



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Teemu Myllymäki

IGBT:N ELINIKÄ SYKLISESSÄ INVERTTERIKÄYTÖSSÄ

Tekniikka
2021

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Teemu Myllymäki
Opinnäytetyön nimi	IGBT:n elinikä syklisessä invertterikäytössä
Vuosi	2021
Kieli	suomi
Sivumäärä	52 + 2 liitettä
Ohjaaja	Marko Iskala

Tämän opinnäytetyön aiheena on tutkia IGBT-moduuleille elinikäkerrointa erilaisia elinikämalleja hyväksikäyttäen. Testauksista saatujen tulosten perusteella on tarkoitus kehittää IGBT-moduulin nopeutettua elinikäsykliä, jotta luotettavia tuloksia saataisiin mahdollisimman nopeasti ja löydettäisiin elinikäkiihdytyksessä oikeat vikamekanismit. Tässä opinnäytetyössä käydään läpi IGBT-moduulin vikamekanismeja ja testien järjestelyssä käytettyjä laitteita sekä muita järjestelyjä.

Testissä olevan ehjän moduulityypin liitoslangoille tehtiin vetokoe, jotta nähtiin kirjallisuudesta saatujen vikamekanismien paikkaansapitävyudet. Testauksien tuloksena moduulin odotettiin hajoavan nopeammin kuin normaalissa testiympäristössä johtuen laajemmasta lämpötila-alueesta. Lämpötilan keskiarvolla on oletettavasti enemmän vaikutusta laitteen vikaantumiseen kuin laajemmalla lämpötila-alueen vaihtelulla. Testauksien myötä opimme uutta tietoa liitoslankojen vedon vikamekanismeista ja vetokoneen käytöstä.

Elinikämalleista saatiin myös paljon tietoa ja ymmärrystä siihen, mihin vikamekanismiin mitäkin mallinnusta voidaan käyttää. Arrheniusta voidaan käyttää kemiallisiin reaktioihin ja Coffin-Manson-mallia mekaanisiin rasituksiin. Testituloksien elinikälaskennassa olisi käytetty Arrhenius- ja Coffin-Manson-yhtälöä sekä näiden yhteneviä mallinnuksia, jos laite olisi hajonnut oletetulla aikavälillä.

Avainsanat elinikätestaus, IGBT-moduuli, kestotestaus, vikamekanismit ja luotettavuus

ABSTRACT

Author	Teemu Myllymäki
Title	IGBT Lifetime in Cyclic Inverter Application
Year	2021
Language	Finnish
Pages	52 + 2 Appendices
Name of Supervisor	Marko Iskala

The purpose of this thesis is to determine the lifetime multiplier for IGBT modules using different lifespan models. The aim is also to develop an accelerated lifetime cycle of the IGBT module in order to achieve reliable results as quickly as possible and to find the correct fault mechanisms in lifetime acceleration. At the same time, the thesis goes through the fault mechanisms of the IGBT module and the equipment and other arrangements used in the arrangement of the tests.

The lifetime of test results in calculation were used specifically for the Arrhenius and Coffin-Manson equations. A traction test for the type of module in the test was carried out on the bond wires. An intact module type in the test was subjected to a pull bond wires in order to see the validity of the fault mechanisms obtained from the literature. As a result of the tests, the module was expected to degrade faster than in a normal test environment. Valuable information was received on the fault mechanisms of the pull of the bond wires and the use of the traction machine.

Lifetime models provided much more information and understanding for which failure mechanism can be used. The Arrhenius model can be used for chemical reactions and the Coffin-Manson model for mechanical defects. The Arrhenius and Coffin-Manson equations and the congruent modeling of these would have been used for life-time calculations of the test results if the device had broken down with an assumed time between.

Keywords life testing, IGBT-module, endurance testing, failure mechanism and reliability

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

TAULUKKO- JA GRAAFILUETTELO

KUVALUETTELO

LIITELUETTELO

LYHENTEET JA TERMIT

1	JOHDANTO.....	12
2	VACON OY.....	13
3	PÄÄPIIRIN PUOLIJOHTEET	15
	3.1 Diodi	15
	3.2 IGBT.....	16
4	TAAJUUSMUUTTAJA.....	18
	4.1 Yleistä.....	18
	4.2 Invertteriyksikkö (INU).....	19
	4.3 Regeneratiivinen-yksikkö (AFE)	20
	4.4 Ei regeneratiivinen-yksikkö (NFE)	22
5	ELINIÄNLASKENTAMALLIT	23
	5.1 Arrhenius-malli.....	23
	5.2 Coffin-Manson-malli	24
	5.3 Norris-Landzberg-malli	26
	5.4 Eyring-malli	27
	5.5 Engelmaier-malli	28
6	TESTIJÄRJESTELYT	29
	6.1 Olosuhdekaappi testissä	29
	6.2 Opinnäytetyön testin lämpötilanvaihtelut	31
	6.3 Kestotestauslaitteistot	32
	6.4 Testiajo laajemmassa lämpötila-alueessa	34
7	ANALYYSISSÄ KÄYTETTÄVÄT SOVELLUKSET	35

7.1 Akustinen mikroskopia (SAM).....	35
7.2 Liitoslankojen vetokoe	35
7.3 Poikkileikkeet	38
8 SYKLISET VIKAMEKANISMIT.....	41
8.1 Liitoslangat	41
8.2 Sirun juotosliitos	43
8.3 Pohjalevyn juotosliitos	45
9 ANALYYSI JA YHTEENVETO	49
LÄHTEET	51
LIITTEET	53

TAULUKKO- JA GRAAFILUETTELO

Taulukko 1. Laatukertoimien referenssiarvot n_Q eri komponenteille.¹⁰ 24

Graafi 1. Vetokoneella tehdyt liitoslankojen vetotestit.²⁴ 37

KUVALUETTELO

Kuva 1. Pohjalaataton-tehoduuli.....	15
Kuva 2. Pohjalaatallinen-tehoduuli.	15
Kuva 3. Diodin symboli.	16
Kuva 4. IGBT-symboli.	17
Kuva 5. Taajuusmuuttajan pääpiirikuva.	20
Kuva 6. Regeneratiivisella-yksiköllä varustetun taajuusmuuttajan pääpiirikuva.	21
Kuva 7. Ei regeneratiivisen-yksikön pääpiirikuva.....	22
Kuva 8. Testissä oleva laite olosuhdekaapissa.....	30
Kuva 9. Espec-olosuhdekaapin toiminta kuvattuna, joissa on kosteuden säätö mukana.....	31
Kuva 10. Perinteisen syklisen testin ajojakso ja jäähdytysjakso.....	32
Kuva 11. Kestotestialue.	33
Kuva 12. Testin syklisestä ajosta kuva, jossa näkyy testin ajojakso ja jäähdytysjakso.....	34
Kuva 13. Vetokone Zwick Roell Z2.5, jolla tehty testit liitoslangoille.	36
Kuva 14. Liitoslankojen vikamekanismit.	38
Kuva 15. Leica DMI5000M käänteismikroskooppi.	39
Kuva 16. Hartsiin valettu poikkileike.	40
Kuva 17. Liitoslankojen murtuminen.....	42
Kuva 18. Liitoslangan irtoaminen juotoksesta.....	42
Kuva 19. SAM-kuva sirujen ikääntymisestä.	43
Kuva 20. Poikkileikekuva ikääntyneestä moduulista.	44
Kuva 21. Poikkileikkeen referenssikuvaksi ehjällä sirun liitoksella. ³²	44
Kuva 22. Sirun liitoksen havainnekuva ehjällä liitoksella.	46
Kuva 23. Havainnekuva delaminaation alkuvaiheesta.	46
Kuva 24. Havainnekuva delaminaation loppuvaiheesta.....	47
Kuva 25. SAM-kuva pohjalevyn delaminaatiosta.	48

LIITELUETTELO

LIITE 1. Zwick-Roel vetokoneella saadut tulokset IGBT-moduulin vetotesteistä.

LIITE 2. Analyysi laitteen odotetusta hajoamisesta.

LYHENTEET JA TERMIT

INU = Inverter Unit, invertteriyksikkö

AFE = Active Front End, regeneratiivinen-yksikkö

NFE = Non-regenerative Front End, ei regeneratiivinen-yksikkö

IGBT = Insulated Gate Bipolar Transistor, puolijohde

AC = Alternating current, vaihtovirta

DC = Direct current, tasavirta

THD = Total Harmonic Distortion, harmoninen kokonaissärö

PWM = Pulse Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio

DBC = Direct Bond Copper

REL = Reliability Laboratory, luotettavuus laboratorio

MAL = Material Analysis Laboratory, materiaali analyysi laboratorio

DOE = Designs of Experiments

Endurance testing = Kestotestaus

SAM = Scanning Acoustic Microscopy, akustinen mikroskopia

HALT = Highly Accelerated Life Test, korkeasti kiihdytetty elinikätesti

DUT = Device Under Test, laite testissä

MOSFET = Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, puolijohde

I/O = Input Output, sisääntulo / ulostulo

Si-IGBT = Piistä valmistettu IGBT

UPS = Uninterruptible Power Supply, keskeytymätön virransyöttö

BJTS = Bipolar Junction Transistors, puolijohde

LCL = suodin, jossa on kela, kondensaattori ja kela

λ = vikatiheys

π_T = Tekijöiden suhde lämpötiloissa T_2 & T_1

AF = Kiihtyvyyserroin

e = Neperin luku on matemaattinen vakio, jonka likiarvo on 2,718

k = Boltzmannin vakio $8.62 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$

E_a = aktivointienergia

T_2 = Testiympäristön lämpötila

T_1 = Kentällä oleva lämpötila

n_Q = Laatukertoimien referenssiarvot

β_T = Lämpötilan muutoksesta aiheutuva vikamekanismin kerroin

β_M = Värähtelystä aiheutuvan vikamekanismin kerroin

N_1 = Syklimäärä kentällä

N_2 = Syklimäärä testiympäristössä

G_1 = Värähtelyaika kentällä

G_2 = Värähtelyaika testiympäristössä

ΔT_1 = Kentällä oleva lämpötila-alue

ΔT_2 = Testiympäristön lämpötila-alue

Δy = Kannan vaihteluväli

$T_{\max.\text{test}}$ = testiympäristön maksimi lämpötila

$T_{\max.\text{field}}$ = kentältä saatu maksimi lämpötila

C = geometriasta riippuva vakio

L_D = juotospisteiden diagonaalinen etäisyys levyn neutraalista pisteestä olettaen, että levyn muoto on suorakulmainen

h_s = juotosliitoksen korkeus

$\Delta\alpha$ = lämpölaajenemisen ero sirun ja komponentin välillä ja substraatin ja piirilevyn välillä

SAC305 = lyijytöntä seosta, joka sisältää 96,5 prosenttia tinaa, 3% hopeaa ja 0,5% kuparia.

N = Newton (tunnus: N) on Kansainvälisen yksikköjärjestelmän (SI) johdettu voimayksikkö. ($1 \text{ N} = 0.10197 \text{ kg} \times 9.80665 \text{ m/s}^2$)

Substraatti = elektroniikassa kasvatusalusta, esimerkiksi puolijohdekomponentin pohjamateriaali

Delaminaatio = vikamekanismi, jossa materiaali murtuu kerroksiksi eli irtautuu toisistaan

1 JOHDANTO

Danfoss Drivesin Vaasan tehtaassa REL-Laboratoriossa (Reliability laboratory) tehdään paljon luotettavuustestejä taajuusmuuttajille, jotta saadaan kestävä ja laadukkaat tuotteet asiakkaille. REL-Laboratoriossa taajuusmuuttajien kesto-testaukset on jaettu kahteen eri prosessiin. Testausta tehdään markkinoilla oleville tuotteille sekä uusille tuotteille ja vaikka ne ovat erilaisia prosesseja, niillä on yhteiset toimintatavat.

Tämän opinnäytetyön toimeksianto oli laajentaa elinikämallien takana olevia menetelmiä ja metodeja, jotta yrityksen tarvitsemat elinikä-laskennat toimisivat paremmin. Vuosien varrella kerätyt kokemukset ovat osoittaneet, että kehitetyt toimintatavat ovat parantaneet merkittävästi tuotteen kestävyttä, mutta jossain vaiheessa testausmenetelmien kehittämiseen käytettävää aikaa vähennettiin, koska varsinaisesta testauksesta tuli ensisijainen tavoite. Työssä ei ole tarkoitus hylätä yrityksen omia vanhoja laskentatapoja vaan lisätä tietoisuutta erilaisista laskentavaihtoehdoista.

