 4000 2 minuuttia kestävä kytKentää jäähdytyspuhaltimien ollessa päällä. Tällöin riittävän suuren lämpötilan vaihtelun (ΔT), joka voi olla esimerkiksi 100 °C saavuttamiseksi syklien välissä pitää olla nelinkertainen jäähtymisaika. Tästä laskemalla saadaan yhden syklin kokonaisajaksi 10 minuuttia, ja 4000 syklillä testin kokonaisajaksi tulee noin 27 vuorokautta, eli 1 kuukausi. Jos IGBT-moduuli hajoaa testin aikana, tulee lämpörasvan mahdolliset muutokset tutkia sekä vaihtaa uusi IGBT-moduuli ja jatkaa testiä.

Jotta voitaisiin olla varmoja tehosta, jolla IGBT-moduuli lämpenee, pitää laitteen käyttöönotossa tutkia testille sopivat tehorajat sekä syklien kesto. Muutoin tehopuolijohde saattaa kuumeta liikaa, jolloin se ei kestä termistä räsitusta ja tuhoutuu.

8.2 Matalan lämpötilanmuutoksen testi korkealla syklimäärällä

Toinen tutkittava sovellus hahmottelee pienen, mutta useasti tapahtuvan lämpötilanmuutoksen vaikutusta lämpörasvaan. Todellisuudessa kyseinen sovellus voi olla esimerkiksi suuri ruuvikompressori. Linjastosta otettava ilma aiheuttaa paineenaleneman ja ohjauslogiikka säätää taajuusmuuttajaa toimimaan erilaisella tehoalueella kuormituksen mukaan. Tämä aiheuttaa tehopuolijohteiden läpi menevän tehon voimakkaan vaihtelun. Puolijohteet kytkevät kokoajan lähtötasolla esimerkiksi 60 % ja lisätehon tarpeessa tehopuolijohteesta ajetaan 90 %:n teho.

Tässä testityypissä lämpötilan vaihtelu (ΔT) ei ole niin suuri kuin ensimmäisessä testimetodissa. Kuitenkin suuren määrän kytKentöjä on todettu vaikuttavan lämmönsiirtorasvan ominaisuuksiin. Tutkitaan esimerkiksi 70 °C asteen lämpötilanvaihtelua

ensimmäisen testaussekvenssin tavalla. Tällöin voidaan ajaa esimerkiksi 20000 sykliä laitteella. Tämä testi kestäisi 10 minuutin syklin pituudella noin 5 kk.

9 Johtopäätökset

Tässä insinööriyössä päätarkoituksena oli rakentaa mekaanisesti valmis testeri ilman ohjelmisto-osuutta testaamaan lämmönsiirtorasvojen elinkaarta kiihdytetysti. Työn alkaessa testerin vaatimukset tilaajan puolelta oli luetteloitu ranskalaisin viivoin. Työhön oli kuitenkin käytettävissä apuna erittäin kokenutta ja ammattitaitoista henkilökuntaa, ja kokoontumisia laitteen rakennuksen ohessa pidettiin viikoittain. Näin voitiin varmistua laitteen rakennuksen pysyvän oikealla linjalla. Kompromisseja fyysisten asennuksien suhteen jouduttiin tekemään, ja joitain asennuksia joudutaan ehkä jopa muuttamaan ohjelmisto-osuuden tai ensimmäisten testien tuloksien jälkeen, koska kyseessä on tutkimus ja pilottihanke.

Monia laitteeseen liittyviä parannuksia ja täydennyksiä keksittiin laitteen rakennuksen aikana, näistä osa jouduttiin kuitenkin rajaamaan toteutuksen ulkopuolelle johtuen aikataulusta. Koska testeri on ensimmäinen laatuaan, on siinä varmasti paljon parannettavaa, mutta arvokkain palaute laitteen toiminnasta saadaan vasta käytössä. Koska vastaavaa laitetta ei ole ollut käytössä aikaisemmin, on vain spekulatioita kuinka testeri toimii ja minkälaisia tuloksia on odotettavissa. Kuten itse työssä on todettu, testeri on pyritty rakentamaan tuotannosta jo löytyvistä komponenteista mahdollisimman pitkälle, jotta käyttökokemuksien tuoma jatkojalostus olisi helpompaa.


Tärkeintä testerin käytössä on käyttöönoton huolellinen toteutus. Tuolloin on tarkkailtava esimerkiksi 24 tunnin ajan testerin käyttäytymistä, kiskojen lämpenemistä sekä vertailtava termoelementtien antamia arvoja. Huolellinen käyttöönotto on tärkeää, koska laite tulee pyörimään kuukausia. Tuo aika menee hukkaan, jos laite toimii väärin. Käyttöönoton jälkeen laitetta on silti seurattava aktiivisesti, jotta mahdolliset toimintahäiriöt saadaan eliminoitua pois.

