

Eric Grönlund

Keraamisten monikerroskondensaattorien ALT-testauslaitteisto

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

9.5.2017

Tekijä Otsikko	Eric Grönlund Keraamisten monikerroskondensaattorien ALT-testauslaitteisto
Sivumäärä Aika	35 sivua + 2 liitettä 9.5.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Toimittajalaatupäällikkö Martti Mattila Lehtori Esko Tattari
<p>Insinööriyön tarkoitus oli selvittää keraamisten monikerroskondensaattorien ennenaikais- ten vikaantumisten osuuksia eri komponenttivalmistajien välillä. Työn tavoite oli suunnitella ABB Oy:lle keraamisten monikerroskondensaattorien ALT-testilaitteisto alusta loppuun. Työ jakautui neljään osaan: piirilevysuunnittelu, testausjärjestelmän rakentaminen ja joh- dotus, testiohjelman kirjoittaminen sekä itse testaaminen.</p> <p>Insinööriyössä suunniteltiin piirilevy PADS Logic- ja PADS Layout -ohjelmistoilla. Testijär- jestelmä rakennettiin tarkoitukseen suunniteltuun PC-kaappiin, johon sijoitettiin tiedonke- ruuta varten National Instrumentsin NI CompactDAQ-järjestelmä. Testituloksien kerää- mistä varten tehtiin tietokoneohjelma käyttäen LabView-ohjelmointiympäristöä. Testiohjel- man tehtävä oli tallentaa ylös vikaantuneen kondensaattorin tiedot sekä vikaantumisen ajanhetki. Tallennetuista tiedoista oli tarkoitus tehdä analyysiä komponentin vikaantumis- mekanismeista ja eliniän ennusteesta.</p> <p>Keraamisten monikerroskondensaattorien ALT-testaus tehtiin tähän tarkoitukseen soveltu- vassa sääkaapissa käyttäen eri lämpötiloja ja jännitetasoja. Testi suoritettiin yhdessä rasi- tuspisteessä jokaiselle tutkittavalle kondensaattorityypille erikseen. Testausjärjestelmän valmistuttua todettiin järjestelmän toimivan tilaajan toivomalla tavalla. Työn lopuksi kon- densaattorien testituloksista verrattiin eri valmistajien tuotteita keskenään.</p>	
Avainsanat	MLCC, kondensaattori, ALT-testaus

Authors Title	Eric Grönlund Ceramic Multilayer Capacitor ALT-test Setup
Number of Pages Date	35 pages + 2 appendices 9 May 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Martti Mattila, Supplier Quality Manager Esko Tattari, Senior Lecturer
<p>The purpose of this thesis was to investigate the amounts of early failures in ceramic multilayer capacitors and differences in manufacturers on the same type. The aim was to engineer an ALT-testing setup for ceramic multilayer capacitors from beginning to the end. The assignment came from ABB Oy. The task consisted of four parts: circuit board design, test-setup building and wiring, testing program writing and the testing itself.</p> <p>The circuit board was designed with PADS Logic and PADS Layout software. The testing setup was built in appropriate PC cabinet, which was installed with National Instruments NI CompactDAQ-system for data acquiring. Tester software for the data compiling was written with LabView. The task for the tester software was to detect a faulty capacitor in testing circuit board and save the time of occurrence with exact details of the capacitor. The intention was to make analysis of fault mechanisms and to calculate the capacitor's lifetime values from saved data.</p> <p>The ALT-testing for ceramic multilayer capacitors was performed in appropriate test chamber with high temperature and voltage. One stress level was used for each capacitor. After test-setup was finished it worked as ABB ordered. Finally the comparison between different manufacturers were made from the test results.</p>	
Keywords	MLCC, capacitor, ALT-test

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Keraaminen monikerroskondensaattori eli MLCC	2
2.1	MLCC:n toiminta	2
2.2	Kondensaattori DC- ja AC-virtapiirissä	4
2.3	MLCC:n rakenne ja materiaalit	6
2.4	Keraamisten kondensaattorien valmistus	8
2.5	Yleisimmät vikaantumismekanismit	10
2.5.1	Eristeläpilyönnin vaikutukset ja vikajälki	12
2.5.2	Eristeläpilyönnin fysikaalinen perusta	13
2.5.3	Eristeläpilyönnille altistavat rakenteelliset tekijät	14
2.6	Elektroniikan luotettavuus	14
2.7	MLCC:n luotettavuus	14
2.7.1	Luotettavuuden mallintaminen	16
2.7.2	Kiihdytetty elinikätestaus	18
2.7.3	Kiihdytysmallit	19
2.7.4	Luotettavuustestidatan analysointi	19
2.8	Kokeellisen osuuden perustelu	21
3	Työn vaiheet	22
3.1	Piirilevyn suunnittelu	22
3.2	Testauskaapin kalustus	23
3.3	Sulakkeiden lämmönkeston testaus	24
3.4	Testiohjelman kirjoittaminen	27
3.5	Kondensaattorien testaus	28
4	Tuloksien analysointi	31
5	Yhteenveto	34
	Lähteet	35

Liitteet

Liite 1. Erään MLCC-tyypin testituloksia

Liite 2. Kaikkien testattujen komponenttien Weibull-kuvaajat

Lyhenteet

AC	Alternating Current eli vaihtovirta. Sähkövirta, jossa varauksenkuljettajat vaihtavat suuntaa ajan funktiona. Kansainvälisesti käytössä oleva vaihtovirta on sinimuotoista.
ALT	Accelerated Life Test. Voimakkaasti kiihdytetty rasituskoee, joka suoritetaan käyttäen normaalia suurempaa vakio- lämpötilaa ja -jännitetasoa.
BME	Base Metal Electrode. Perusmetallista eli metallista, joka reagoi muiden yhdisteiden kanssa suhteellisen helposti, valmistettu elektrodi.
DC	Direct Current eli tasavirta. Sähkövirta, jossa varauksenkuljettajat kulkevat aina samaan suuntaan.
HALT	Highly Accelerated Life Test. Voimakkaasti kiihdytetty rasituskoee, jossa rasitustasoa nostetaan portaittain.
MLCC	Multi-Layer Ceramic Capacitor. Keraamisesta materiaalista valmistettu monikerroskondensaattori, jota käytetään yleisesti nykyaikaisissa elektronikkapiireissä.
PME	Precious Metal Electrode. Jalometallista eli metallista, joka ei juuri reagoi muiden yhdisteiden kanssa, valmistettu elektrodi
RE	Rare-Earth. Harvinaiset maametallit, jotka sijaitsevat jaksollisen järjestelmän loppupäässä.

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tarkoitus on selvittää MLCC-tyyppisten kondensaattorien (eli keraamisten monikerroskondensaattorien) elinikä käyttämällä kiihdytettyä elinikämittausmenetelmää (ALT eli Accelerated Life Test). Tarkoituksena on selvittää eri valmistajien välisiä eroavaisuuksia sekä valmistuserien tasalaatuisuutta ja luotettavuutta. Näihin vaikuttavat monet asiat valmistusprosessista aina lopullisiin käyttöolosuhteisiin.

Työn tilaajana toimii ABB Oy Drives Helsingin Pitäjänmäeltä. ABB on maailmanlaajuisesti yksi suurimmista sähkövoimatekniikan alan yrityksistä ja sen pääkonttori sijaitsee Sveitsissä. ABB Oy:llä on useampi toimipiste ympäri Suomea. Helsingin Pitäjänmäen tehtaalla valmistetaan sähkömoottoreita sekä taajuusmuuttajia.

Tämän insinööriyön tavoitteena on suunnitella MLCC-testausjärjestelmä, jolla saadaan tarkka tieto ajanhetkestä, jolloin kondensaattori on vikaantunut testauksen aikana. Tarkoituksena on selvittää eri kondensaattorivalmistajien ja mallien välisiä eroavaisuuksia niiden eliniässä hyödyntäen kiihdytettyä rasituskoemallia. Tilaajalla ei ole ennestään tämän kaltaiseen testiin soveltuvaa testausjärjestelmää. Työssä valmistettava kondensaattorien testausjärjestelmä on käytettävissä myöhemmin myös muiden kondensaattorien testaamiseen.

Insinööriyössä käsitellään MLCC:n valmistusprosessia, vikaantumismekanismeja, luotettavuutta sekä testauksesta saatujen tietojen analysointia. Testausjärjestelmän piirikaavion suunnittelussa käytetään PADS Logic- ja PADS layout -ohjelmistoja. Testauksen tiedonkeruu tehdään LabView-ohjelmalla ja ohjelman koodi kirjoitetaan alusta loppuun tätä työtä varten.

2 Keraaminen monikerroskondensaattori eli MLCC

MLCC-tyyppin kondensaattoreita hyödynnetään nykypäivänä lähes kaikissa elektroniikka sisältävissä laitteissa. Niiden luotettavuus on yksi tärkeimmistä laitteen elinikään vaikuttavista tekijöistä. Komponenttien koon pienentyminen viime vuosina on tuonut mukanaan huolen luotettavuusongelmista.

Keraamiset monikerroskondensaattorit ovat tyypillisesti kapasitanssiltaan pienikokoisia, korkeintaan kymmeniä mikrofaraadeja. Suuremmat arvot ovat kuitenkin mahdollisia, mutta harvinaisia. Kapasitanssiltaan suurien keraamisten monikerroskondensaattorien valmistuksessa tulee parantaa tilavuushyötysuhdetta, joka määritellään seuraavalla kaavalla 1:

$$\frac{C_t}{V} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r * N \frac{S}{d}}{S * h} \quad (1)$$

ε_0 on vapaan tilan eristevakio

ε_r on eristeaineen suhteellinen eristevakio

N on eristekerroksien lukumäärä

S on päällekkäin olevien elektrodien muodostama pinta-ala

d on eristekerroksen paksuus

h on kondensaattorin korkeus.

Kaavasta nähdään, että tilavuushyötysuhde kasvaa, kun eristevakiota ε_r kasvatetaan tai eristekerrosta d ohennetaan. (1, s. 1–4.)