Opinnäytetyön tarkoituksena on kehittää IGBT-moduulien kiihdytettyä elinikätestiä syklisessä invertterikäytössä. Työssä halutaan saada tiedossa oleva vikamekanismi toimimaan, jotta voidaan laskea tiedossa olevalle vikamekanismille elinikäkerroin tarkasti. Näin yritys saisi parannettua laatua ja voisi pureutua vian korjaukseen mahdollisimman nopeasti, jotta kentällä ei tulisi turhia laitteiden hajoamisia. Työssä käytetään tiettyä IGBT-moduulityyppiä ja samaa tuotantoerää, ettei niissä ei olisi mitään eriävyyksiä. Tarkoituksena on lisäksi tutkia erilaisia elinikämallinnuksia ja etsiä eriävyyksiä niiden osalta. Työssä halutaan kehittää elinikäkerrointa, jotta voidaan laskea testien laitteiden elinikiä etukäteen ja joissain tapauksissa myös asiakkaiden laitteiden elinikiä heidän käyttöönsä nähden.

2 VACON OY

Vacon Oyj on Vaasassa vuonna 1993 perustettu taajuusmuuttajatekniikkaa kehittävä ja valmistava yritys. Vacon Oyj:n aiemmalta nimeltä Vaasa Controlin perusti kolmetoista avainhenkilöä, jotka olivat lähtöisin ABB Drives -yksiköstä. Vuonna 1995 lanseerattiin CX-tuoteperheen taajuusmuuttajat ja samana vuonna avattiin tehdas Vaasan Runsoriin.¹

Vuonna 2000 Vaconilla lanseerattiin NX-tuoteperheen taajuusmuuttajat ja samana vuonna yritys listautui Helsingin pörssiin, jonka seurauksena nimi muutettiin Vacon Oyj:ksi.¹

Vaconin vuosi 2010 oli mielenkiintoinen, koska yritys osti pienen espanjalaisen aurinkoinverttereiden suunnitteluun ja valmistukseen erikoistuneen yrityksen. Samana vuonna Vaconilla tehtiin VACON SOLAR 8000 -invertterit ja multimaster-ohjelmisto.¹

Vacon lanseerasi kolme uutta taajuusmuuttajatyyppeä SPS/IPC/DRIVES 2011 – messuilla Saksan Nürnbergissä vuonna 2011. Uusi VACON 10–malli sekä VACON 20 ja VACON 20 Cold Plate oli suunniteltu erityisesti kone- ja laitevalmistajille.¹⁻²

Vacon esitteli kolme uutta tuotetta VACON Drives Conference 2012 - tapahtumassa, uusimman yleiskäyttöisen taajuusmuuttajien edelläkävijän VACON 100 tuoteperheen ja kaksi hajautettuihin käyttöihin kuuluvaa IP66/UL Type 4X – taajuusmuuttajaa.¹⁻²

Vuonna 2014 perheyritys Danfoss osti Vacon Oyj:n ja tämän johdosta kaikki Vaconin tuotteet siirtyivät osaksi Danfoss Drivesin tuotevalikoimaa. Vacon

¹ Aflecht, S. Vacon Oyj:n historia 2014 Vaasan Ammattikorkeakoulu

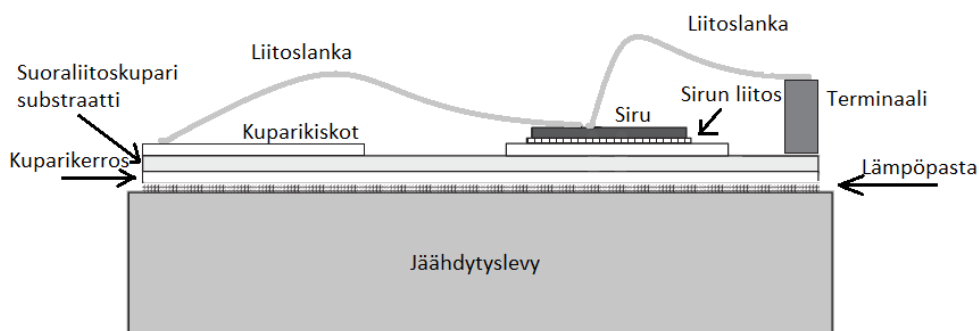
² Vacon Oyj tietoja lyhyesti Wikipedia

kuuluu nyt Danfoss Drivesille ja on yksi osa Danfossin segmenteistä, joihin kuuluu muun muassa Drives, Heating, Cooling, Silicon power ja Power solutions.³

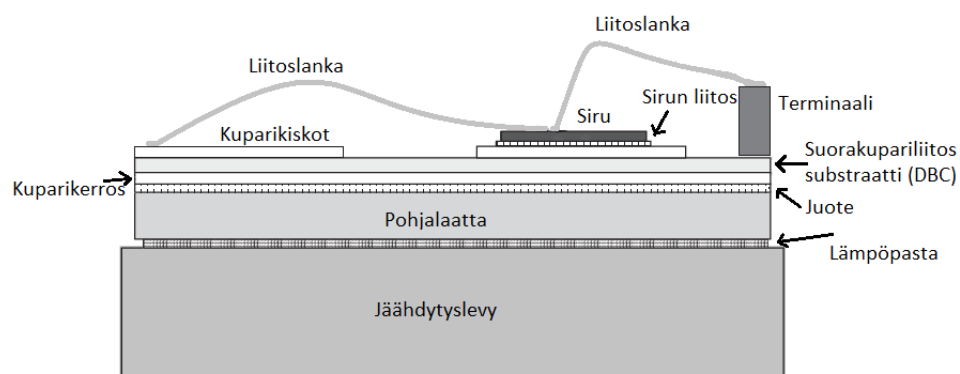
³ Hurmerinta, M. Tanskalainen perheyritys Danfoss ostaa Vacon Oyj:n. Tekniikkatalous

3 PÄÄPIIRIN PUOLIJOHTEET

Tehomoduuleja käytetään pääsääntöisesti taajuusmuuttajassa sähköelektronisten muuntimien toiminnallisina komponentteina ja ne sisältävät tyypillisesti useita puolijohdekomponentteja, kuten MOSFET- ja IGBT-transistoreita sekä diodeja. Tehomoduuleilla on erittäin tärkeä tehtävä puolijohdekomponenttien ja piirisovelluksen välisenä liitântänä. Yleisimpiä taajuusmuuttajassa käytettyjä tehomodulityyppejä ovat pohjalaatattomat-moduulit (**Kuva 1.**) ja pohjalaatalliset-moduulit (**Kuva 2.**).



Kuva 1. Pohjalaataton-tehoduuli.

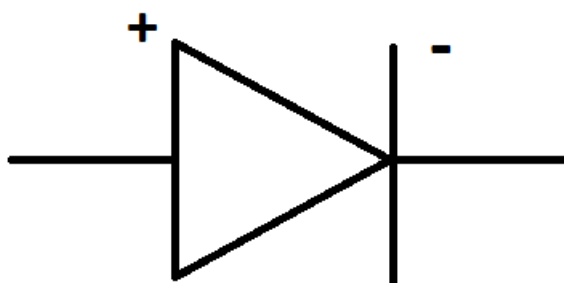


Kuva 2. Pohjalaatallinen-tehoduuli.

3.1 Diodi

Diodi on kaksiterminaalinen elektroninen komponentti (**Kuva 3.**), joka johtaa virtaa pääasiassa yhteen suuntaan. Sillä on alhainen vastus yhteen suuntaan ja

korkea vastus toiseen suuntaan. Diodimuriputki tai termionidiodi on tyhjiöputki, jossa on kaksi elektroodia, katodi ja levy, jossa elektronit voivat virrata vain yhteen suuntaan eli katodista levyllä. Puolijohdediodi oli ensimmäinen puolijohde-elektroninen laite. Nykyään puolijohdediodin yleisimmin käytetty tyyppi on kiteinen puolijohdemateriaalin kappale, jonka p-n-liitos on kytketty kahteen sähköliittimeen. Kiteisen mineraalin ja metallin välisestä kosketuksesta syntyvän epäsymmetrisen sähkönjohtumisen löysi saksalainen fyysikko Ferdinand Braun vuonna 1874.⁴



Kuva 3. Diodin symboli.

Diodin p-vyöhykkeen kytkettyä elektroodia kutsutaan anodiksi ja n-vyöhykkeen kytkettyä elektroodia katodiksi. Piitä (Si) käytetään yleensä puolijohdemateriaalina ja muita materiaaleja ovat esim. germaniumi (Ge), galliumarsenidi (GaAs), galliumfosfidi (GaP) sekä viimeisten vuosien aikana piikarbidi (SiC). Kuitenkin vain Pii (Si) ja Piikarbidi (SiC) ovat merkityksellisiä tehoelektronikan materiaaleina.⁵

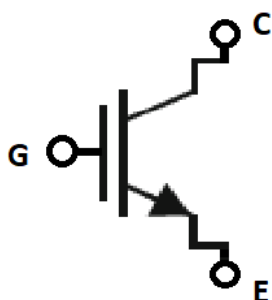
3.2 IGBT

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) kehitettiin Si-tekniikalla ja siitä syntyi erinomainen vaihtoehto kaksisuuntaisille tehotransistoreille 1980-luvulla. IGBT

⁴ Semiconductor Point-Contact Rectifier Effect is Discovered

⁵ Pulfrey, D. L Understanding Modern Transistors and Diodes

edustaa MOSFET-transistorin ja bipolaarisen transistorin integrointia siinä mielessä, että yhdistetään MOSFET-toiminnan fysiikka ja bipolaarinen transistori. IGBT:ssä teho-MOSFET-rakennetta käytetään tuottamaan perusvirta luontaiselle p-n-p-bipolaariselle tehotransistorille bipolaarisella transistorilla, jota käytetään moduloimaan virtausalueen johtavuutta MOSFET-rakenteelle, jolloin saavutetaan alhainen jännitehäviö. Viime vuosina Si-IGBT:tä on sovellettu useimpiin sähköisiin sovelluksiin kuten, esimerkiksi tuuli- ja aurinkoenergian sovelluksiin. Erityisesti Si-IGBT:tä on sovellettu keskikokoisiin ja suuriin laitteisiin, esimerkiksi taajuusmuuttajiin ja UPS-laitteisiin sekä muihin suuriteholaitteisiin. Viimeisen 25-vuoden aikana IGBT:llä on ollut johtava rooli tehoelektronikan laitteiden ohjaamisessa, jota se pitää edelleen parantamalla IGBT-siru ja moduulitekniikkaa. IGBT-rakenteella on nykyään erinomainen kyllästymiskyky, jota tyristorilla ei ole ja siksi sitä pidetään nykyään olennaisena ominaisuutena monille tehoelektronikan käytännön sovelluksille.⁶



Kuva 4. IGBT-symboli.

IGBT-transistori on kolmipääteline puolijohdelaite (**Kuva 4.**), jonka päätelaitteet on nimetty hilaksi (G), emitteriksi (E) ja kollektoriksi (C).