Kokonaisuudessaan insinööriyössä onnistuttiin saavuttamaan tilaajan tavoitteet, työ oli erittäin mielenkiintoinen tehdä ja tuloksena oli uudentyyppinen testausratkaisu tutkittaessa lämmönsiirtorasvojen elinkaarta.


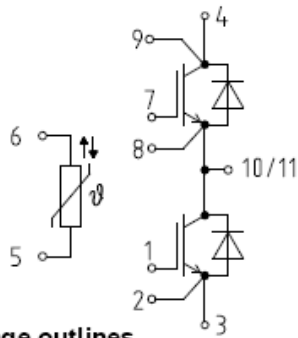
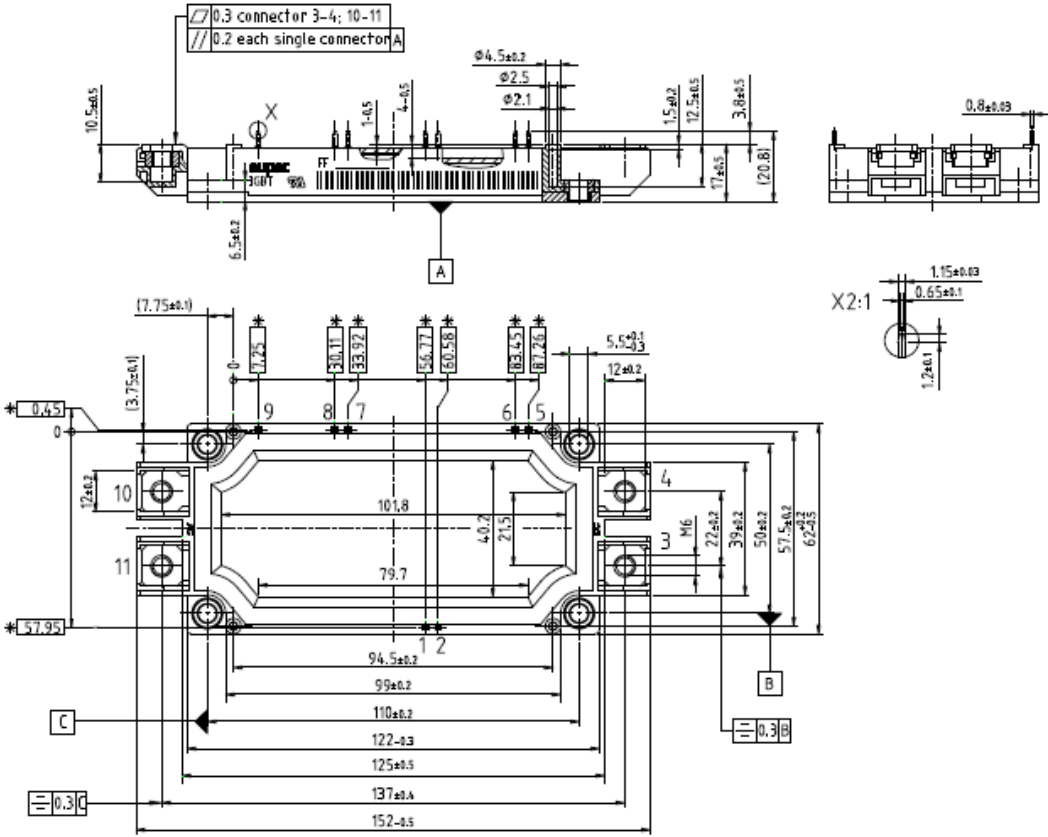
LÄHTEET

- [1] Varjonen, Ilmari. 2009. Ene-39.4044 Thermal Greases and Heat Conduction in Power Electronics.
- [2] Niiranen, Jouko. 1997. tehoelektroniikan komponentit, Yliopistokustannus/Otatieto, Helsinki.
- [3] Mauri, Lounila. 2007. IGBT, Julkaisematon materiaali, ABB Oy Drives, Helsinki.
- [4] Bodo's Power Systems. May 2010. Power Modules, -How to avoid errors when applying thermal paste. ISSN: 1863-5598 s. 36