2.1 MLCC:n toiminta

MLCC:n toimintaperiaate on sama kuin muillakin kondensaattoreilla. Kondensaattorit ovat passiivisia komponentteja, jotka pystyvät varastoimaan sähköenergiaa. Niiden perusrakenne koostuu vähintään kahdesta johtavasta levystä eli elektrodista, joiden välissä on yleensä jotain eristävää ainetta (kuva 1). Kun kondensaattorin napojen välille kytketään jännite, syntyy elektrodien välille sähkökenttä. Tämä sähkökenttä saa elektrodit varautumaan ja niiden välille syntyy jännite. Tätä kondensaattorin sähköenergian varastoisiskykyä kutsutaan kapasitanssiksi (kaava 2). Kapasitanssi on riippuvainen kondensaattorin elektrodien välisestä etäisyydestä, niiden yhteenlasketusta pinta-alasta sekä

eristeaineen permittiivisyydestä (kaava 3). Permittiivisyys on suure, joka kuvaa eristeaineen vaikutusta sähkökenttään.

$$C = \frac{Q}{U} \quad (2)$$

C on kapasitanssi

Q on varaus

U on jännite.

$$C = \varepsilon_0 * \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (3)$$

ε_0 on tyhjiön permittiivisyys

ε_r on suhteellinen permittiivisyys eli dielektrinen vakio

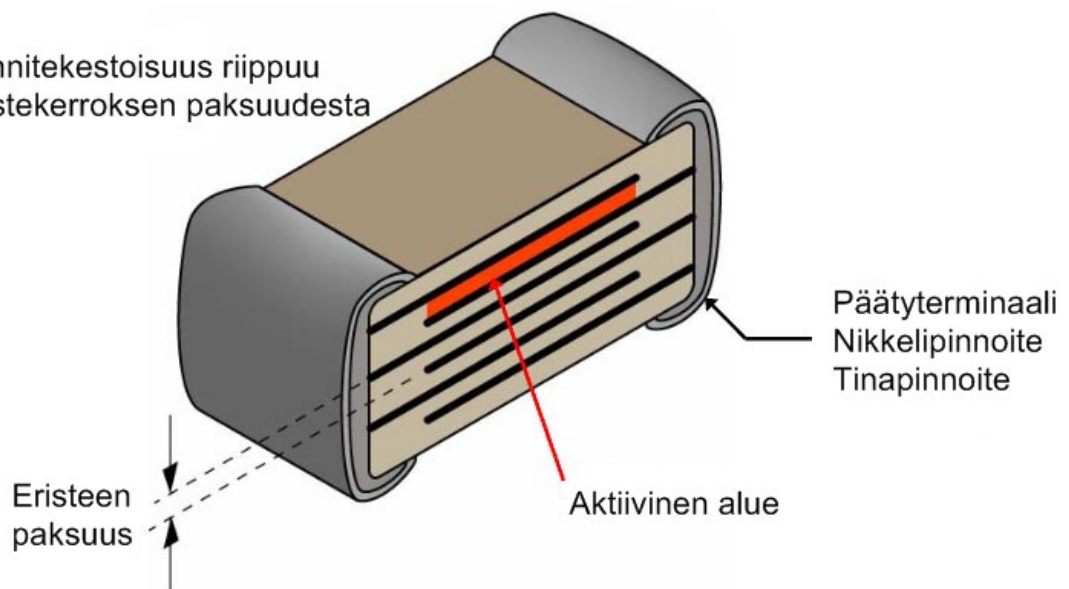
A on elektrodien pinta-ala

d on elektrodien välinen etäisyys.

Kaavassa 3 tyhjiön permittiivisyys $\varepsilon_0 = 8,854187817 \times 10^{-12}$ F/m. Suhteellinen permittiivisyys kuvaa aineen permittiivisyyden arvoa suhteessa tyhjiön permittiivisyyteen.

$$\text{Kapasitanssi} = \frac{\text{kerrosten lukumäärä} \times \text{eristevakio} \times \text{aktiivinen alue}}{\text{Eristeen paksuus}}$$

Jännitekestoisuus riippuu eristekerroksen paksuudesta



Kuva 1. MLCC:n läpileikkaus, jossa on havainnointi eristekerroksen vaikutusta kapasitanssiin. (1, s. 2.)

MLCC:n kapasitanssi määritellään seuraavan kaavan 4 mukaisesti:

$$C = \varepsilon_0 * \varepsilon_r * N * \frac{S}{d} \quad (4)$$

ε_0 on vapaan tilan eristevakio

ε_r on eristeaineen suhteellinen eristevakio

N on eristekerroksien lukumäärä

s on päällekkäin olevien elektrodien muodostama pinta-ala

d on eristekerroksen paksuus.

2.2 Kondensaattori DC- ja AC-virtapiirissä

Kondensaattorit käyttäytyvät eri tavalla DC- ja AC-piireissä. Staattisessa DC-piirissä kondensaattori käyttäytyy, kuin sen paikalla virtapiiri olisi poikki. Kun kondensaattoriin kytketään jännite, se alkaa varautua. Kytkeähetkellä piirissä kulkeva virta on teoriassa lähes äärettömän suuri, jonka jälkeen se laskee nopeasti kondensaattorin varautuessa (kuvio 1). Varautumisaikaa kuvataan kaavassa 5 aikavakiolla τ (tau), joka määrittää ajan, jolloin kondensaattori on varautunut kokonaiskapasiteetistaan 63 %. Tämän ajan jälkeen loput varautumisesta tapahtuu hitaammin. Kokonaisvarautumiseen kuluva aika on likimain viiden aikavakion pituinen hetki. Teoriassa kondensaattorin varauduttua, sen läpi kulkeva virta lakkaa, mutta todellisuudessa kondensaattorilla on aina jonkinlainen vuotovirta. Vuotovirran suuruus pienillä kondensaattoreilla on joitakin nano- tai mikroampeereja. Kun lähdejännite kytketään pois, kondensaattori alkaa syöttää piiriin siihen varautunutta sähköenergiaa. Purkautuessa kondensaattori toimii samalla periaatteella, kuin varautuessakin. Yhden aikavakion jälkeen kondensaattorin varauksesta on jäljellä 37 % ja viiden aikavakion jälkeen se on lähes täysin purkautunut. Kaavassa 6 esitetään kondensaattorin jännite U_c suhteessa aikaan.

$$\tau = R * C \quad (5)$$

R on piirin resistanssi

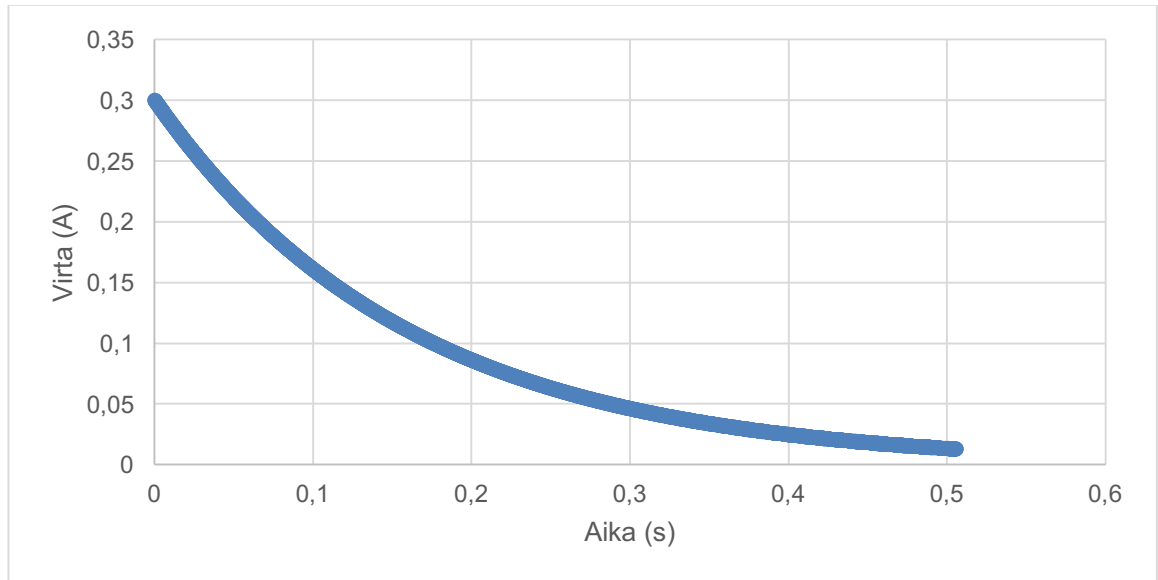
C on kondensaattorin kapasitanssi.

$$U_c = U * e^{\frac{-t}{RC}} \quad (6)$$

U_c on kondensaattorin jännite

U on lähdejännite

t on aika.



Kuvio 1. Havainnekuva latautuvan kondensaattorin virrasta ajan funktiona DC-virtapiirissä.

AC-virtapiirissä kondensaattorin läpi kulkee jatkuvasti virtaa, ja se saa aikaan virran ja jännitteen välisen 90 asteen vaihekulman. Vaihtovirtapiirissä kondensaattori tuottaa loistehoa, jota voidaan hyödyntää kompensoimaan induktiivisen kuorman aiheuttamaa loistehon kulutusta.

Vaihtovirtapiirissä kondensaattori latautuu ja purkautuu edestakaisin taajuuden mukaan. Kondensaattorissa kulkeva virta on suoraan verrannollinen vaihtojännitteen taajuuteen, kuten kaavassa 7 esitetään.

$$i_c = C \frac{du}{dt} \quad (7)$$

i_c on kondensaattorin virta ajanhetkellä t

C on kapasitanssi

$\frac{du}{dt}$ on jännitteen derivaatta ajan funktiona.

Staattisessa tilassa tasavirtapiirissä kondensaattorin läpi ei kulje virtaa. Tämä johtuu siitä, että kondensaattorin sisäinen resistanssi on lähes äärettömän suuri jännitteen taajuuden ollessa nolla.

Kaavasta 8 nähdään, että taajuuden f lähestyessä nollaa, reaktanssi X_C lähestyy äärettömyyttä. Toisaalta, mitä suuremmaksi taajuus kasvaa, sitä pienemmäksi kondensaattorin sisäinen resistanssi muuttuu.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (8)$$

X_C on kondensaattorin reaktanssi

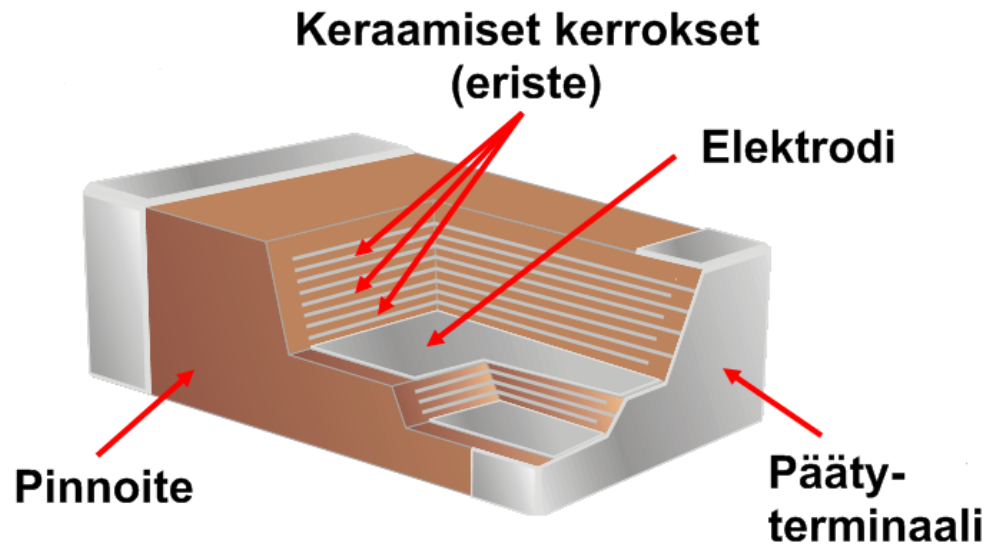
f on taajuus

C on kapasitanssi.