⁶ Hornkamp, A. V. M. IGBT Modules Technologies, Driver and Application

4 TAAJUUSMUUTTAJA

4.1 Yleistä

Taajuusmuuttaja viittaa yleensä täydelliseen kuusi tai kaksitoista pulssitaajuusmuuttajaan. Vaconin taajuusmuuttajakäyttöihin sisältyy pienikokoiset seinälle asennettavat taajuusmuuttajat, kaappikäytöt ja IP00-taajuusmuuttajat, jotka vaativat kaappiin asennuksen.⁷

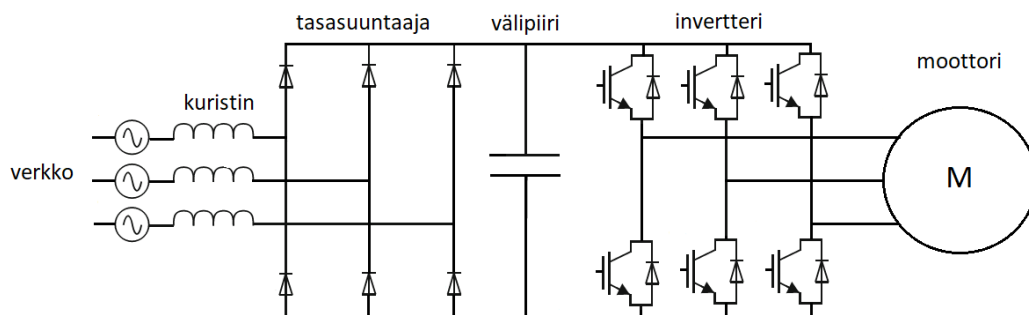
Taajuusmuuttaja koostuu mekaanisesti tehoyksiköstä, ohjausyksiköstä ja mahdollisesti yhdestä tai useammasta kuristimesta. AC- ja DC-kuristimet suorittavat useita toimintoja taajuusmuuttajissa. AC-tulokuristin tarvitaan olennaisena komponenttina moottorin ohjauksessa suojaamaan tulopiirin ja DC-välipiirin komponentteja äkillisiltä virran ja jännitteen muutoksilta sekä toimimaan suojana yliaaltoja vastaan. DC-kuristin kattaa samat toiminnot kuin AC-kuristin lukuun ottamatta tulopiirin ja DC-välipiirin komponenttien suojausta. Tehoyksikkö sisältää diodit tulojännitteen tasasuuntausta varten ja välipiirin kondensaattorit sekä IGBT-invertterin, joka tuottaa symmetrisen 3-vaiheisen PWM-moduloidun vaihtojännitteen moottorille. Ohjausyksikkö sisältää mikroprosessorin, jossa on laiteohjelmisto ja sovellusohjelmisto. Mikroprosessori ohjaa moottoria perustuen mittauksiin, parametriasetuksiin, ohjauksen I/O:hon tai kenttäväylään ja ohjauspaneeliin saamaansa informaatioon. Ohjauspaneeli on yhteys käyttäjän ja taajuusmuuttajan välillä ja sitä käytetään enimmäkseen parametrien asettamiseen, tilatietojen lukemiseen sekä ohjauskomentojen antamiseen. Ohjauspaneeli on irrotettava ja sitä voidaan käyttää myös ulkoisesti erillisen adapterin avulla. Ohjauspaneelin sijaan taajuusmuuttajaa voidaan ohjata myös tietokoneella.

⁷ VACON-Engineered-Drives-Manual

Taajuusmuuttaja voidaan sijoittaa mihin tahansa syötön ja moottorin väliin, joko sähköhuoneeseen tai jopa lähelle prosessia. Taajuusmuuttajakäyttöjä voidaan käyttää moniin tarkoituksiin, esimerkiksi pumppuihin ja puhaltimiin. Taajuusmuuttajalla on aina kiinteät määritykset, kuten teho, lähtövirta ja kehyksen koko. Taajuusmuuttajista on tehty vakiotuotteita, joita voidaan muokata vakiovarusteilla ja lisäkortilla. Yksi taajuusmuuttaja on hyvä ratkaisu prosessiin, jossa ei tarvita joustavuutta ja prosessikohtaista räätälöintiä, jota esimerkiksi yhteinen DC-väylä tai yhteinen AC-väyläjärjestelmä tarjoaa.

4.2 Invertteriyksikkö (INU)

Invertteriyksikköä eli INUa (inverter unit) käytetään DC-välipiiristä saatavan tasajännitteen vaihtosuuntaukseen moottorille tai moottorin toimiessa generaattorina ja siitä saatavan vaihtojännitteen tasasuuntaukseen DC-välipiirille. Invertteriyksikkö sisältää vain DC-liittimet ja itse invertterin. Yleensä taajuusmuuttajaan, jossa on invertteri laitetaan myös kuristin tai LCL-suodin suojaukseksi yliaaltoja ja virtapiikkejä vastaan. Invertteriyksiköllä ei voida jarruttaa energiaa verkkoon päin, koska siinä ei ole soveltuvaa verkkovaihtosuuntaajaa kuten regeneratiivisessa-yksikössä. Jos invertteriyksiköllä halutaan jarruttaa, on sitä varten oltava jarrukatkoja ja jarruvastus, koska ilman niitä invertteriyksikkö ei pysty kuluttamaan moottorin jarrutuksesta saatavaa energiaa ja laite vikaantuu ylijännitteeseen.

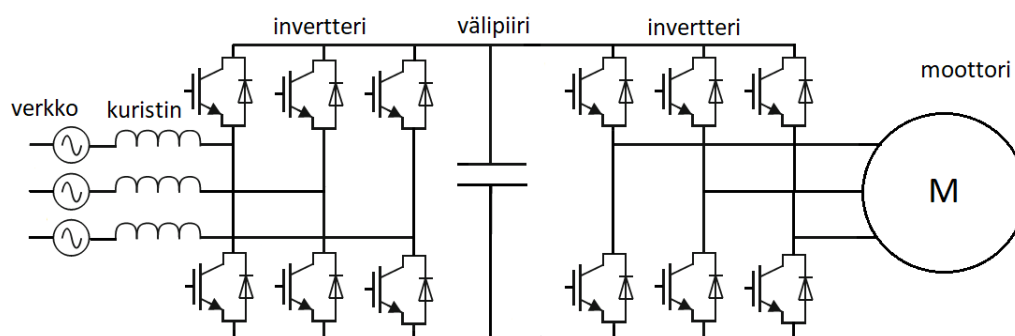


Kuva 5. Taajuusmuuttajan pääpiirikuva.

4.3 Regeneratiivinen-yksikkö (AFE)

Regeneratiivista-yksikköä eli AFEa (Active front End) käytetään tehon siirtämiseen AC-syötön ja DC-välipiirin välillä. Regeneratiivisessa-yksikössä tehoa siirrettäessä AC-syötöstä tasasuunnataan jännite DC-välipiiriin. DC-välipiiristä siirrettäessä tehoa AC-syöttöön, yksikkö vaihtosuuntaa DC-jännitteen, esim. PWM moduloinnilla. Kuormalle syötetty PWM-jännite vääristää virran, joka menee läpi verkkoon samoin sekä regeneratiivisessa-yksikössä, että taajuusmuuttajassa. Regeneratiivinen-yksikkö aiheuttaa myös jännitteen harmonisia aaltoja (THD), joita taajuusmuuttaja ei tee, mutta taajuusmuuttaja taas aiheuttaa verkkoon yliaaltoja. Jännitteen harmonisia aaltoja (THD) korjataan LCL-suotimilla.

Regeneratiivisella-yksiköllä varustettu taajuusmuuttaja koostuu tehoyksiköstä, LCL-suotimesta, esilatauspiiristä, ohjausyksiköstä, AC-sulakkeista, pääkontaktorista (tai katkaisijasta) ja DC-sulakkeista.



Kuva 6. Regeneratiivisella-yksiköllä varustetun taajuusmuuttajan pääpiirikuva.

Vaikka jotkut käyttäjät suosivat AFE:n tehokkuutta harmonisen vääristymän vähentämisessä, toiset asettavat etusijalle niiden kyvyn syöttää energiaa takaisin verkkoon hyötyjarrutuksen avulla. Moottorijarrutuksen aikana kuorma ajaa moottoria nopeammin, jonka seurauksena moottorista tulee käytännöllinen energiageneraattori. Perinteisesti käyttäjät ovat asentaneet ja ylläpitäneet suuria vastuksia jarrutusenergian vuoksi. Jarruvastukset itse voivat olla ei toivotun lämmön lähde ja vaativat usein huoltoa ja puhdistusta, mutta yksiköt, joissa on sisäänrakennettu regeneratiivinen-yksikkö voivat syöttää verkkoon energiaa, joka muuten menetetään lämmöksi. Tämä vähentää tarvetta jarrutusvastuksille, jäähdytyslaitteille, johdotuksille sekä asennuksille ja ylläpitokustannuksille.

Muuntamalla moottorin tuottamaa mekaanista energiaa regeneratiiviset-yksiköt voivat palauttaa ylimääräisen sähköenergian verkkoon tai energiavarastoon kuten akkuun. Käyttäjät voivat palauttaa talteen otetun energian vaihtovirtamoottoriin tai apuohjelmaan ja käyttää sitä uudelleen esimerkiksi sähköpumppeihin tai jäähdytyspuhaltimiin.

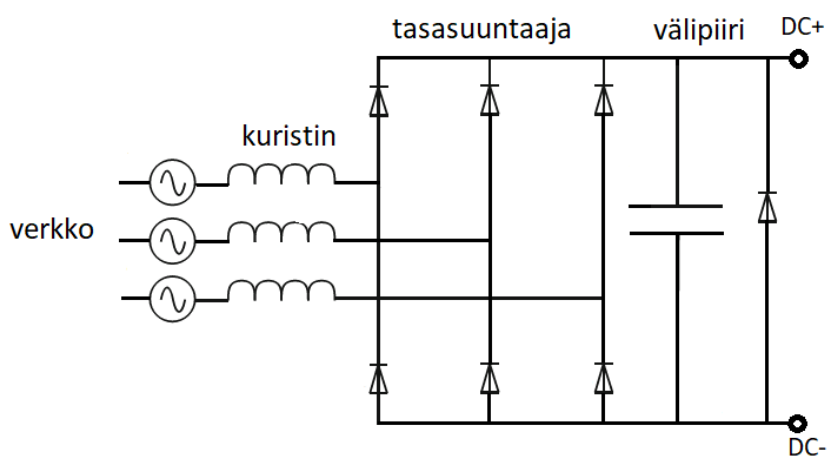
AFE-teknologia voi tarjota sekä moottoritehon, että regeneratiivisen-tehon. Regeneratiiviset-yksiköt ovat hyödyllisiä sovelluksissa, jotka vaativat suuria inertiakuormia. Inertiakuormia ovat mm. nosturi- ja nostolaitteet, jotka vaativat usein jarrutusta kuormauksen aikana sekä, esimerkiksi kokoonpanoissa käytettävät liukuhinakäytöt. Moottorijarrutusenergian talteenottoa hyödyntämällä regeneratiiviset-käyttölaitteet auttavat tuottajia vähentämään

energiankulutusta ja ovat huomattavasti energiatehokkaampia kuin resistiivinen jarrutus.⁸

4.4 Ei regeneratiivinen-yksikkö (NFE)

Ei regeneratiivista-yksikköä eli NFE (Non-regenerative front end) käytetään tehon siirtämiseen AC-syötön ja DC-välipiirin välillä. Regeneroimattomalla yksiköllä **(Kuva 7.)** on vain yksisuuntainen toiminto, mikä tarkoittaa, että teho voidaan siirtää vain AC-syötöstä DC-välipiiriin. Laitteen jarruttaessa on välipiirissä oltava jarrukatkoja ja jarruvastus.⁸

Ei regeneratiiviset kokoonpanot koostuvat tehoyksiköstä, johon sisältyy tasasuuntaussillat, välipiirin kondensaattorit, AC-kuristin, AC-sulakkeet, pääkontaktori ja DC-sulakkeet.⁹



Kuva 7. Ei regeneratiivisen-yksikön pääpiirikuva.

⁸ VACON-NX-AFE-Service-Manual julkaisematon materiaali

⁹ VACON-NXN-NFE-Service-Manual julkaisematon materiaali

5 ELINIÄNLASKENTAMALLIT

5.1 Arrhenius-malli

1800-luvun lopulla oli yleinen tieto siitä, että lämpö kiihdyttää kemiallisia reaktioita ja vuonna 1899 ruotsalainen kemisti Svante Arrhenius kehitti mallin, joka yhdistäisi kaksi käsitettä aktivointienergian ja Boltzmannin vakion¹⁰. Aktivointienergia on vähimmäisenergia, jota tarvitaan tietyn kemiallisen reaktion käynnistämiseen. On huomattu, että vain rajallinen määrä molekyylejä pystyy toimimaan sen jälkeen, kun riittävä aktivaatioenergia on saavutettu.