IGBT FF450R12ME3-datalehti

Technische Information / technical information						
IGBT-Module IGBT-modules					FF450R12ME4	
Vorläufige Daten preliminary data						
Diode-Wechselrichter / diode-inverter						
Höchstzulässige Werte / maximum rated values						
Periodische Spitzenspannung repetitive peak reverse voltage	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	V_{RRM}	1200	V		
Dauergleichstrom DC forward current		I_F	450	A		
Periodischer Spitzenstrom repetitive peak forward current	$t_p = 1 \text{ ms}$	I_{FRM}	900	A		
Grenzlastintegral Pt - value	$V_R = 0 \text{ V}, t_p = 10 \text{ ms}, T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $V_R = 0 \text{ V}, t_p = 10 \text{ ms}, T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	I_{Pt}	35000 28500	A ² s A ² s		
Charakteristische Werte / characteristic values						
			min.	typ.	max.	
Durchlassspannung forward voltage	$I_F = 450 \text{ A}, V_{GE} = 0 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	V_F	1,85	2,10	V
	$I_F = 450 \text{ A}, V_{GE} = 0 \text{ V}$	$T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$		1,85		V
	$I_F = 450 \text{ A}, V_{GE} = 0 \text{ V}$	$T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$		1,85		V
Rückstromspitze peak reverse recovery current	$I_F = 450 \text{ A}, -di/dt = 7000 \text{ A}/\mu\text{s} (T_{vj}=150^{\circ}\text{C})$ $V_R = 600 \text{ V}$ $V_{GE} = -15 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	I_{RM}	450		A
		$T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$		550		A
		$T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$		575		A
Sperrverzögerungsladung recovered charge	$I_F = 450 \text{ A}, -di/dt = 7000 \text{ A}/\mu\text{s} (T_{vj}=150^{\circ}\text{C})$ $V_R = 600 \text{ V}$ $V_{GE} = -15 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	Q_r	48,0		μC
		$T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$		92,0		μC
		$T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$		105		μC
Abschaltenergie pro Puls reverse recovery energy	$I_F = 450 \text{ A}, -di/dt = 7000 \text{ A}/\mu\text{s} (T_{vj}=150^{\circ}\text{C})$ $V_R = 600 \text{ V}$ $V_{GE} = -15 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	E_{rrs}	26,5		mJ
		$T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$		48,5		mJ
		$T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$		55,0		mJ
Innerer Wärmewiderstand thermal resistance, junction to case	pro Diode / per diode	R_{thJC}			0,10	K/W
Übergangs-Wärmewiderstand thermal resistance, case to heatsink	pro Diode / per diode $\lambda_{Ponto} = 1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}) / \lambda_{Grunde} = 1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	R_{thCH}		0,045		K/W
NTC-Widerstand / NTC-thermistor						
Charakteristische Werte / characteristic values						
			min.	typ.	max.	
Nennwiderstand rated resistance	$T_C = 25^{\circ}\text{C}$	R_{25}		5,00		k Ω
Abweichung von R_{100} deviation of R_{100}	$T_C = 100^{\circ}\text{C}, R_{100} = 493 \Omega$	$\Delta R/R$	-5		5	%
Verlustleistung power dissipation	$T_C = 25^{\circ}\text{C}$	P_{25}			20,0	mW
B-Wert B-value	$R_2 = R_{25} \exp [B_{25}/50(1/T_2 - 1/(298,15 \text{ K}))]$	$B_{25}/50$		3375		K
B-Wert B-value	$R_2 = R_{25} \exp [B_{25}/50(1/T_2 - 1/(298,15 \text{ K}))]$	$B_{25}/50$		3411		K
B-Wert B-value	$R_2 = R_{25} \exp [B_{25}/100(1/T_2 - 1/(298,15 \text{ K}))]$	$B_{25}/100$		3433		K
Angaben gemäß gültiger Application Note. Specification according to the valid application note.						
prepared by: Marco Bäßler		date of publication: 2008-06-10				
approved by: Wilhelm Rusche		revision: 2.0				

IGBT-terminaalien kytkennät

<p>Technische Information / technical information</p> <p>IGBT-Module IGBT-modules</p> <p style="text-align: center; font-size: 1.2em;">FF450R12ME4</p>	
<p>Vorläufige Daten preliminary data</p>	
<p>Schaltplan / circuit diagram</p> 	
<p>Gehäuseabmessungen / package outlines</p>  <p style="text-align: center;">* = all dimensions with a tolerance of ± 0.5</p> <p style="text-align: center;">dimensions valid in mounted condition</p>	
<p>prepared by: Marco Bäßler</p> <p>approved by: Wilhelm Rusche</p>	<p>date of publication: 2008-06-10</p> <p>revision: 2.0</p>