Vastaavasti AC-piirissä taajuus f vaikuttaa kondensaattorin reaktanssiin niin, että se on kääntäen verrannollinen taajuuteen nähden. Tämä tarkoittaa sitä, että taajuuden kasvaessa reaktanssi pienenee. Tätä ominaisuutta kutsutaan kapasitiiviseksi reaktanssiksi X_C .

2.3 MLCC:n rakenne ja materiaalit

Keraamiset monikerroskondensaattorit ovat yleensä rakenteeltaan keskenään samankaltaisia, vaikka ne ulospäin näyttäisivätkin hyvin erilaisilta. Perusrakenne koostuu kahdesta terminaalista, eli katodista ja anodista, joista molemmista lähtee metalliset elektrodit kondensaattorin sisälle. Elektrodit ovat toistensa suhteen lomittain siten, että joka toinen on yhteydessä katodiin, ja joka toinen anodiin. Elektrodien välissä on keraamisesta materiaalista valmistettua eristeainetta, joka tekee niistä galvaanisesti erotettuja (kuva 2). Keraamisissa kondensaattoreissa yleisesti käytetty eristeaine on bariumtitaanaatti (BaTiO_3). Yhdiste on epäorgaaninen aine, jossa titaani- ja happiatomit ovat liittyneet toisiinsa kovalenttisella sidoksella, ja bariumatomi näihin ionisidoksella. Bariumtitaanattimolekyylit muodostavat keskenään kidehilarakenteen, jossa ei ole juurikaan varauksenkuljettajia eli vapaita elektroneja. Tällainen molekyylirakenne on tyypillistä yhdisteille, joissa on ionisidoksia (esimerkiksi suolat), ja monet niistä ovat erinomaisia eristeitä. (1, s. 1–5; 2, s. 1–7.)



Kuva 2. MLCC:n läpileikkaus.

Eristeaineen kemiallista vakautta pyritään parantamaan seostamalla sitä lisäaineilla. Hyvin yleisesti tähän tarkoitukseen käytetty X7R-yhdiste sisältää muun muassa kalsium-zirkonaattia. Valmistusprosessissa on erittäin tärkeää varmistaa, ettei yhdisteisiin tule epäpuhtauksia kuten alumiinia, rautaa tai natriumia, sillä näiden on osoitettu edesauttavan sähköisten vikojen muodostumista eristeaineessa. (3, s. 3–5.)

MLCC:n eristeaineiden valmistusprosessissa käytetään RE-yhdisteitä (eli harvinaisia maametalleja sisältäviä aineita) bariumtitanaatin seostusaineena. Seostetussa eristeaineessa voidaan havaita happivakanssien ja seostusaineiden kertyneen BaTiO_3 -rakeiden rajapinnoille, muodostaen niin sanottuja kyllästysalueita (depletion layers). Kertymistä tapahtuu bariumtitanaatin sintrausprosessin aikana, kun hienojakoinen bariumtitanaattijauhe puristetaan yhtenäiseksi kiinteäksi aineeksi korkeassa lämpötilassa. Kyllästysalueet ovat voimakkaasti resistiivisiä, ja niiden on todettu toimivan esteinä happivakanssien kulkeutumiselle eristeaineen sisällä. Pientämällä eristeaineen raekoko saadaan enemmän rajapintoja ja parempi este happivakanssien kulkemiseksi. (3, s. 2–4; 4, s. 1.)

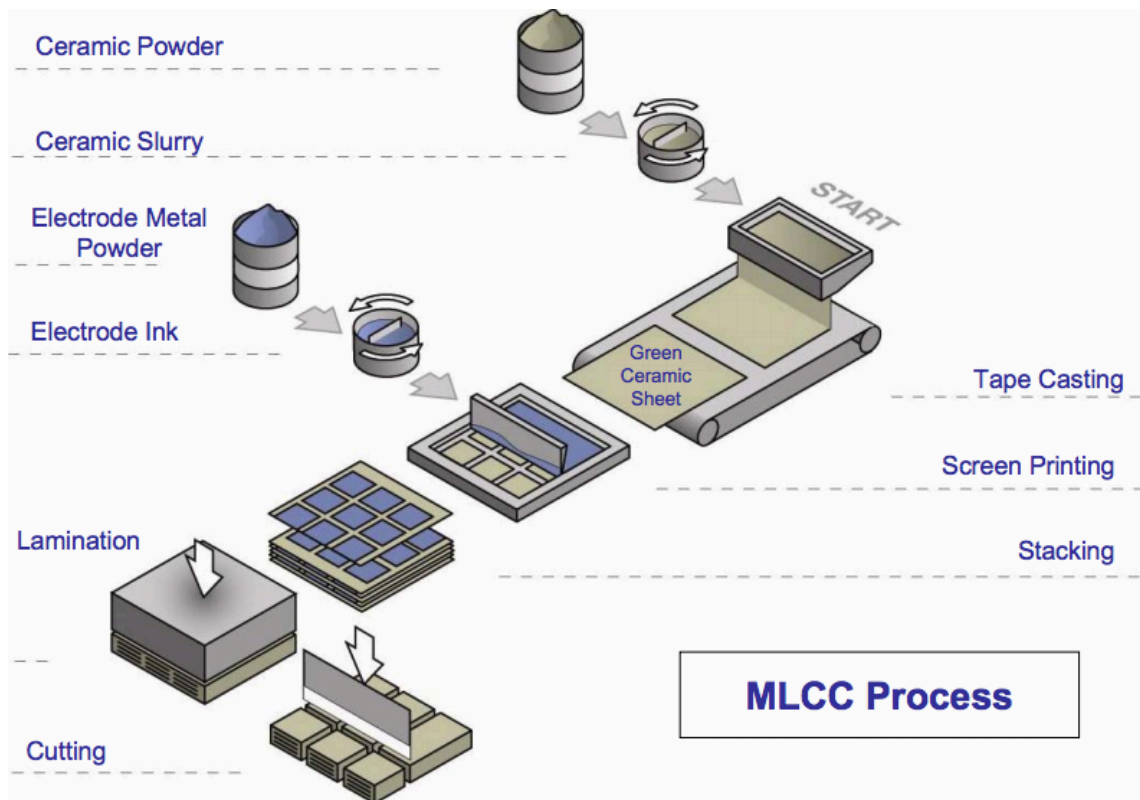
Raekolla on kuitenkin toinenkin merkitys MLCC:n toiminnan kannalta, nimittäin mitä suurempi raekoko, sitä suurempi permittiivisyys eristeaineelle muodostuu. Toisin sanoen, mitä suuremmaksi raekoko saadaan, sitä vahvemiksi kondensaattorin kapasitanssi muuttuu. Reakoon ja permittiivisyyden välille on löydettävä sopiva suhde, jotta

kondensaattorista saadaan ominaisuuksiltaan ja arvoiltaan sopiva. Useissa tutkimuksissa on saatu tuloksia siitä, että kun raekokoa pienennetään tietyn rajan alle, sen suhteellinen permittiivisyys alkaa pienentyä voimakkaasti. Tämä johtuu siitä, että BaTiO_3 alkaa menettää ferrosähköisiä ominaisuuksiaan raekoon pienentyessä tarpeeksi paljon. Jännitekestoisuuden ja kapasitanssin välillä on riippuvuus, jota pyritään optimoimaan bariumtitanaattirakeen eri osien (core, shell, boundary) välisellä suhteella. Bariumtitanaattiydin (core) antaa eristeelle korkean permittiivisyyden ja kapasitanssin. Kuoriossa (shell) ja rajapinta (boundary) antavat eristeelle korkean jännitekestoisuuden. Pienet rakeet eristeaineessa luovat suuren määrän rajapintaa, mikä estää happivakanssien kulkeutumista ja aikaansaa hyvän jännitekestoisuuden. Kun taas ydin on suuri suhteessa kuoreen ja täten rajapintaan, muodostuu suuri kapasitanssi. Hyvän jännitekestoisuuden ja kapasitanssin yhdistelmä voidaan saavuttaa pitämällä ytimen koko suurena suhteessa kuoreen ja rajapintaan, kuitenkin pitäen kokonaisraetilavuus mahdollisimman pienenä. (1, s. 2.)

MLCC:n elektrodit valmistetaan hyvin johtavasta metallista tai seoksesta, jolla on korkea sulamispiste. Materiaalin tulee olla sellaista, ettei se reagoi muiden aineiden kanssa. Aikaisemmin käytettiin paljon palladiumia, mutta sen ollessa melko arvokas metalli, on sittemmin siirrytty käyttämään hopeaa sekoitettuna muihin metalliseoksiin. Hopea kuitenkin alentaa elektrodin sulamispistettä, mitä ei toivottaisi tapahtuvan. Nykyisin joissain tapauksissa käytetään edullisia nikkelpohjaisia metalliseoksia elektrodien valmistamiseen, huomioiden kuitenkin nikkelin herkkä hapettumiskyky. Tästä syystä nikkelin käyttö elektrodeissa on jossain määrin ongelmallista. (3, s. 4.)