Monissa elektronisissa komponenteissa λ (vikatiheys) kasvaa eksponentiaalisesti lämpötilan myötä kaksinkertaistaen 10–20 °C:n nousun ajan. Lämpötilan kertoimelle π_T käytetään usein Arrhenius-mallia, jolloin saadaan kerroin π_T tekijöiden suhteelle lämpötiloissa T_2 ja T_1 (yhden vikamekanismin tapauksessa).¹⁰

Arrheniuksen yhtälön voi tulkita seuraavasti:

$$\frac{\pi_{T_2}}{\pi_{T_1}} = AF \approx e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}, \quad (1)$$

jossa AF tarkoittaa kiihtyvyyserrointa, k on Boltzmannin vakio $8.62 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$, T_1 kentällä oleva lämpötila Kelvin-asteina (puolijohteidenliitos), T_2 testiympäristössä oleva lämpötila, E_a on aktivointienergia ja e on neperin luku. Kirjallisuudessa E_a esitetään usein välillä 0,2 ja 0,75 eV piistä valmistetuilla komponenteilla. E_a kertoimella on suuri tekijä yhtälössä, jos E_a on arvioitu väärin, koko tulos menee epäluotettavaksi.¹⁰

¹⁰ Birolini, A. Reliability Engineering Theory and Practice 8th Edition

Taulukko 1. Laatueroimien referenssiarvot n_Q eri komponenteille.¹⁰

	Qualification		
	Reinforced	CECC *	no special
Monolithic ICs	0.7	1.0	1.3
Hybrid ICs	0.2	1.0	1.5
Discrete Semiconductors	0.2	1.0	2.0
Resistors	0.1	1.0	2.0
Capacitors	0.1	1.0	2.0

* reference value in [2.22, 2.24], class II in [2.29] (corresponds to *MIL-HDBK-217F* classes B, JANTX, M)

Jokaisella vikaantumismekanismilla on oma aktivointienergiensa, eikä Arrheniuksen-malli toimi kaikissa elektronisissa laitteissa eikä kaikissa lämpötila-alueissa (esim. rajoittuu noin 0–150 °C:seen).¹¹

Arrhenius-mallia voidaan aina käyttää vikamekanismeissa, jotka riippuvat kemiallisista reaktioista, kuten diffuusioprosessit tai siirtymisprosessit. Arrheniuksen-mallia ei voida käyttää mekaanisissa rasitusmalleissa eikä materiaalisissa väsymishäiriömalleissa, jotka eivät yleensä johdu kemiallisista reaktioista.

5.2 Coffin-Manson-malli

Coffin-Manson on malli, joka kuvaa matalan syklin väsymystä materiaalin rasituksen suhteen. Mallin on julkaissut itsenäisesti S. S Manson Vuonna 1953 ja L. F. Coffin 1954.¹²

¹¹ Birolini, A. Reliability Engineering Theory and Practice 8th Edition

¹² The History of fatigue testing

Mekaaniseen väsymykseen liittyvien vikaantumismekanismien osalta voidaan usein käyttää yksinkertaistettuja malleja käänteisen tehon perusteella, joilla saadaan vian syklimäärä. Coffin-Manson värähtelytesteihin kertoimet $0.5 < \beta_M < 0.8$ käytännön sovelluksissa.¹¹

Coffin-Manson värähtelyn stressimallia voidaan tulkita seuraavasti:

$$AF = \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{G_2}{G_1}\right)^{\beta_M}, \quad (2)$$

jossa AF on kiihtyvyyserroin, N_1 on kentällä saatu syklimäärä, N_2 testiympäristössä saatu syklimäärä, G_2 testiympäristön värähtelyaika, G_1 kentällä oleva värähtelyaika ja β_M värähtelystä aiheutuvan vikamekanismin kerroin.

Coffin-Manson lämpötilan stressimalli voidaan esittää:

$$AF = \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)^{\beta_T}, \quad (3)$$

jossa AF on kiihtyvyyserroin, N_1 on kentällä saatu syklimäärä, N_2 testiympäristössä saatu syklimäärä, ΔT_2 viittaa testiympäristön lämpötila-alueeseen ja ΔT_1 kentällä olevaan ympäristön lämpötila-alueeseen ja β_T lämpötilan muutoksesta aiheutuva vikamekanismin kerroin.

Lämpösyklitesteihin kertoimet $0.7 < \beta_T < 0.9$ käytännön sovelluksissa¹¹. Coffin-Manson-mallia käyttämällä voidaan laskea lämpötilatesteihin elinikäkerroin¹³. Kirjallisuudesta saaduilla kertoimilla voidaan laskea ennen testiä esim. testiaika ennen hajoamista (lähiarvo), mutta kertoimet pitää soveltaa itse testin jälkeen omilla arvoilla paremmiksi.

¹³ Birolini, A. Reliability Engineering Theory and Practice 8th Edition

5.3 Norris-Landzberg-malli

Norris-Landzberg-mallin kehittivät K. C. Norris ja A. H. Landzberg vuonna 1969.¹⁴ Norris ja Landzberg ehdottivat, että plastinen muodonmuutos on verrannollinen syklisen kuormituksen lämpöalueeseen (ΔT). Lisäksi kaavassa on muokattu yhtälö lämpösyklin taajuuden (f) ja maksimilämpötilan (T) vaikutusten huomioon ottamiseksi.¹⁵

Norris-Landzberg mallia voidaan esittää:

$$AF = \frac{N_{field}}{N_{test}} = \left(\frac{f_{field}}{f_{test}} \right)^m \left(\frac{\Delta T_{field}}{\Delta T_{test}} \right)^{-n} \left(e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{max,field}} - \frac{1}{T_{max,test}} \right)} \right), \quad (4)$$

jossa "field" ja "test" tarkoittavat kenttä- ja testiolosuhteita. AF on kiihtyvyyserroin, E_a on aktivointienergia, k on Boltzmannin vakio, E_a/k tälle yhtälölle on 1414, N_{field} on kentältä saatu syklimäärä, N_{test} on testiympäristön syklimäärä, f_{field} on kentällä oleva syklimäärä päivässä, f_{test} on testiympäristön syklimäärä päivässä, m on vikamekanismin kerroin, n on vikamekanismin kerroin (esim. m ja n voivat olla juotosmateriaalien kertoimet), $T_{max,field}$ on kentältä saatu maksimi lämpötila ja $T_{max,test}$ on testiympäristön maksimi lämpötila.¹⁴

Vaikka Norris-Landzbergin yhtälö on erittäin käytännöllinen, sillä on useita keskeisiä rajoituksia. Kriittisintä on kyvyttömyys tehdä väsymysennustetta ilman testitietoja, mikä poistaa Norris-Landzbergin käytön kaikista suunnittelutoiminnoista. Yhtälö perustuu myös oletukseen, että ryömintä käyttäytymistä ohjaa yksinomaan lämpötila ja aika, jossa on kriittinen sovellettu stressielementti. Moduuliarkkitehtuurista riippuen eri lämpösykleissä

¹⁴ Norris, K. C. and A. H. Landzberg. Reliability of Controlled Collapse Interconnections (IBM)

¹⁵ Blattau, N & Hillman, C. An Engelmaier Model for Leadless Ceramic Chip Devices with PB-Free Solder at DfR Solutions

tapahtuvalla käytetyn rasituksen muutoksella voisi olla merkittävämpi vaikutus, mikäli rasituksen muutoksella tunnistetaan taajuuden ja lämpötilan avulla mahdollisesti muuttuvat nopeusvakiot juotosliitoskokoontalon ja moduuliarkkitehtuurin mukaan. Yhtälö riippuu myös siitä, että plastinen muodonmuutos ajetaan samalla mekanismilla molemmissa ympäristöissä. Kuten muodonmuutokset osoittavat, erilaiset atomitason mekanismit voivat aiheuttaa plastisuutta ja ryömintä käyttäytymistä riippuen lämpötilan ja käytetyn rasituksen erityisestä yhdistelmästä. Tämän lähestymistavan rajoittamisista on selvinnyt kyvyttömyys kehittää Norris-Landzbergin vastinetta lyijyvapaille juotoille (SAC305).¹⁶

5.4 Eyring-malli

Henry Eyringin vuonna 1935 kehittämä Eyringin yhtälö perustuu siirtymätilateoriaan ja sitä käytetään kuvaamaan reaktionopeuden ja lämpötilan välistä suhdetta. Se on samanlainen kuin Arrheniuksen yhtälö, joka kuvaa myös reaktionopeuksien lämpötilariippuvuutta. Vaikka Arrheniuksen yhtälöä voidaan soveltaa vain kaasufaasikinetiikkaan, Eyringin yhtälö on hyödyllinen tutkittaessa kaasu-, kondensoituneita ja sekoitusfaasisia reaktioita, joilla ei ole merkitystä törmäysmallin kannalta.¹⁷

Eyring mallia voidaan tulkita:

$$AF = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^m e^{\frac{B}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)}, \quad (5)$$

jossa AF on kiihtyvyyserroin, T_2 viittaa testiympäristön lämpötilaan ja T_1 kentällä olevan ympäristön lämpötilaan, B voi olla aktivointienergia tai sitten toisista

¹⁶ Blatta, N & Hillman, C. An Engelmaier Model for Leadless Ceramic Chip Devices with PB-Free Solder at DfR Solutions

¹⁷ Birolini, A. Reliability Engineering Theory and Practice 8th Edition

stressitekijöistä aiheutuva tekijä, k on Boltzmannin vakio ja m on vikamekanismin kerroin. Eyringin mallia käytetään ennustamaan juotteen väsymystä ja perustuu Coffin-Manson lähestymistapaan. Voidaan sanoa, että Eyringin mallissa on sovellettu Arrhenius yhtälöä ja Coffin-Manson yhtälöä.¹⁸

5.5 Engelmaier-malli

Werner Engelmaier kehitti juotoksen väsymysmallin 1980-luvun alussa. Engelmaierin malli perustuu Coffin-Manson lähestymistapaan ja sitä käytetään ennustamaan juotteen väsymystä. Se eroaa muista malleista, koska siinä otetaan huomioon juotosliitosten geometria ja matalan syklin tiedot tinalyijy-juotokselle. Engelmaierin yhtälöä voidaan käyttää ilman testitietojen tarvetta.¹⁹

Kannan vaihteluväli ($\Delta\gamma$) voidaan laskea yhtälöllä:

$$\Delta\gamma = C \frac{L_D}{h_s} \Delta\alpha\Delta T, \quad (6)$$

jossa C on geometriasta riippuva vakio, L_D on juotospisteiden diagonaalinen etäisyys levyn neutraalista pisteestä olettaen, että levyn muoto on suorakulmainen. Kaavassa h_s on juotosliitoksen korkeus, $\Delta\alpha$ on lämpölaajenemisen ero sirun ja komponentin välillä ja substraatin ja piirilevyn välillä ja ΔT on lämpötilan muutos.¹⁸

¹⁸ Birolini, A. Reliability Engineering Theory and Practice 8th Edition

¹⁹ Blattau, N & Hillman, C. An Engelmaier Model for Leadless Ceramic Chip Devices with PB-Free Solder at DfR Solutions

6 TESTIJÄRJESTELYT

REL-Laboratoriossa (Reliability laboratory) on kuusi olosuhdekaappia, joita käytetään erilaisiin eliniän kiihdyttämiseen tarkoitettuihin testeihin. Näistä yksi valittiin kokoluokan perusteella tähän opinnäytetyön testiin.

6.1 Olosuhdekaappi testissä

Testissä käytetään Espec-PU-2KPH-olosuhdekaappia (**Kuva 8**). Olosuhdekaapissa saadaan lämpötilaa laskettua ja nostettua yli normaalin laitteen käyttölämpötilan. Siten saadaan suurempi ΔT , joka tarkoittaa lämpötilan muutosta. Testissä oleva laite DUT1 (Device Under Test) tarkoittaa ensimmäistä testilaitetta. Olosuhdekaapissa lukeva HALT (Highly Accelerated Life Test) tarkoittaa korkeasti kiihdytettyä elinikätestiä.