2.4 Keraamisten kondensaattorien valmistus

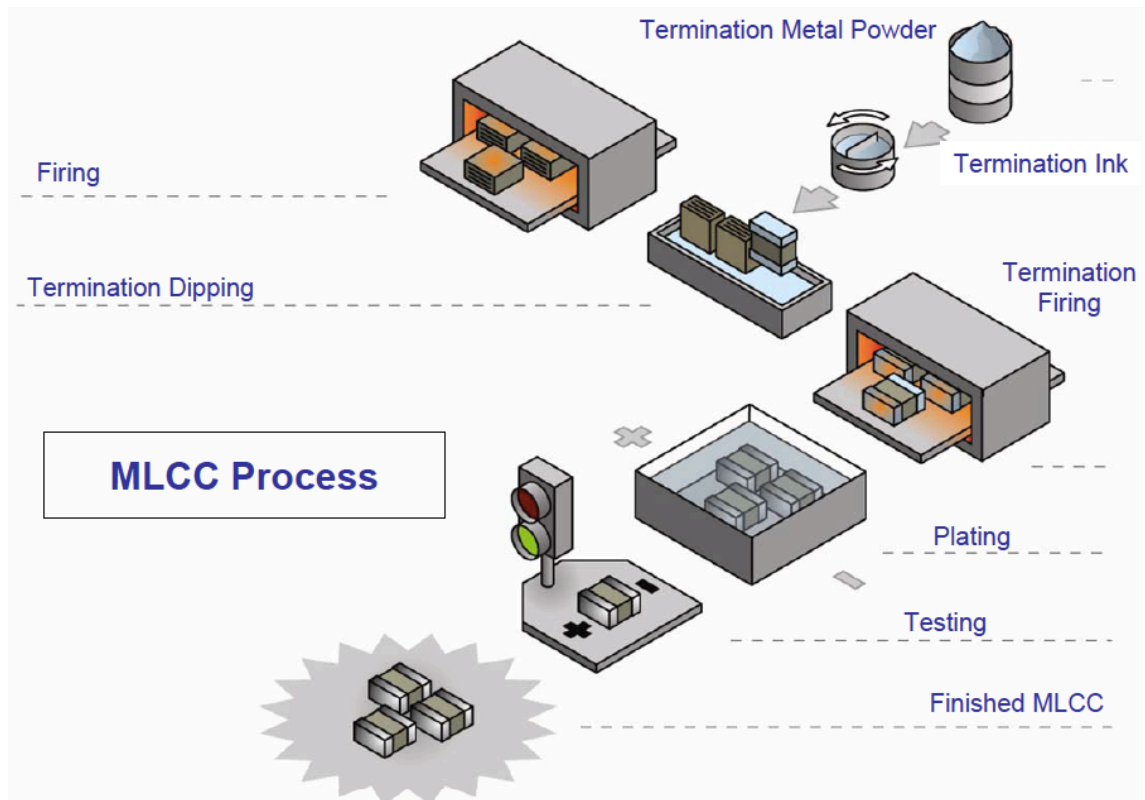
Keraamisen kondensaattorin valmistusprosessi alkaa keraamisen eristeaineen valmistamisella. Keraaminen jauhe sekoitetaan liuottimen ja sideaineiden kanssa, joista muodostuu liete. Tämän jälkeen liete valutetaan kuljetinhihnalle, ja se johdetaan kuivausuuhiin. Valmis tuote on kuiva ja nauhamainen keraaminen säie. Siitä leikataan erikokoisia paloja, riippuen valmistettavan kondensaattorin mitoista (kuva 3). Nauhan paksuudella on merkitystä kondensaattorin jännitekestoisuuteen siten, että paksu eriste kestää suuremman jännitteen kuin ohut. (5, s. 4–5.)



Kuva 3. Keraamisen kondensaattorin valmistusprosessin alkuvaiheet. (5, s. 4.)

Elektrodien valmistus aloitetaan tekemällä metallimustetta metallijauheesta, keraamisesta materiaalista sekä liuottimesta. Tästä musteesta käytetään nimitystä elektrodimuste. Elektrodimuste painetaan aiemmin leikattujen keraamisten palojen päälle muotin avulla. Samaa toistetaan niin kauan, kunnes on saatu valmistettua haluttu määrä eristelektrodilevyjä, minkä jälkeen ne kasataan päällekkäin ja puristetaan yhteen. Tätä prosessia kutsutaan laminoinniksi. Laminoinnin tuloksena syntyy palkki, joka viimeistellään leikkaamalla se oikean kokoiseksi, puolivalmiiksi kondensaattoriksi. (5, s. 4–5.)

Leikatut palkit kuljetetaan seuraavaksi sintrattavaksi polttouuniin, jolloin niiden kiderakenteet sulautuvat toisiinsa muodostaen yhtenäisen ja kiinteän rakenteen (kuva 4). Lämpötilalla on tässä prosessissa hyvin merkittävä rooli, ja sitä kontrolloidaan hyvin tarkasti koko sintrausprosessin ajan. Komponenttivalmistajilla on omat salaiset reseptinsä, joilla saadaan luotua halutun laisia ominaisuuksia komponentin rakenteeseen. (5, s. 4–5.)



Kuva 4. Keraamisen kondensaattorin valmistusprosessin loppuvaiheet. (5, s. 5.)

Sintrauksen jälkeen valmistetaan päätyterminaalien massa metallijauheesta, liuottimesta ja lasisulatteesta. Lämpöuunista tulleet monikerroksiset palat kastetaan tähän massaan, jonka jälkeen ne viedään uudelleen poltettavaksi uuniin. Viimeisenä kondensaattori päällystetään elektrolyysillä, eli galvanoidaan sen pintaan nikkeli- ja tinakerros (kuva 4). Tina toimii nikkelin hapettumisen suojana, sekä auttaa kondensaattorin juottamista lopullisen piirilevyn pinnalle. Lopuksi valmiit kondensaattorit testataan ja lajitellaan kapasitansseittain, jonka jälkeen ne ovat valmiita lähtemään myytäväksi eteenpäin. (5, s. 4–5.)

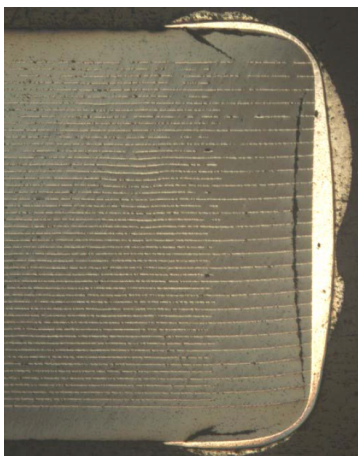
2.5 Yleisimmät vikaantumismekanismit

Keraamisen kondensaattorin vikaantumismekanismia on paljon, ja ne voivat olla yhteydessä toisiinsa. Yksi vikaantumiselle altistava tekijä saattaa edesauttaa toisen tekijän syntymistä. Vikaantumismekanismit voidaan karkeasti jakaa seuraaviin luokkiin:

- Silmin nähtävät fyysiset viat
- Lämpölaajenemisen aiheuttama rasitus
- Mekaanisen rasituksen aiheuttamat vauriot
- Kemiallisten tekijöiden aiheuttamat muutokset (happivakanssien siirtyminen)
- Sähköisten ominaisuuksien muutokset (eristeineen haurastuminen). (6, s. 1.)

Nathan Blattau ja Craig Hillman esittävät tutkimuksessaan (6, s. 1), että silmin nähtävän vian syynä on yleensä niin kutsuttu tyhjä alue (void) eristeessä, joka muodostuu valmistusprosessin yhteydessä. Sekä orgaaniset että epäorgaaniset vierasaineet keraamisessa jauheessa muodostavat polttovaiheessa ilmataskuja eristeineeseen. Nämä tyhjäät alueet saavat aikaan eristeineen halkeamisen valmistuksessa jäähtymisen aikana. Tämän tyyppiset halkeamat alkavat yleensä elektrodin reunalta, levittyen elektrodien suuntaisesti eteenpäin. (6, s. 1.)

Lämpölaajenemiseen liittyvä vikaantuminen aiheutuu liian nopeasta lämpötilan muuttumisesta, jolloin kondensaattorin rakenteet jäähtyvät tai lämpenevät eri kohdista ja eri aikaan. Tästä johtuen komponenttiin kohdistuu sisäisesti jännitteitä, jotka voivat saada eristeineen halkeamaan tai irtoamaan elektrodien pinnasta (kuva 5). Tämän tyyppinen vikaantumismekanismi ei välttämättä aiheuta kondensaattorin täydellistä hajoamista välittömästi, vaan käytön aikana halkeama alkaa levitä, kunnes se katkaisee elektrodit irti terminaalista. Lämpölaajenemisen aiheuttamat halkeamat esiintyvät yleensä juuri terminaalien lähetyillä tai keraamisen aineksen ja terminaalin liitoskohdassa. (6, s. 1–2.)



Kuva 5. Esimerkki lämpölaajenemisen aiheuttamasta MLCC:n vikaantumisesta. (6, s. 6.)

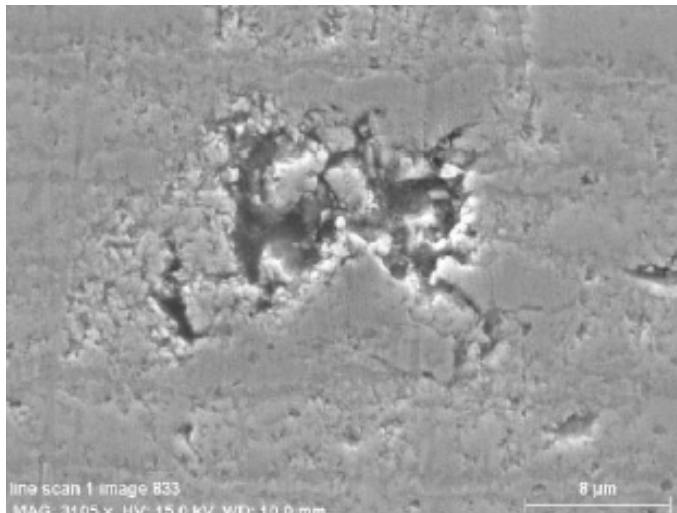
Mekaanisen rasituksen aiheuttamia vikoja ovat esimerkiksi taivutuksesta johtuvat murtumat. Taivutusmurtumia esiintyy, kun piirilevyyn kohdistuu liian suuria taivuttavia voimia. Tällaiset vikaantumiset tapahtuvat useimmiten piirilevyjen irrotuksen ja huoltotapah- tumien yhteydessä. Tämä vikatyyppe aiheuttaa runsaasti laitteiden asiakaspalautuksia kaikessa nykyajan elektroniikassa. (6, s. 3.)

Tässä työssä keskitytään pääasiassa tutkimaan eristeläpilyönnistä aiheutuvaa vikaantu- mista, ja siinä merkittävimmät syyt ovat kemiallisten ominaisuuksien muuttuminen, sekä eristeresistanssin haurastuminen lämmön vaikutuksesta. Kuitenkin merkittävin vikaantu- miselle altistava tekijä on kondensaattorin eristeessä olevat happivakanssit, jotka ke- rääntyvät yhteen muodostaen laajoja alueita komponentin vanhentuuessa. Vakanssilla tarkoitetaan kidehilarakenteessa olevaa aukkoa, josta puuttuu atomi tai ioni. Tässä yh- teydessä bariumtitanaattimolekyylien happiatomit ovat siirtyneet paikaltaan. Happiva- kanssit aiheuttavat eristeaineessa eristyskyvyn heikkenemistä. Mitä suuremmiksi alu- eiksi ne kerääntyvät, sitä todennäköisempää on komponentin vikaantuminen. (4, s. 1– 6.)

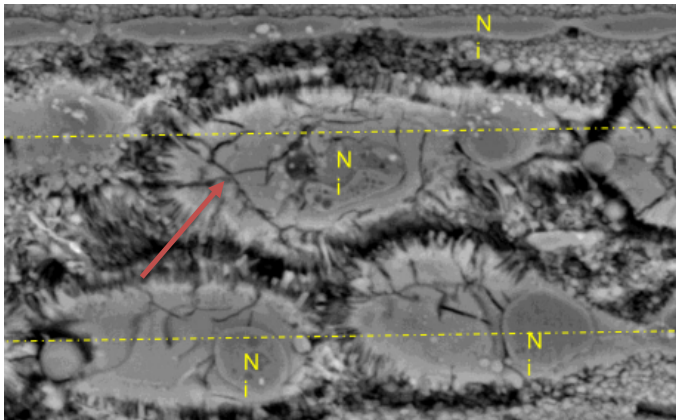
Happivakansseilla on taipumus kulkeutua eristeen kiderakenteessa kohti reunoja. Mikäli happivakanssi pääsee eristeen ja elektrodin rajapinnalle, on erittäin todennäköistä, että komponentti vikaantuu hyvin nopeasti. Kun happivakanssi on saavuttanut elektrodin, al- kaa katodilta virtaamaan elektroneja paikkaamaan syntynyttä epätasapainotilaa. Tästä aiheutuu elektronien pakkautumista pienelle alueelle, mikä aiheuttaa stoikiometrisen muutoksen eristeen molekyyli- rakenteeseen. Samalla eristeen läpi pääsee entistä enem- män vuotovirtaa, joka alkaa lämmittää ympäristöään. Tämä tapahtumaketju kiihdyttää itse itseään, ja lopulta lämpötilan ja sähkövirran vaikutuksesta Ni-BaTiO₃-rajapinta ha- joo ja aiheuttaa läpilyönnin. (4, s. 8.)

2.5.1 Eristeläpilyönnin vaikutukset ja vikajälki

Eristeläpilyönnissä sähkövirran aiheuttama kuumuus polttaa eristeen rikki, jolloin sähkö- virta pääsee kulkemaan vapaasti elektrodien välillä. Läpilyönnin aiheuttama vikaantumi- nen saattaa tuhota kondensaattorin rakenteen erittäin pahasti (kuva 6), jolloin sen vika- kohdan löytäminen jälkikäteen on lähes mahdotonta. Vika-analyysiä kuvan pohjalta teh- täessä, vaaditaan elektronimikroskooppi, jotta päästään tarpeeksi suureen suurennok- seen. Kondensaattorissa, joka ei ole täysin tuhoutunut, on usein havaittavissa eristeessä oksamaisia halkeamia (dendritic growth), jotka leviävät vian edetessä (kuva 7).



Kuva 6. Elektronimikroskooppikuva jänniteläpilyönnin rikkomasta MLCC:n eristeestä. (1, s. 10.)



Kuva 7. Vikaantuneen MLCC:n eristeessä näkyviä oksamaisia halkeamakasvustoja.

2.5.2 Eristeläpilyönnin fysikaalinen perusta

Eristeläpilyönti on pääsyy MLCC:n vikaantumiselle, jonka aiheuttaa eristeiden hajoaminen. Läpilyöntiä ennakoii itseään kiihdyttävä prosessi, jossa eristeiden vuotovirrat aiheuttavat lämpenemistä ja täten eristeiden vanhenemista, kun sen ominaisuudet heikkenevät hiljalleen. Lopulta, kun eriste on vanhentunut ja tullut elinikänsä päähän, vuotovirran määrä on kasvanut kriittiseen pisteeseen, ja syntyy läpilyönti elektrodien välillä, eristeiden pettäessä lopullisesti. Tästä ilmiöstä käytetään termiä Avalanche effect eli suomennettuna lumivyöryilmiö. (1, s. 1-11.)

2.5.3 Eristeläpilyönnille altistavat rakenteelliset tekijät

Kemiallisten tekijöiden osuus MLCC:n vikaantumiseen on merkittävässä roolissa. Yhdet merkittävimmistä kemiallisista vaikuttajista ovat eristeaineena käytetyn bariumtitanaatin muodostamassa kidehilassa olevat happivakanssit. Happivakanssien syntyyn vaikuttaa eristeainekerroksen rajapinta, bariumtitanaatin raekoko sekä elektrodien rajapinnat. (4, s. 1.)

Aikaisemmin MLCC:n elektrodien valmistuksessa käytettiin jalometalleja (PME eli Precious Metal Electrode), mutta nykyään on siirrytty käyttämään perusmetalleja (BME eli Base Metal Electrode). Valmistusprosessin kuumennusvaiheessa pyritään välttämään metallien hapettumista vähentämällä ilman määrää prosessiympäristössä. Hapettueensa BME-pohjaiset elektrodit kaappaavat helposti eristeaineelta happiatomeja, luoden eristeeseen happivakansseja. Bariumtitanaatin rakeiden rajapintojen on todettu hidastavan happivakanssien kulkeutumista, mistä voidaan todeta raekoolla, ja siten rajapintojen määrällä, olevan merkittävä osuus tässä tapahtumaketjussa. Eristeresistanssin haurastumisen vaikutukset alkavat näkyä suhteessa aikaan, sähkökenttään ja lämpötilaan. (4, s. 1.)

2.6 Elektroniikan luotettavuus

Elektronisten komponenttien luotettavuus kuvaa, kuinka varmasti ja pitkään ne toimivat niille suunnitelluissa käyttökohteissa ja olosuhteissa. Nykyajan elektroniikkapiirit ovat usein hyvin monimutkaisia ja haastavia tutkittavia vikatilanteiden ilmentyessä. Tästä syystä on entistä tärkeämpää, että komponenttien luotettavuus on kiitettävällä tasolla. Elektroniikan suunnittelussa luotettavuuden varmistaminen on entistä haastavampaa, sillä komponenttien jatkuvan kehityksen myötä pyritään entistä tehokkaampiin ratkaisuihin, samalla pienentäen komponenttien kokoa, jolloin niiden luotettavuus usein kärsii.

2.7 MLCC:n luotettavuus

Pääsääntöisesti MLCC on erittäin luotettava ja kestävä elektroniikan komponentti. Viime vuosien aikana tapahtunut nopea kehitys valmistustekniikassa ja materiaalien käsitte-

lyssä on tuonut kuitenkin uusia huolenaiheita komponenttien ennenaikaisten vikaantumisten vuoksi (early failures). Komponenttivalmistajat ilmoittavat kaavan 9 MLCC:n luotettavuuden laskemiseksi:

$$\frac{L_0}{L_T} = \left(\frac{V_t}{V_0}\right)^X * \left(\frac{T_t}{T_0}\right)^Y \quad (9)$$

L_0 on elinikä

L_t on testi-ikä

V_t on testijännite

V_0 on käyttöjännite

T_t on testilämpötila

T_0 on käyttölämpötila

X ja Y on jännitteen ja lämpötilan aiheuttama vaikutus.

Kaavan eksponentit X ja Y määritellään siten, että jännitteen vaikutus X on tyypillisesti noin kolme ja lämpötilan vaikutus noin kahdeksan. (7, s. 51.)

Elektroniikan komponenttien, kuten MLCC:n, eliniän määrittämiseksi on kehitetty Prokopowicz ja Vaskas -yhtälö, johon on yhdistetty Weibull-jakauman ja Arrheniuksen mallin kaavat (6. s. 4; 8. s. 37):

$$\frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^n e^{\left(\frac{E_a}{K_B} * \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right)} \quad (10)$$

Prokopowicz ja Vaskas -yhtälö, jossa

t on aika

U on jännite

n on jännitteen eksponentti

E_a on aktivointienergia

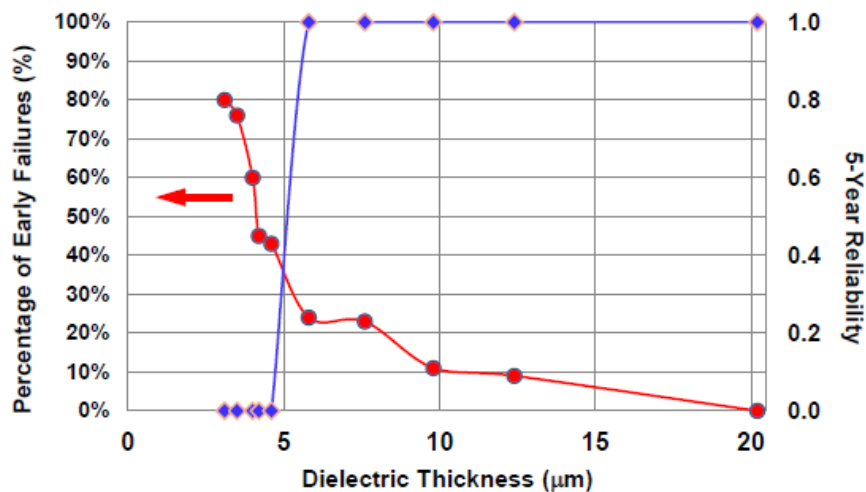
K_B on Boltzmanin vakio ($8,62 \times 10^{-5}$ eV/K)

T on lämpötila Kelvin-asteina.

Yhtälöllä 10 voidaan määrittää komponentin elinikä ALT-testien antamista tuloksista. Siihen vaaditaan se, että vähintään kahdessa testauksessa jännitteen tai lämpötilan on oltava yhteneväiset. Yhtälöstä ratkaistaan sekä eksponentti n että aktivointienergia E_a , jonka jälkeen niitä hyödyntäen voidaan määrittää komponentin laskennallinen elinikä t_2 .

Keraamiset monikerroskondensaattorit ovat tyypillisesti hyvin luotettavia ja pitkäikäisiä komponentteja. Niillä esiintyy kuitenkin käyttöiän alkupäässä ennenaikaisia vikaantumisia, jotka näkyvät kuluttajalle yleensä laitteiden vikaantumisena. Vikaantunut komponentti voi joskus olla hyvinkin vaikea paikantaa, varsinkin jos kohteessa on satoja, tai jopa tuhansia komponentteja. Tämän vuoksi on tärkeää tiedostaa mahdollinen vikaantumisalttius ja pyrkiä valitsemaan mahdollisimman tasalaatuisia kondensaattoreita käyttökohteisiin.