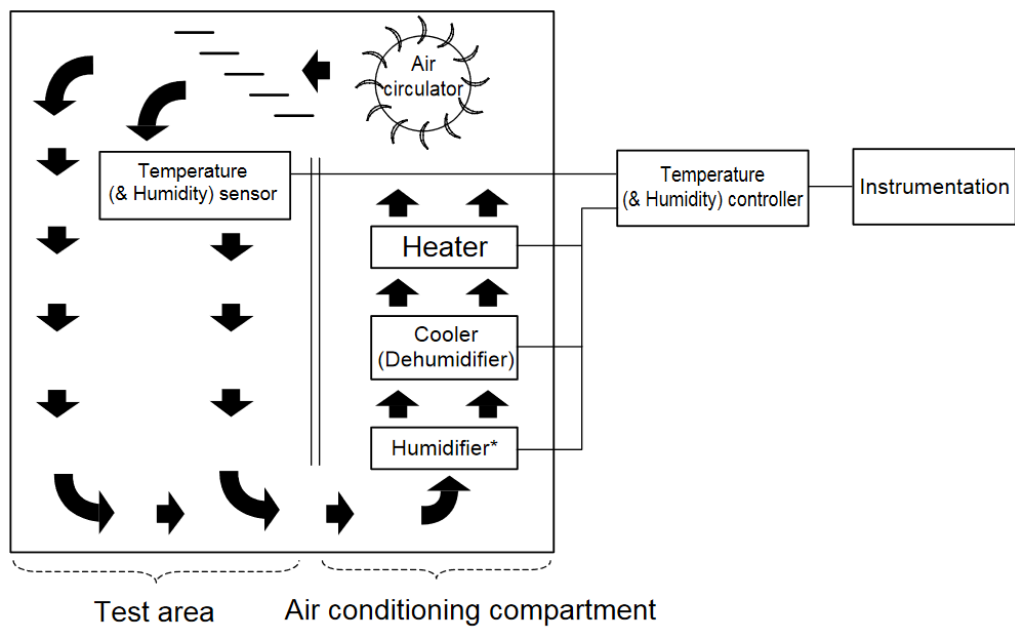
Olosuhdekaappia käytetään arvioimaan laitteiden ja osien lämpötila- ja kosteusvaikutuksia koko tuotteen elinkaaren ajan kehityksestä, tuotannosta, laivauksesta ja käytöstä siihen asti, kun laite tai osa hylätään. Platinous K-sarjan avulla voi testata lämmönkestävyyttä, kylmäkestävyyttä, komponentin heikentymistä ja ikääntymistä.

Laitteita, osia ja materiaaleja käytetään ja varastoidaan paikoissa, joissa lämpötila ja kosteus voivat olla korkeammat tai alhaisemmat kuin tavallisesti, joka voi johtaa niiden ikääntymiseen ja rikkoontumiseen. Platinous K-sarjan kammiot on rakennettu toiminnallisuuden, käytön, kestävyden ja muiden eritelmien testaamiseen erilaisissa ympäristöolosuhteissa.



Kuva 8. Testissä oleva laite olosuhdekaapissa.²⁰

²⁰ Danfoss Drives Vaasa REL-laboratorio, 500V espec cyclic test report



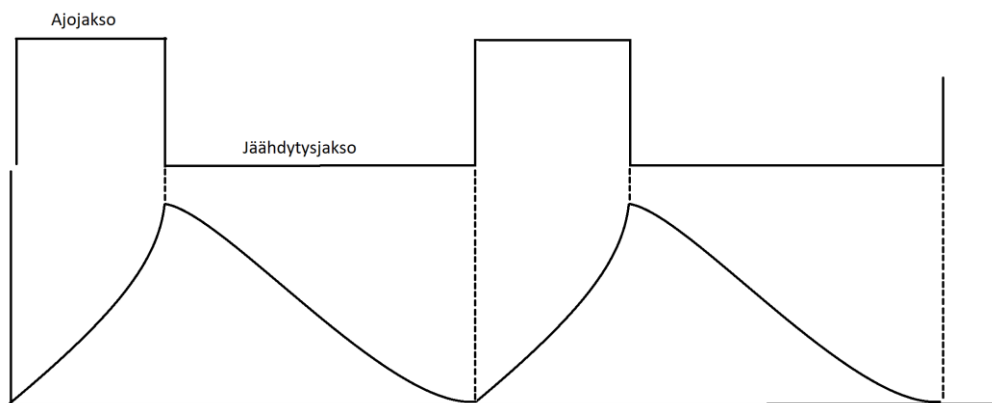
* : Not provided on temperature-only chambers.

Kuva 9. Espec-olosuhdekaapin toiminta kuvattuna, joissa on kosteuden säätö mukana.²¹

6.2 Opinnäytetyön testin lämpötilavaihtelut

Lämpötilavaihtelujen avulla yritetään testissä kiihdyttää laitteen IGBT-moduulin hajoamista, jotta saataisiin nopeammin laitteen hajoamisesta dataa kuin, esimerkiksi normaalilla käyttölämpötila-alueella.

²¹ User's manual Temperature (& Humidity) Chambers Platinous K Series Chambers May 17, 2010 Forty-fifth Edition



Kuva 10. Perinteisen syklisen testin ajojakso ja jäähdytysjakso.

Normaalissa testissä on lämpötila pidetty stabiilina 20°C asteessa tai sitten 40°C asteessa. Opinnäytetyön testissä olosuhdekaapinlämpötila ajon aikana on 45°C astetta ja jäähdytysjaksossa -10°C astetta. Lämpötilan muutoksilla pyritään myös selvittämään, kuinka laite reagoi syklisissä testeissä rajuihin lämpötilan muutoksiin.

6.3 Kestotestauslaitteistot

REL-laboratoriossa on käytössä kestopestauslaitteistoja (Endurance testing), joilla voidaan tehdä laitteille staattisia ja syklisiä testejä. Laboratoriossa on useita testiuuneja eri tehoisten taajuusmuuttajien kestopestajä varten. Taajuusmuuttajilla ajetaan kestopestitilassa nimellistä kuormaa.



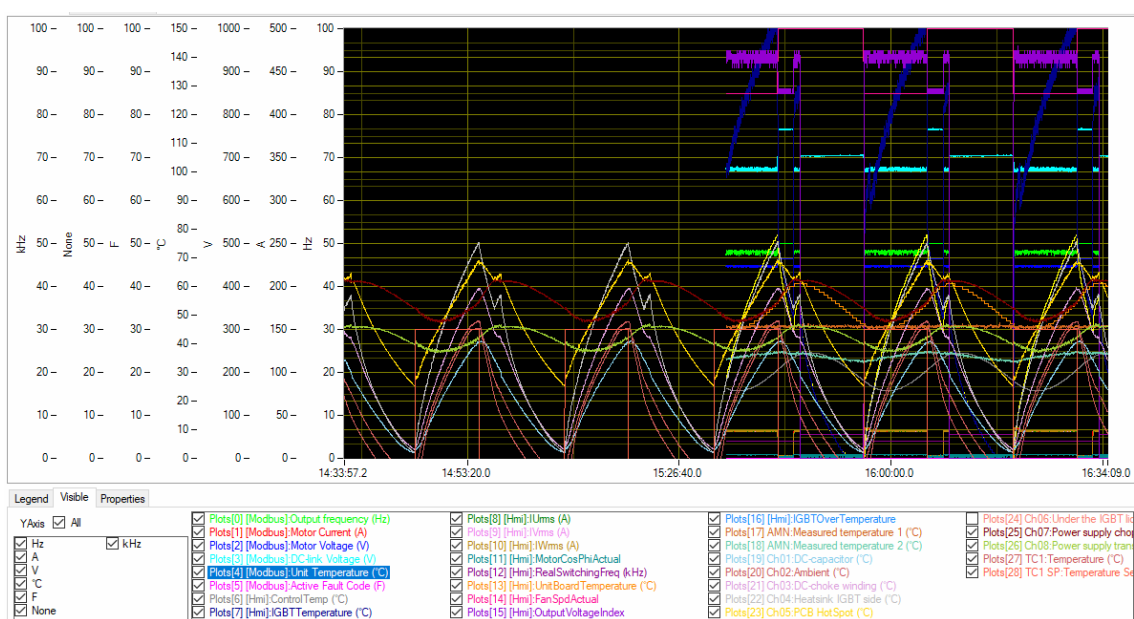
Kuva 11. Kestotestialue.²²

Testeissä käytetään paljon piirtureita, jotka mittaavat pääasiassa lämpötiloja, mutta tarvittaessa niillä voidaan mitata myös jännitteitä. Testiuuneissa on käytössä joko regeneratiivinen-yksikkö tai keinoverkko, joka sähköistää laitteen. Kestotestitilassa on jäähdytyslaitteet, jotta tilan ympäristölämpötila ei nousisi liian korkeaksi.

²² Danfoss Drives Vaasa REL-laboratorio, 500V espec cyclic test report

6.4 Testiajo laajemmassa lämpötila-alueessa

Olosuhdekaappia käytetään Drivetest-testausohjelmalla, joka on käytössä Vaasan Danfoss Drivesin tuotekehityksessä. Sekvenssi mikä on räätälöity Drivetestiin ohjaa laitetta sekä olosuhdekaappia ja vaihtaa näiden parametrejä automaattisesti syklisestä tai staattisesta testistä riippuen. Näin saadaan testi automaattisesti toimimaan ja samalla saadaan mittaustulokset samaan tiedostoon.



Kuva 12. Testin syklisestä ajosta kuva, jossa näkyy testin ajojakso ja jäähtytysjakso.²³

Testissä käytetään lämpötila-antureita, joilla mitataan lämpötiloja laitteen eri kohdista. Lämpötila-anturit on kytketty Yokokawan-piirturiin, joka on myös asetettu Drivetest-ohjelmaan, jotta saadaan laitteen ulkoiset lämpötilamittaukset talteen samaan tiedostoon.

²³ Danfoss Drives Vaasa REL-laboratorio, 500V espec cyclic test report

7 ANALYYSISSÄ KÄYTETTÄVÄT SOVELLUKSET

7.1 Akustinen mikroskopia (SAM)

Akustisen mikroskopian (Scanning Acoustic Microscopy) tekniikat analysoivat sekä heijastettujen, että lähetettyjen aaltojen voimakkuutta ja vaihetta. Näin syntyy visuaalisia kuvia, jotka heijastavat näytteen akustisen impedanssin vaihtelua. Siten paljastuu sisäisiä puutteita ja vikoja, kuten delaminaatiota ja aukkoja. Akustisten linssien avulla akustiset aallot keskitetään näytteen sisälle ja järjestelmän sisäiseen tarkastukseen.²⁴

7.2 Liitoslankojen vetokoe

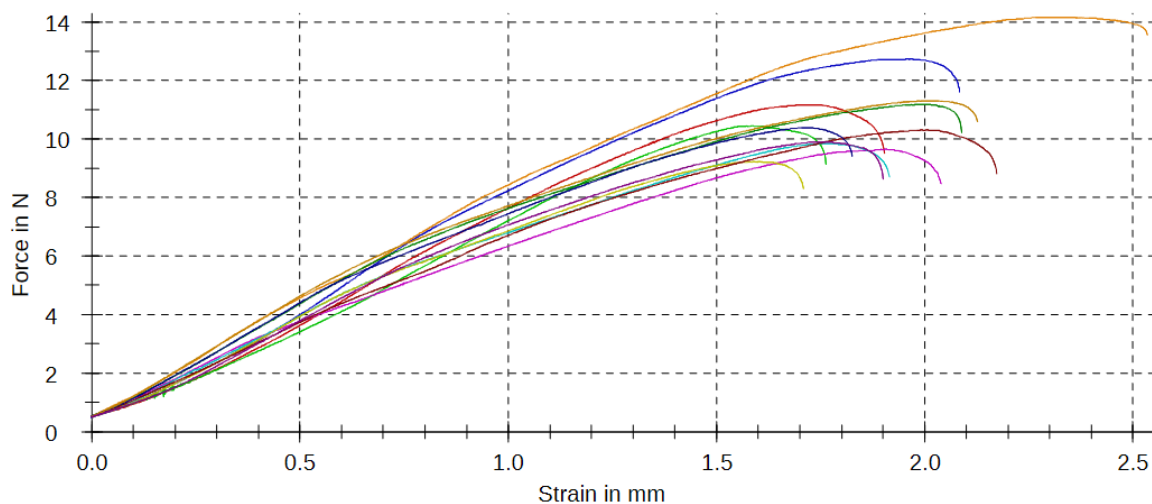
Vetokoe tehdään liitoslangoille, jotta voidaan katsoa, onko testi vaikuttanut IGBT-moduulin liitoslankoihin ja huomataanko niissä väsymistä. Vetokoneen alku momentiksi ennen vetoa on asetettu 0.5 N (Newton).

²⁴ How it works Scanning Acoustic Microscopy



Kuva 13. Vetokone Zwick Roell Z2.5, jolla tehty testit liittoslangoille.²⁵

Vetokoneena toimi Zwick Roell Z2.5, jota käytetään liitoslankojen vetämiseen ja muihin veto- ja painotoimintoihin. Zwick Roell Z2.5 käyttöohjelmana toimii testXpert II-testausohjelma.

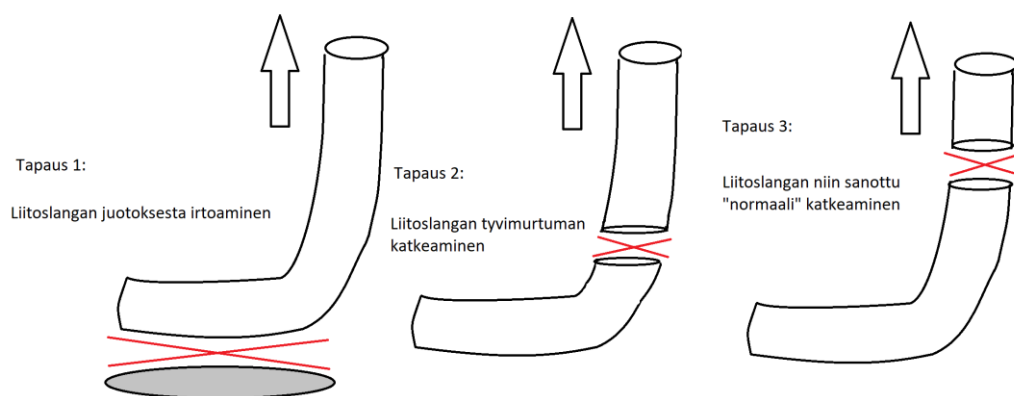


Graafi 1. Vetokoneella tehdyt liitoslankojen vetotestit.²⁴

Uuteen IGBT-moduuliin tehdyt liitoslankojen vetotestit näyttävät liitoslankojen venymän ja poikkeamiseen käytetyn voiman. Kaikissa tapauksissa langat poikkesivat samalla tavalla kuin vikamekanismissa yksi, mikä oli odotettavissa. Vetokoneella tehdyissä testeissä ei juurikaan ollut hajontaa. Venyvyys liitoslangoilla oli 1.7 - 2.1 mm ja voima 8.1 - 11.6 Newton. Oransilla käyrällä oleva tulos (**Graafi 1.**) täytyy jättää tuloksesta pois suuren heiton takia, mikä saattoi johtua vetokoneen vaijerin liian kovasta kulmasta. Loput tuloksista oli kuitenkin käyttökelpoisia tulevaisuutta ajatellen, mutta täytyy muistaa, että tulokset käyvät vain kyseiselle moduulityypille.

²⁵ Danfoss Drives Vaasa MAL-laboratorio, 500V espec cyclic test report

Liitoslangoille on kolme erilaista vikamekanismia. Ensimmäisessä vikamekanismissa yksi liitoslanka irtaoo juotoksestaan. Tämä vika ei pitäisi olla mahdollista ilman liitoslankojen ikääntymistä. Toisessa vikamekanismissa liitoslanka katkeaa tyvestä, joka on normaali tapaus. Kolmannessa vikamekanismissa liitoslanka katkeaa vetokohdasta, mikä on yleisin hajoaminen uudessa IGBT-moduulissa.



Kuva 14. Liitoslankojen vikamekanismit.

Moduuleista ei poistettu muottia ennen vetokokeen tekemistä, koska huomattiin, että muotin poistamisella ei ollut juuri suurta merkitystä tuloksen kannalta.

7.3 Poikkileikkeet

IGBT-moduuleille tehdään paljon poikkileikkeitä testien jälkeen, jotta nähdään miten juotosliitos on vanhentunut ja miten vanheneminen on edennyt.



Kuva 15. Leica DMI5000M käänteismikroskooppi.²⁶

Poikkileikkeet tehdään käytännössä leikkaamalla näyte halutusta kohdasta. Leikattu näyte valetaan hartsiin, jonka jälkeen kohta hiotaan tarkasti. Kun näyte on valmis, sitä voidaan tutkia käänteismikroskoopin avulla ja ottaa näytteestä valokuvat.

²⁶ Danfoss Drives Vaasa MAL-laboratorio, 500V espec cyclic test report



Kuva 16. Hartsiiin valettu poikkileike.²⁷

Poikkileikekuvat auttavat valtavasti vian tunnistamista SAM-kuvien kanssa. SAM-kuvien ansioista on helpompi tehdä poikkileikkeitä moduuleille, jotta tiedetään missä kohtaa on vikakohta.

²⁷ Danfoss Drives Vaasa MAL-laboratorio, 500V espec cyclic test report

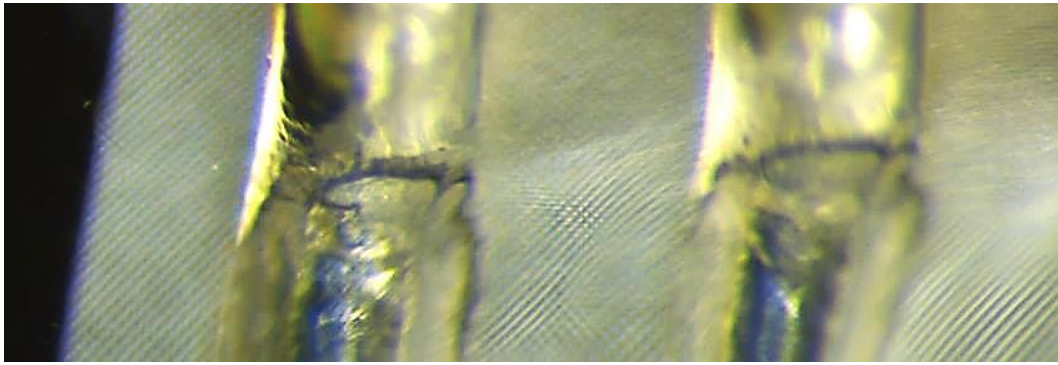
8 SYKLISET VIKAMEKANISMIT

Tehomoduuleissa on erilaisia vikamekanismeja, kuten liitoslangan väsymistä, sirun metalloinnin rekonstruktiota, juotosväsymystä, väsymishalkeamista keraamisessa substraatissa, alumiiniliitoslankojen korroosiota ja palamisvikoja. Liitoslangan irtoamisvikatilassa ja juotosväsymisessä ovat erilaiset fyysiset käyttäytymisensä, joten ne on analysoitava erikseen ja niitä on käsiteltävä eri tavalla. Empiirisessä elinikämallinnuksen lähestymistavassa tämä edellyttää, että kehitetään erillinen malli jokaiselle vikaantumistilalle erikseen.²⁸

8.1 Liitoslangat

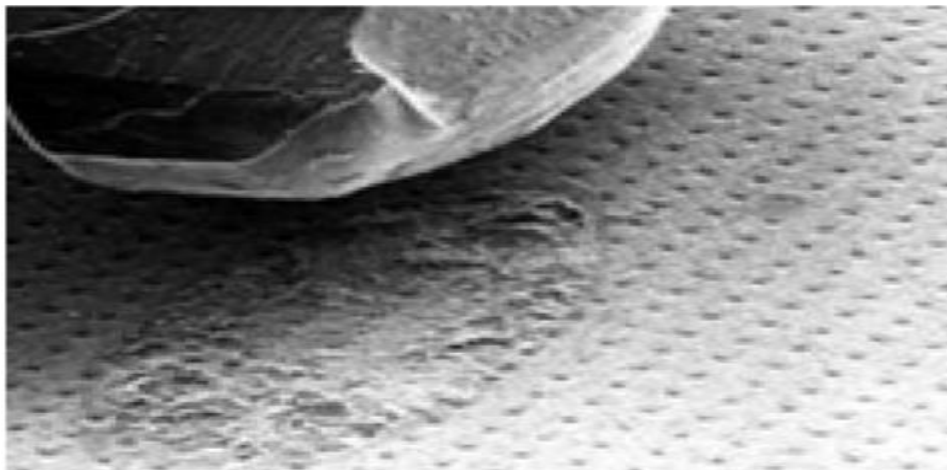
IGBT-moduulille on ominaista puolijohdesirut, jotka on juotettu metallijohtimiin, joissa on paksut rinnakkaiset alumiiniliitoslangat. Liitoslangat puolestaan juotetaan eristettyyn dielektriseen kerrokseen, jota kutsutaan Direct Bonded Copper (DBC). IGBT-moduulissa on monikerroksinen rakenne, joka koostuu materiaaleista, joilla on erilaiset lämpölaajenemiskertoimet. Materiaalien lämpöominaisuudet ovat lämpötilasta riippuvaisia. IGBT-tehomoduulien liitoslankojen väsyminen johtuu pääasiassa lämpömekaanisesta jännityksestä, joka aiheutuu liitântäkoskettimissa lämpötilan vaihteluiden ja materiaalien yhteensopimattomuuksien vuoksi.²⁷

²⁸ Kovacevic-Badstuebner, I. F., Kolar, J. W. & Schilling, U. Modelling for the Lifetime Prediction of Power Semiconductor Modules Chapter 5



Kuva 17. Liitoslankojen murtuminen.²⁹

Liitoslankojen murtuminen on tulos pitkästä syklisestä kesto-kestotestistä. Lämpötilan vaihteluiden vuoksi liitoslangat ovat murtuneet (**Kuva.17**) ja tästä voidaan päätellä, että kyseessä voisi olla mekaaninen rasitusvika.



Kuva 18. Liitoslangan irtoaminen juotoksesta.³⁰

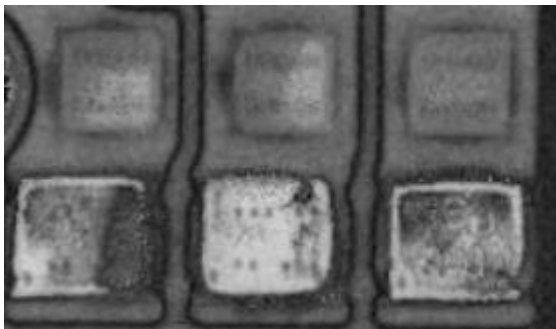
Liitoslankojen irtoamista edesauttaa syklinen lämpötilanvaihtelu, mutta tämä ei ole ainoa syy langan irtoamiseen. Toinen syy voi olla myös heikko juotosprosessi liitoslangoille.