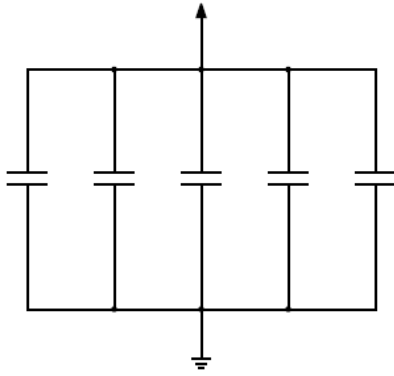
Tilavuushyötysuhteen viimeaikainen voimakas kehittyminen on heikentänyt MLCC:n luotettavuutta. Niissä ilmenee yhä enemmän ennenaikaisia vikaantumisia, ja ensimmäiselinikä on laskenut huomattavasti. Merkittävin vaikuttaja tähän on eristekerroksen oheneminen paremman tilavuushyötysuhteen tavoittelussa. Tutkimukset ovat osoittaneet, että eristekerroksen pientyessä alle $6\ \mu\text{m}$, vikaantumisia alkaa tapahtua kiihtyvällä tahdilla (kuvio 2). (1, s. 9.)



Kuvio 2. Kuvaaja eristekerroksen paksuuden vaikutuksesta eliniän ennusteeseen. (1, s. 9.)

2.7.1 Luotettavuuden mallintaminen

MLCC:n luotettavuuteen vaikuttaa muun muassa elektrodi-eristekerroksien määrä. Jokaisen kerroksen voidaan ajatella olevan yksittäinen kondensaattori, ja nämä kerrokset ovat ikään kuin rinnankytkettyjä, muodostaen yhden kokonaisuuden (kuva 8). MLCC:n kapasitanssi voidaan ilmaista myös summaamalla jokaisen kerroksen kapasitanssit yhteen. (1, s. 3.)



Kuva 8. MLCC:n ekvivalenttinen sijaiskytkentä.

MLCC:n luotettavuudelle on mahdollista esittää kaava 11, jossa R kuvaa luotettavuutta.

$$R_t = R_1 * R_2 * R_3 \dots * R_i \dots * R_N = R_i^N \quad (11)$$

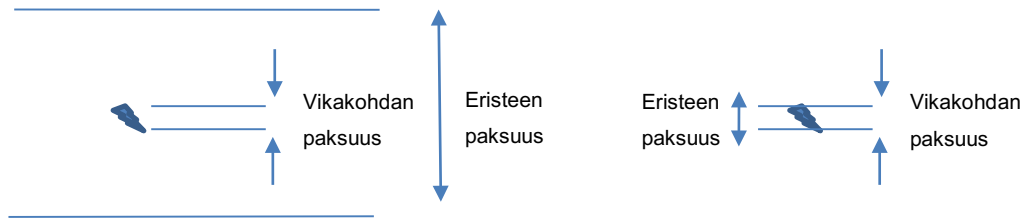
Kaavassa kerrotaan jokaisen MLCC:n kerroksen luotettavuus keskenään. Tästä nähdään, että jokainen lisätty kerros heikentää komponentin luotettavuutta eksponentiaalisesti. (1, s. 3.)

Yleensä eristeaine voi kestää jopa tuhansia vuosia, mutta pienikin heikkous yhdessä eristekerroksessa aiheuttaa MLCC:n luotettavuuden rajun heikkenemisen. Taulukossa 1 on esitetty luotettavuuslukuja kondensaattoreille, joilla on eri määrät eristekerroksia.

Taulukko 1. Laskettuja luotettavuuslukuja MLCC:n viiden vuoden eliniälle, eri kerrosmäärillä N . Mukaelma taulukosta (1, s. 4.)

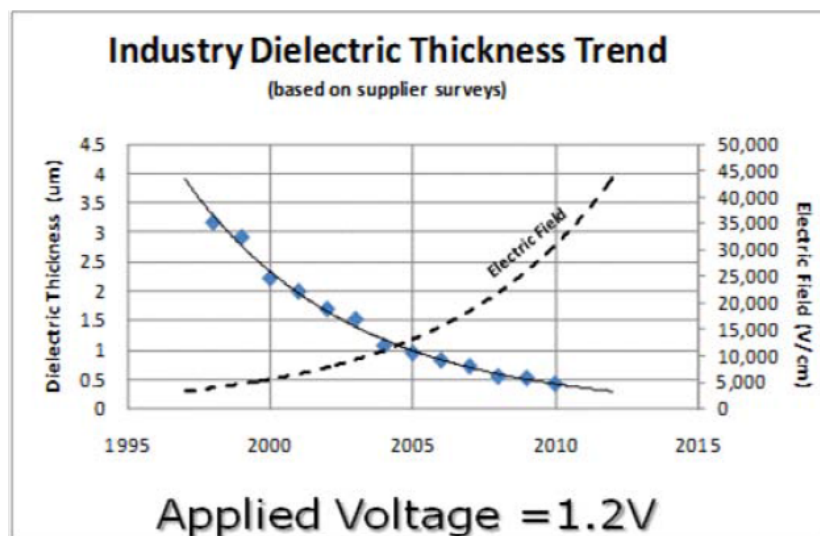
R_i (5 vuotta)	R_i (5 vuotta) $N=20$	R_i (5 vuotta) $N=200$	R_i (5 vuotta) $N=500$
0,99999	0,99980	0,99800	0,99501
0,99990	0,99800	0,98020	0,95123
0,99900	0,98019	0,81865	0,60638
0,99000	0,81791	0,13398	0,00657

Taulukon luvuista nähdään, miten voimakkaasti MLCC:n luotettavuus heikkenee kerrosten lisääntyessä, etenkin jos yhden kerroksen luotettavuus on heikentynyt edes hieman. Tätä voi havainnollistaa siten, että jos eristeessä oleva virheellinen kohta on lähes yhtä paksu kuin eriste itse, tulee vika ilmi melko todennäköisesti hyvin nopeasti. Jos vika-alue on vain murto-osan koko eristeen paksuudesta, sillä ei ole niin merkittävää vaikutusta eristeen kestävyteen (kuvio 3).



Kuvio 3. Vikakohtaan vaikutus suhteessa eristeen paksuuteen.

Luotettavuuden heikkenemiseen vaikuttaa se, että komponenteista halutaan tehdä entistä pienempiä ja parempia tilavuushyötysuhteeltaan. Tästä johtuen eristekerrosta joudutaan ohentamaan entisestään, jolloin eristeeseen kohdistuva sähkökenttä on entistä suurempi. Kuviossa 4 havainnollistetaan tätä sähkökentän voimakkuuden kasvua suhteessa eristekerroksen paksuuteen. Kuvioista käy myös ilmi muutoksen kehitys vuosien aikana.



Kuvio 4. Kuvaaja MLCC:n eristekerroksen vaikutuksesta sähkökenttään. (1, s. 5.)

2.7.2 Kiihdytetty elinikätestaus

Kiihdytetyssä elinikätestauksessa komponentti altistetaan voimakkaasti ylijännitteelle ja se asetetaan erittäin kuumaan ympäristöön. Testissä pyritään kiihdyttämään vanhenemista niin paljon kuin mahdollista, jotta saadaan tuloksia nopeasti. Kiihdytys pitää kuitenkin olla hallittu, jotta vikamekanismit eivät lähde muuttumaan. MLCC:n testauksessa lämpötilalla pyritään aiheuttamaan eristemateriaalin vanhenemista. Lämpötila kiihdyttää

aineen molekyylien atomien liikettä, jolloin erilaiset reaktiot pääsevät tapahtumaan nopeammin kuin alemmassa lämpötilassa. Testauksessa käytetyllä ylijännitteellä pyritään nopeuttamaan eristeläpilyönnin syntyminen. Testauksen tuloksista voidaan päätellä komponentin laskennallinen elinikä, eritellä testinäytteet hajoamisajankohdan mukaan sekä päätellä niiden vikamekanismit.

Tässä työssä käytettiin erittäin voimakasta kiihdytystä jännitteen ollessa suurimmillaan, jopa kuusikertainen komponentin nimellisjännitteeseen verrattuna. MLCC on siinä suhteessa helppo komponentti testata, että se kestää suuriakin ylijännitteitä. Useille muille komponenteille ei voitaisi suorittaa näin rajua kiihdytystä, mutta keraamisille kondensaatoreille se sattuu sopimaan hyvin.

2.7.3 Kiihdytysmallit

Yleisesti käytettyjä kiihdytysmalleja ovat ALT ja HALT. ALT-testauksessa komponentin vanhenemista kiihdytetään voimakkaasti tasaisessa lämpötilassa ja ylijännitteessä. HALT-testissä rasiustasoa nostetaan testin edetessä ja tarkastellaan vikaantuneiden komponenttien määriä kyseisessä rasiustasossa. Tässä työssä käytettiin ALT-menettelmää, jolla pyrittiin aikaansaamaan halutunlainen vikamekanismi.

2.7.4 Luotettavuustestidatan analysointi

Yksi yleisimmin hyödynnetyistä menetelmistä elektronisten komponenttien eliniän mallintamisessa on niin sanottu Weibull-jakauma. Aikaisemmin käytettiin Weibull-paperia, johon mittaustulokset merkitään käsin. Laskennalliset arvot saadaan piirtämällä paperille suorita, hyödyntäen mittauspisteitä ja lukemalla paperin asteikkoa. Tietokoneiden kehityksen myötä Weibull-jakauma pystytään nykyään määrittämään laskennallisesti siihen suunniteltujen ohjelmistojen avulla. (9, s. 78–84.)

Weibull-jakauma kahdella parametrilla määritellään kaavassa 12 ajan funktiona.

$$f(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (12)$$

t on aika

β on Weibull-kulmakerroin

η on aika, jolloin 63,2 % näytteistä on hajonnut.