²⁹ Danfoss Drives Vaasa REL-laboratorio, 500V espec cyclic test report

³⁰ Valentine, N., Dr. Das, D. & Prof. Pecht, M. University of Maryland Failure Mechanisms of Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs)

8.2 Sirun juotosliitos

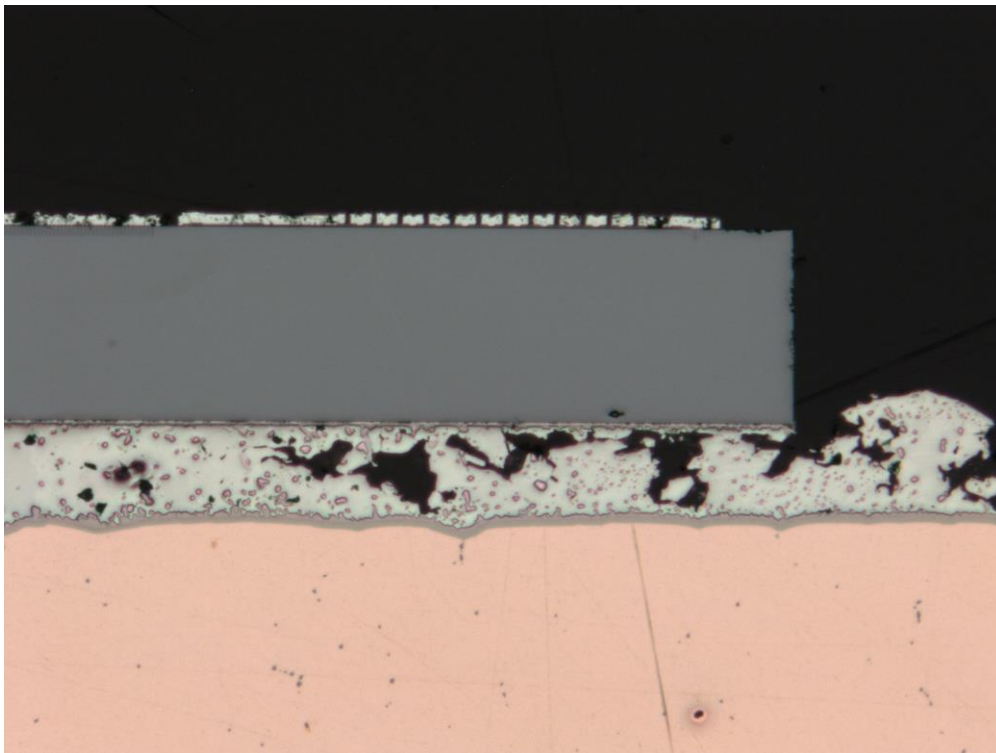
Syklisessä testissä sirun juotosliitoksen ikääntyminen on myös yksi yleisimmistä vioista pohjalaatattomissa moduuleissa. Pohjalaatattomissa moduuleissa sirun juotoksen ikääntyminen ja siitä johtuva delaminaatio tapahtuu juotoksen reunoilla.



Kuva 19. SAM-kuva sirujen ikääntymisestä.³¹

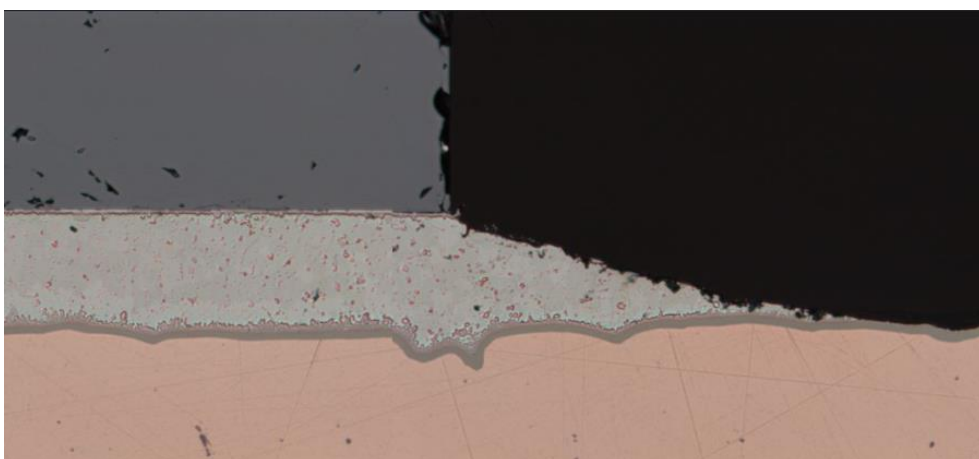
Keskimmäisessä sirussa (**Kuva 19.**) on myös huomattavissa juotteen pyöristymistä sirun reunoille, mikä viittaa moduulin ikääntymiseen. Pyöristyminen tarkoittaa, että juote irtoaa sirun alta sirun reunojen ympärille. Juoteliitos alkaa delaminoitua eli juotos halkeilee sirun reunoilla. Delaminoitumisessa materiaali murtuu kerroksiksi eli irtautuu toisistaan. Jossain tapauksissa on huomattu, että juote on mennyt kasaan tai kadonnut osaksi sirun reunoilta.

³¹ Danfoss Drives Vaasa REL-laboratorio, 500V espec cyclic test report



Kuva 20. Poikkileikekuva ikääntyneestä moduulista.³²

Poikkileikekuvasta (**Kuva 20.**) nähdään selvästi, että juotosliitos on halkeillut sirun alta ja sirun kontakti irtoaa, kun kontakti irtoaa ja sirun väliin jää ilmaa tai muita epäpuhtauksia. Ilman ja epäpuhtauksien takia kontakti ei enää ole hyvä, jonka vuoksi moduuli kuumenee ja laite vikaantuu.



Kuva 21. Poikkileikkeen referenssikuvaksi ehjällä sirun liitoksella.³²

Referenssikuvana oleva ehjän juotoksen poikkileikekuva (**Kuva 21.**) näyttää, että juotoksessa ei ole aukkoja tai muita halkeamia.

8.3 Pohjalevyn juotosliitos

Aiemmat työt ovat osoittaneet, että lämpömekaaniseen rasitukseen johtava lämpöväsytys aiheuttaa juotosliitoksen delaminaatiota substraatin ja pohjalevyn välillä. Lämpösykliprosessin tuloksena on havaittu, että syklien jälkeen pohjalevyn juote delaminoituu substraatin kehällä. Delaminaation etenemistä kohti juotoskeskittymää havaitaan siten, että tämä ilmiö koostuu metalloidun substraatin ja pohjalevyn välisestä juotoshalkeamisesta, joka johtuu materiaalien välisen lämpölaajenemiskertoimen epäsuhtaisuudesta. Juotoshalkeamisen seurauksena tämä aiheuttaa moduuliin lämpövastuksen lisääntymistä, mikä lopulta aiheuttaa sirun hajoamisen.

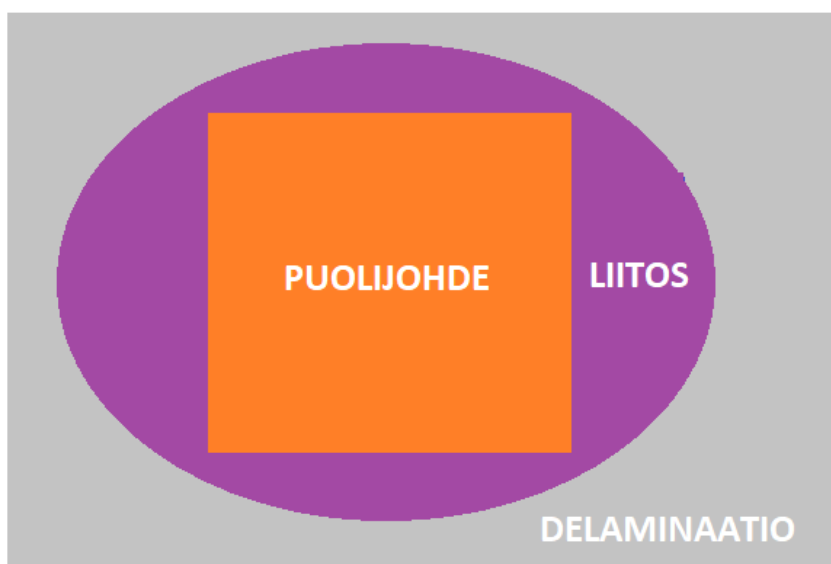
Pohjalevyn juotosliitoksessa tapahtuvaa delaminaatiota tapahtuu varsinkin korkeiden puolijohdelämpötilojen ja nopeiden sykliajojen takia. Delaminaatiota edesauttaa esim. moduulin huono juotosliitosprosessi tai kuperan pohjalevyllisen moduulin asentaminen jäähdytyslementtiin, koska asentaessa moduulia juotos voi venyä tai haljeta, jos juotosprosessissa on jäänyt aukkoja liitoksen väliin.

³² Danfoss Drives Vaasa MAL-laboratorio, 500V espec cyclic test report



Kuva 22. Sirun liitoksen havainnekuva ehjällä liitoksella.

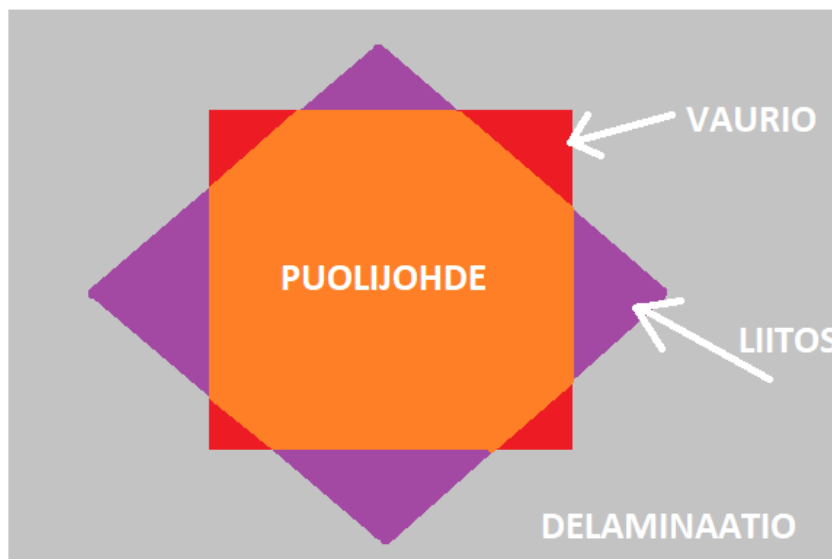
Ehjällä liitoksella pohjalaatan alla juotosliitos ei ole vielä irronnut ja alle ei ole vielä jäänyt ilmaa tai aukkoja ja kontakti on hyvä.



Kuva 23. Havainnekuva delaminaation alkuvaiheesta.

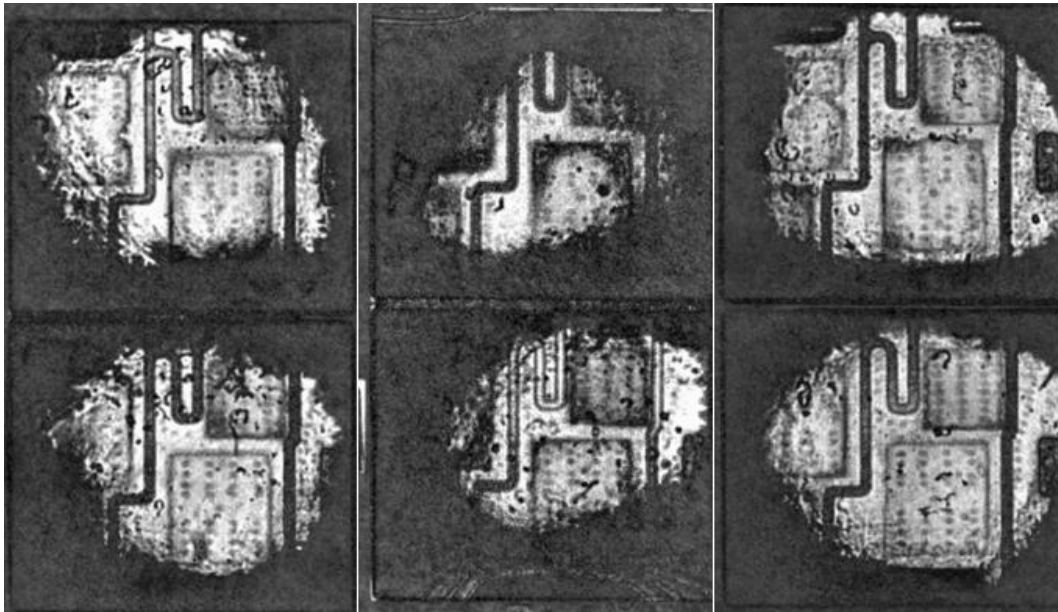
Delaminaation etenemien juotosliitoksessa on edennyt jo lähemmäksi puolijohdetta, mutta ilmaa ei ole vielä kertynyt puolijohdeen alle, joten moduuli

vielä toimii, mutta moduulin lämmöt ovat saattaneet jo nousta tässä tapauksessa, koska kontakti ei ole enää paras.



Kuva 24. Havainnekuva delaminaation loppuvaiheesta.

Pohjalevyllisessä moduulissa tapahtunut delaminaation näkee hyvin SAM-kuvasta (**Kuva 25.**). Havainnekuvassa vaurioalueet on merkattu punaisella, jotka kertovat juotosliitoksen irtoamisen näiltä kohdilta.



Kuva 25. SAM-kuva pohjalevyn delaminaatiosta.³³

Mustalla olevat alueet moduulissa ovat irronneet pohjalevystä eli alle on jäänyt ilmaa. Tässä tapauksessa moduuli on jo vikaantunut ja ellei moduuli ole vikaantunut, ainakin laite on vikaantunut yllämpöön.

³³ Danfoss Drives Vaasa MAL-laboratorio, 500V espec cyclic test report

9 ANALYYSI JA YHTEENVETO

IGBT-moduulien elinikäkerrointen laskemisen analyyseissa käytettävät sovellukset perustuvat Danfoss Drives Vaasassa pääasiallisesti akustiseen mikroskopiaan sekä poikkileikkeisiin.

Opinnäytetyön testissä käytetty laite ei hajonnut suunnitellulla aika välillä, jonka vuoksi moduulin hajoamiselle ei pystytty tekemään analyysiä ja myöskään ei pystytty käyttämään edellä mainittuja sovelluksia mm. vetokonetta, SAM-kuvausta ja poikkileikkausta testissä olevalle moduulille.

Testissä moduulin odotettiin hajoavan nopeammin, kuin normaalissa testissä johtuen laajasta lämpötilanvaihtelusta. Olosuhdekaappi antoi 30°C astetta lisää lämpötila-alueeseen, jonka vuoksi odotus oli, että laite vikaantuu aiemmin. Laite on vieläkin ehjä ja oletettavasti kestää syklejä enemmän kuin normaalissa kestotestitilassa. Syventävän analyysin laitteen toiminnasta löytyy Liite 3., missä käydään läpi mahdolliset IGBT-transistoriin vaikuttavat mekaaniset rasitukset ja kemialliset reaktiot.

Testin aikana kokeiltiin vetää liitoslankoja uusista moduuleista, jotta nähdään kirjallisuudesta löytyvien vetotesti vikamekanismien paikkaansapitävyys. Tulevaisuudessa vetokonetta voidaan käyttää hyvin eri moduulien analyyseissa akustiseen mikroskopian sekä poikkileikkeiden lisäksi.

Testistä on saatu tähän mennessä jo paljon dataa tulevaisuutta ajatellen ja tietoa, että mihin suuntaan testejä kannattaa ohjata. Testejä täytyy tehdä vielä useita käyttäen testissä käytettyä lämpötila-aluetta, koska yksi tulos ei kerro vielä totuutta. Lämpötila-aluetta pitää laajentaa ja saada enemmän referenssipisteitä ennen kuin saadaan oikeasti laadullisesti luotettavia tuloksia. Tulevaisuuden kannalta päästiin silti hyvään tulokseen, koska nyt on paikka, jossa voi testata suuremmilla lämpötila-alueilla.

Kehitettävänä aiheena seuraavaksi voisi olla virran tiheyden vaikutuksen tutkiminen elinikään ja ottaa se vielä mukaan tähän yhtälöön tai vaihtoehtoisesti eri vaikutusten merkittävyyden tutkimista DOE (Designs of Experiments) menetelmällä.

Tulevaisuutta ajatellen olisi hyvä, että testejä voisi tehdä lyhyemmällä aika välillä, jotta saadaan laitteen vikaantumisen tulokset nopeammin ja näin tuotekehityksen kannalta laite nopeammin markkinoille.

LÄHTEET

Aflecht, S. Vacon Oyj:n historia 2014 Vaasan Ammattikorkeakoulu. Viitattu 1.2.2021

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/86432/Aflecht_Samuli.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Birolini, A. Reliability Engineering Theory and Practice 8th Edition (ISBN 978-3-662-54208-8)

Blattau, N & Hillman, C. An Engelmaier Model for Leadless Ceramic Chip Devices with PB-Free Solder at DfR Solutions

Danfoss Drives Vaasa MAL-laboratorio, 500V espec cyclic test report

Danfoss Drives Vaasa REL-laboratorio, 500V espec cyclic test report

Hoang, I. P. Handbook of Reliability Engineering, (ISBN 1-85233-453-3)

Hornkamp, A. V. M. IGBT Modules Technologies, Driver and Application (ISBN 978-3-00-040134-3)

How it works Scanning Acoustic Microscopy Viitattu 20.3.2021

<https://wpo-altertechnology.com/how-it-works-scanning-acoustic-microscopy-csam/>

Hurmerinta, M. Tanskalainen perheyryitys Danfoss ostaa Vacon Oyj:n Tekniikkatalous. Viitattu 1.2.2021

<https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/tanskalainen-danfoss-ostaa-vaconin/2950c074-fdd1-3dee-9871-331ff0208bb1>

IPC-SM-785 Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments Viitattu 20.3.2021

<https://www.ipc.org/TOC/IPC-SM-785.pdf>

Jewett, J. W. & Serway, R. A. (2013). Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics. 9th edition. (ISBN978-1-133-95405-7)

Kovacevic-Badstuebner, I. F., Kolar, J. W. & Schilling, U. Modelling for the Lifetime Prediction of Power Semiconductor Modules Chapter 5 Viitattu 4.3.2021

https://www.pes-publications.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/further_publications/Chapter5_Ivana_Kovacevic_22mai15.pdf

Norris, K. C. and A. H. Landzberg. "Reliability of Controlled Collapse Interconnections" (ISSN- 0018-8646)

Pulfrey, D. L Understanding Modern Transistors and Diodes (ISBN-13 978-0-521-51460-6)

Semiconductor Point-Contact Rectifier Effect is Discovered

<https://www.computerhistory.org/siliconengine/semiconductor-point-contact-rectifier-effect-is-discovered/> Viitattu 15.2.2021

Szcześniak, P Three-phase AC-AC Power Converters Based on Matrix Converter Topology Matrix-reactance frequency converters concept (ISBN 978-1-4471-4895)

The History of fatigue testing Viitattu 20.3.2021

https://www.wmtr.co.uk/History_Of_Fatigue_Testing.html

User's manual Temperature (& Humidity) Chambers Platinous K Series Chambers May 17, 2010 Forty-fifth Edition

VACON-Engineered-Drives-Manual

VACON-NXN-NFE-Service-Manual julkaisematon materiaali

VACON-NX-AFE-Service-Manual julkaisematon materiaali

Vacon Oyj tietoja lyhyesti Viitattu 1.2.2021.

<https://fi.wikipedia.org/wiki/Vacon>

Valentine, N., Dr. Das, D. & Prof. Pecht, M. University of Maryland Failure Mechanisms of Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs) Viitattu 20.3.2021

https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/2015_pvmrw_131_das.pdf

Vasu, V. & Xuejun, F. "An Acceleration Model for Lead-Free (SAC) Solder Joint Reliability Under Thermal Cycling." 2008 Electronic Components and Technology Conference.

https://www.dfrsolutions.com/hubfs/DfR_Solutions_Website/Resources-Archived/Publications/2005-2007/2006_Blattau_IPC_working.pdf

Yang, G. Life Cycle Reliability Engineering by (ISBN: 978-0-471-71529-0)

LIITTEET

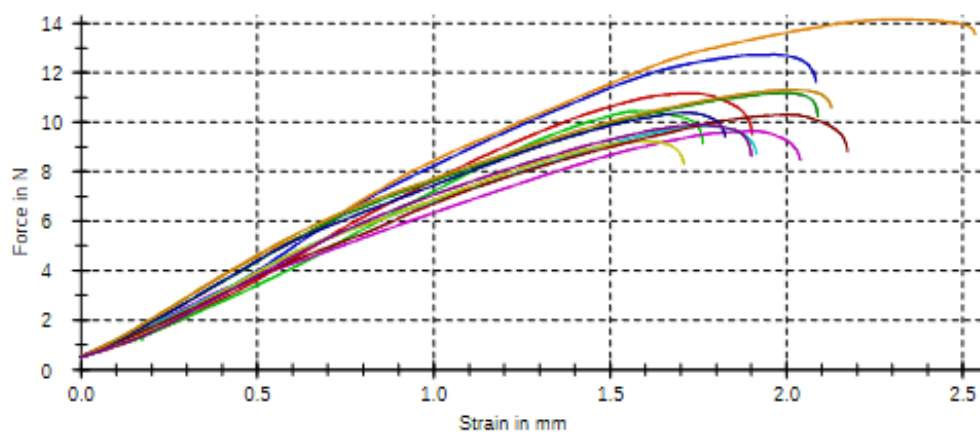
LIITE 1

Zwick-Roell vetokoneella saadut tulokset IGBT-moduulin vetotesteistä.

Zwick / Roell		22.03.21					
IGBT-module bond wire pull test							
Heading	: IGBT-module bond wire pull test						
Customer	:						
Tester	: Teemu Myllymäki						
Note	:						
Machine data	: Zwick/Roell Z2.5						
Pre-load	: 0,5 N						
Test speed	: 1 mm/min						
Test results:							
No.	Specimen ID	Type	d ₀ µm	Findings	Comment	Date	Gradient N/mm
1.2.1.2	1	IGBT-module	x	Normal	cutting at wire leg	22.3.2021	-
1.2.1.3	2	IGBT-module	x	Normal	cutting at wire leg	22.3.2021	-
1.2.1.4	3	IGBT-module	x	Normal	cutting at wire leg	22.3.2021	-
1.2.1.5	4	IGBT-module	x	Normal	cutting at wire leg	22.3.2021	-
1.2.1.6	5	IGBT-module	x	Normal	cutting at wire leg	22.3.2021	-
1.2.1.7	6	IGBT-module	x	Normal	cutting at wire leg	22.3.2021	-
1.5.1.1	7	IGBT-module	x	Normal	cutting at wire leg	22.3.2021	-
1.5.1.3	8	IGBT-module	x	Normal	cutting at wire leg	22.3.2021	-
1.5.1.4	9	IGBT-module	x	Normal	cutting at wire leg	22.3.2021	-
1.5.1.5	10	IGBT-module	x	Normal	cutting at wire leg	22.3.2021	-
1.5.1.6	11	IGBT-module	x	Normal	cutting at wire leg	22.3.2021	-
1.5.1.7	11	IGBT-module	x	Normal	cutting at wire leg	22.3.2021	-
No.	Clock time	End-force N	σ _M - Tensile strength N	ε _M - Strain at tensile strength mm	σ _B - Stress at break N		
1.2.1.2	12:56:22	9,50	11,2	1,72	9,50		
1.2.1.3	13:02:22	9,12	10,4	1,58	9,12		
1.2.1.4	13:08:08	11,61	12,7	1,97	11,6		
1.2.1.5	13:14:28	13,57	14,2	2,34	13,6		
1.2.1.6	13:20:21	8,46	9,64	1,91	8,46		
1.2.1.7	13:33:42	8,70	9,85	1,77	8,70		
1.5.1.1	13:26:26	8,31	9,22	1,59	8,31		
1.5.1.3	13:29:48	8,81	10,3	2,01	8,81		
1.5.1.4	13:40:18	10,22	11,2	2,00	10,2		
1.5.1.5	13:43:40	9,42	10,4	1,71	9,42		
1.5.1.6	13:47:02	10,60	11,3	2,01	10,6		
1.5.1.7	13:50:25	8,63	9,89	1,75	8,63		

No.	ϵ_b - Strain at break mm
1.2.1.2	1,90
1.2.1.3	1,76
1.2.1.4	2,08
1.2.1.5	2,53
1.2.1.6	2,04
1.2.1.7	1,91
1.5.1.1	1,71
1.5.1.3	2,17
1.5.1.4	2,09
1.5.1.5	1,83
1.5.1.6	2,13
1.5.1.7	1,90

Series graph:



Statistics:

IGBT	d_0	Gradient	End-force	σ_M - Tensile strength	ϵ_M - Strain at tensile strength	σ_b - Stress at break
n = 6	μm	N/mm	N	N	mm	N
\bar{x}	x	6,51	10,16	11,3	1,88	10,2
s	0,000	-	2,01	1,78	0,26	2,01
v	0,00	-	19,80	15,72	14,00	19,80

IGBT	ϵ_b - Strain at break
n = 6	mm
\bar{x}	2,04
s	0,27
v	13,11

LIITE 2

Liite tiedosto on poistettu Danfoss Drives pyynnöstä.