Weibull-jakaumasta on olemassa myös kolmen parametrin esitysmuoto (kaava 13).

$$f(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (13)$$

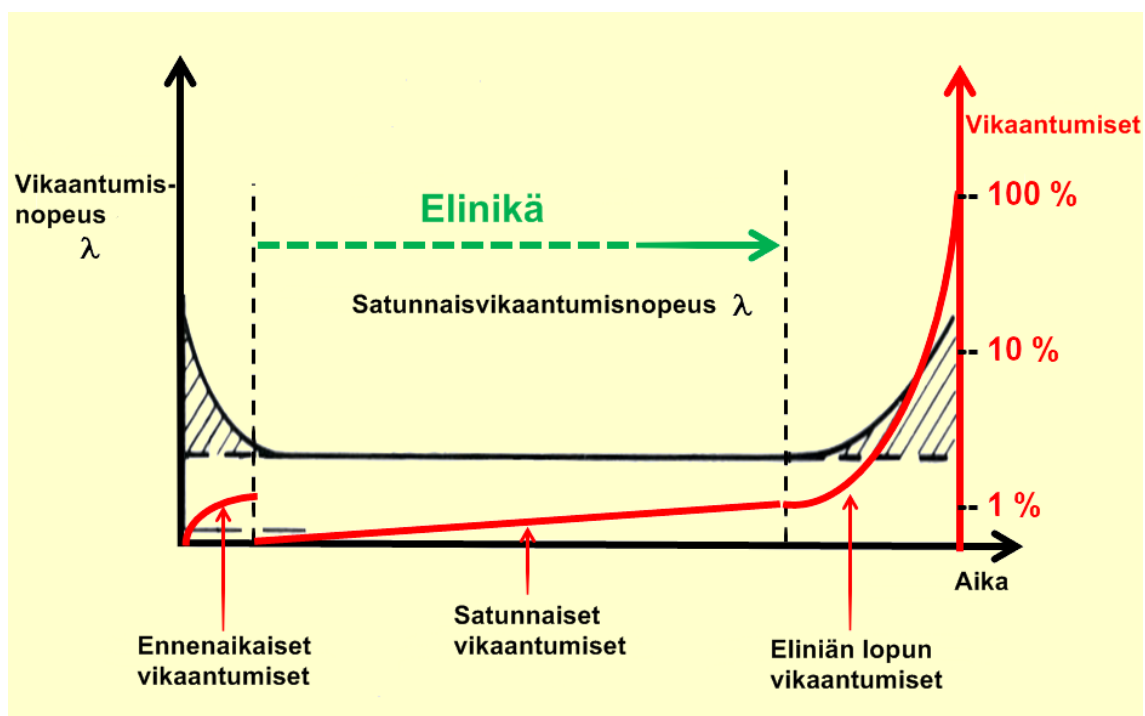
t on aika

β on Weibull-kulmakerroin

η on aika, jolloin 63,2 % näytteistä on hajonnut

γ on oletettu vähimmäiselinikä.

Edellä mainittuja kaavoja käyttäen pystytään määrittämään β eli Weibull-kulmakerroin. Kun kulmakerroin on suuri, vikaantumisia tapahtuu usein. Pieni kulmakerroin ilmentää vikaantumisten tapahtuvan harvoin. Weibull-kulmakerroin on suoraan yhteydessä niin kutsuttuun kylpyammekäyrään (kuvio 5). Kylpyammekäyrä kuvaa vikaantuneiden näytteiden määrän eliniän aikana. Weibull-jakauman β kuvaa näytteiden vikaantumistahtia testin aikana. Kun tätä verrataan kylpyammekäyrään, nähdään, että β :n arvon ollessa alle yhden, kyseessä on pian käyttöönoton jälkeen tapahtuva vikaantuminen (Early failure). Kun β on likimain yksi, sillä kuvataan hyödyllisen käyttöiän (Useful life) aikana tapahtuvaa vikaantumista. β :n arvon ollessa reilusti yli yhden, sillä kuvataan tuotteen normaalin eliniän päättyessä tapahtuvaa vikaantumista (Wear-out). Vikaantumisia tapahtuu eniten eliniän alkuvaiheessa sekä käyttöiän loppupäässä normaalin ikääntymisen vuoksi. (10, s. 78–84; 9, s. 81–89.)



Kuvio 5. Kylpyammekäyrä, jossa vasemmassa reunassa ennenaikaiset vikaantumiset, keskellä satunnaiset käyttöajan vikaantumiset ja oikealla eliniän loppupuolella tapahtuvat vikaantumiset.

2.8 Kokeellisen osuuden perustelu

Testin tavoitteena oli aiheuttaa kondensaattoreille jänniteläpilyönnistä aiheutuva vikaantuminen. Se toteutettiin kiihdyttämällä kiihdytysmallia, jossa lämpötila ja jännite olivat moninkertaisesti normaalia käyttöympäristöä suuremmat. Jänniteläpilyönnin tiedetään johtuvan pääasiassa eristeen heikkenemisestä, joten tavoite oli saada tämä ilmiö aikaiseksi. Eristeaineen haurastumista voidaan nopeuttaa kuumassa lämpötilassa, ja kun tähän vielä lisätään moninkertainen ylijännite, saadaan läpilyönti aikaiseksi jo eristeen osittaisella haurastumisella.

3 Työn vaiheet

3.1 Piirilevyn suunnittelu

Työ aloitettiin testipiirin suunnittelulla ja se toteutettiin käyttämällä PADS-suunnitteluohjelmistoa. Suunnittelu alkoi mahdollisten toteutustapojen läpikäynnillä sekä erilaisten ideoiden miettimisellä. Piirin suunnittelun alkuvaiheessa pohdittiin komponenttivalintoja ja mitoituksia. Piirin toimivuuden varmistamiseksi apuna käytettiin LTSpice-ohjelmistoa sähköisen piirin simuloimiseksi.

Testiin otetut kondensaattorit olivat kaikki samansuuruisia kapasitanssiarvoltaan ja jännitekestoisuudeltaan, 10 μF ja 25 V, sekä koteloinniltaan 1210-kokoluokkaa ja X7R-eristetyypisiä. Komponenttien mitoitus tehtiin käyttäen yleisiä tasavirtapiirien laskentamenetelmiä ja kaavoja.

Yleisiä käytettyjä kaavoja (14–17) komponenttien mitoittamisessa:

$$U = RI \quad (14)$$

$$P = UI \quad (15)$$

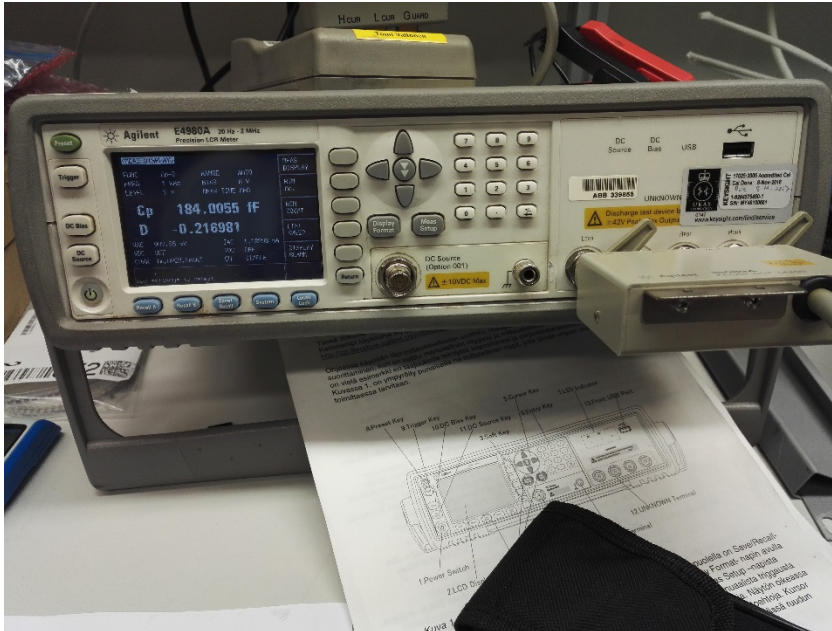
$$E = \int_0^t e^{-\frac{t}{RC}} dt \quad (16)$$

$$I_C = \left(\frac{U}{R}\right) * e^{-\frac{t}{RC}} \quad (17)$$

Piirilevysuunnitteluun kuului myös sopivien komponenttien etsiminen ABB:n omasta komponenttikirjastosta. Kirjastoon kuulumattomien komponenttien käyttöä tuli välttää, koska jokaiselle uudelle komponentille olisi pitänyt luoda uusi nimike kirjastoon. Näin ollen piirilevy suunniteltiin lähes täysin jo kirjastosta löytyvillä osilla. Poikkeuksena muutama sulake ja sulakkeen pidin, jotka olivat välttämättömiä piirilevyn käytön kannalta. Siten päästiin myös opettelemaan uusien komponenttien hankintaprosessia ja komponenttikirjaston ylläpitoa.

Piirilevyn piirikaavion valmistuttua se lähetettiin ulkopuoliselle yritykselle, jossa suunniteltiin piirilevyn layout eli komponenttien sijoittelu ja reititykset. Layoutin valmistumisen jälkeen piirilevyn tiedot lähetettiin piirilevyn valmistajalle, jossa piirilevyn aihio valmistettiin. Seuraavaksi valmiit aihiot lähtivät kalustettavaksi, eli komponentit aseteltiin paikoil-

leen ja juotettiin kiinni piirilevyyn. Testattavista kondensaattoreista otettiin pienellä otannalla näytteitä ennen kalustusta, jotta varmistuttiin niiden kapasitanssiarvojen olevan suunnilleen valmistajan ilmoittamia. Mittaus suoritettiin käyttämällä Agilentin LCR-mittaria (kuva 9).



Kuva 9. Agilent LCR-mittalaite.

Suunnittelun aloituksesta piirilevyjen valmistumiseen kului aikaa yhteensä kolme kuukautta, josta itse suunnittelua oli noin kolme viikkoa. Logistiikka ja eri työvaiheet levyn valmistuksessa veivät eniten aikaa koko prosessissa.

3.2 Testauskaapin kalustus

Testauskaappi (kuva 10) kalustettiin National Instrumentsin kontrollerilla ja se varustettiin kahdeksalla siihen sopivalla digitaali-input-moduulilla. Rikkoontuneen kondensaattorin ilmaisemiseksi tilatieto tuodaan digitaalimoduulille. Digitaalimoduulit valittiin niin, että niissä oli mahdollisimman paljon kanavia. Valituissa moduuleissa oli käytettävissä yhteensä 32 kanavaa. Yhteen testaukseen oli tällä konfiguraatiolla mahdollista saada 8 x 32 kondensaattoria eli yhteensä 256 kappaletta.

Kaapin jännitteen ohjaus toteutettiin yksinkertaisilla ON-OFF-tyyppisillä kytkimillä, joilla jännite kytketään päälle ja pois. Testauskaappi varustettiin myös vikavirtapiirillä, joka

kytkee jännitteen pois järjestelmästä vikatilanteen sattuessa tai hätä-seis-painiketta painettaessa. Mahdollisia vikatilanteita ovat testausuunin liian korkea lämpötila tai virtapiirissä tapahtuvat ylivirtatilanteet. Kaappiin asennettiin testiohjelman käyttöä varten 17-tuumainen kosketusnäyttö, näppäimistö ja hiiri. Sähkönsyöttö testattaville kondensattoreille toteutettiin käsikäyttöisellä DC-virtalähteellä, joka sijoitettiin sisälle testikaappiin.

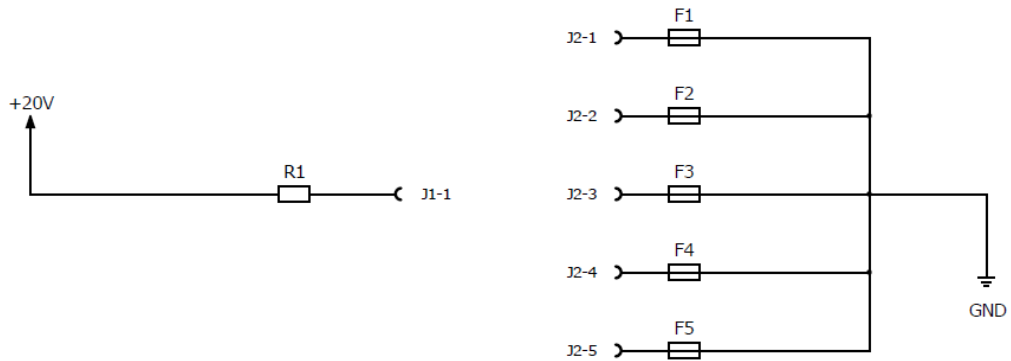


Kuva 10. Testauskaappi toimitettiin tyhjänä ja se kalustettiin itse halutun laiseksi.

3.3 Sulakkeiden lämmönkeston testaus

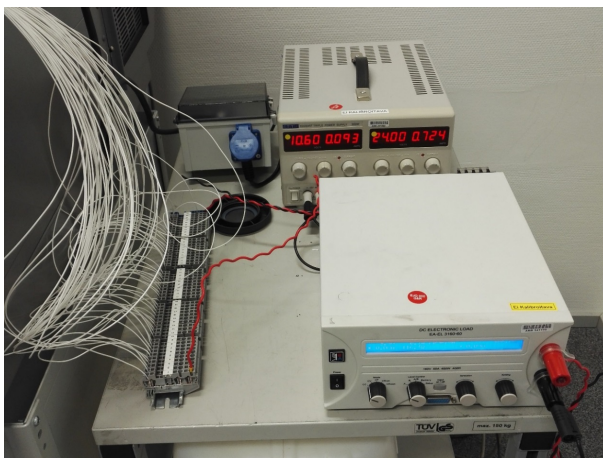
Kondensaattorien ALT-testauksessa oli päätetty käyttää korkeintaan +150 °C:n lämpötilaa. Se ylittää reilusti testipiirillä käytetyn sulakkeen sallitun lämpötilan arvon, joten työn seuraava vaihe oli tutkia, toimivatko käytetyt sulakkeet luotettavasti vielä reilussa ylilämmössä. Sulakkeiden korkein ilmoitettu käyttölämpötila valmistajan mukaan on +125 °C.

Testissä tarkistettiin sulakkeen palaminen kuumassa ympäristössä määritetyllä virta-arvolla. Testiä varten tehtiin oma pienimuotoinen testauspiiri (kuvio 6 ja kuva 11), jossa käytettiin elektronista DC-kuormaa halutun virran aikaansaamiseksi.



Kuvio 6. Sulaketestin periaate. Liittimien kytkentää vaihtamalla pystytään testaamaan aina yhtä sulaketta kerrallaan. R1 on automaattisesti säätävä elektroninen kuorma.

Testi suoritettiin kaksivaiheisena siten, että ensimmäisessä osassa sulakkeet lämmitettiin sääkaapissa (kuva 12) tavoitelämpötilaan ja lämpötilan annettiin tasaantua noin yhden tunnin ajan. Tämän jälkeen aloitettiin syöttämään virtaa sulakkeiden läpi yksi sulake kerrallaan. Tarkoituksena oli löytää virta, jolla sulake palaa noin yhdessä minuutissa. Ensimmäisen testiosuuden perusteella huomattiin, että lämpötilalla ei ollut kriittistä vaikutusta sulakkeiden palamispisteeseen. Sulakkeet hajosivat hieman pienemmällä virralla kuin valmistajan antamalla tiedolla $+125\text{ °C}$:n lämpötilassa. Lämpötila ei siis aiheutanut mitään huomattavaa virrankeston romahtamista.



Kuva 11. Sulakkeiden testauksessa käytettiin säädettävää DC-kuormaa ja teholähdettä.

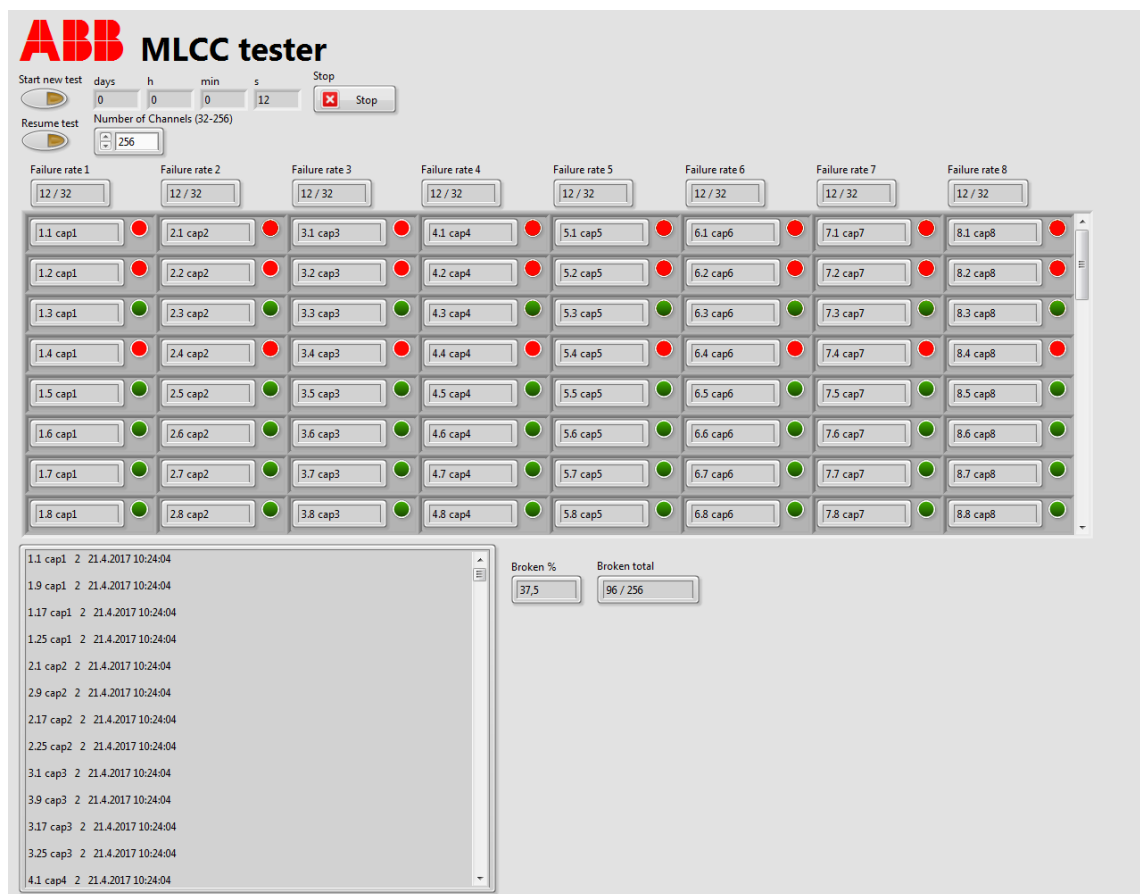
Ensimmäisen osuuden jälkeen testiin ladottiin uudet sulakkeet ja ne laitettiin kuumaan sääkaappiin viikon ajaksi. Edellä mainittu testi suoritettiin uudelleen viikon vanhentuneille sulakkeille, ja tulokset olivat hyvin samankaltaisia kuin aiemmassa testissä. Sulakkeiden virrankesto oli heikentynyt viikon aikana muutaman prosentin verran. Tämän mittauksen pohjalta MLCC-testaukseen valittiin parhaiten lämpöä kestäneet sulakkeet. Sulakkeiden virrankeston tarkoilla arvoilla ei ole merkitystä MLCC-testauksessa, sillä kondensaattorin läpilyönnissä kulkeva virta on joka tapauksessa niin suuri, että se riittää rikkomaan jokaisen mahdollisen ehdolla olleen sulakkeen sen virta-arvosta huolimatta. Tarkoitus oli selvittää, onko jollakin sulakkeella selvästi alentunut virrankestoisuus vanhentamisen jälkeen. Tuloksista kävi ilmi, että tällaista selkeää muutosta ei ollut havaittavissa. Sopivan sulakkeen valitsemisella pystytään estämään rajut läpilyönnit, jotta vikojen analysointi jälkikäteen olisi selkeää.



Kuva 12. Sulakkeiden testausjärjestely rakennettiin sääkaappiin.

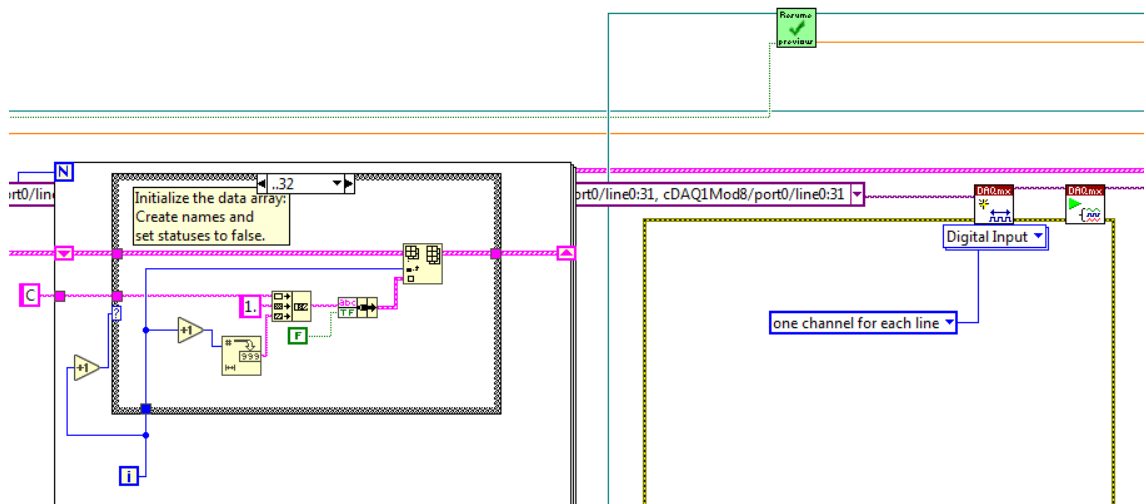
3.4 Testiohjelman kirjoittaminen

Testaukseen kirjoitettiin oma tietokoneohjelma käyttäen LabView-ohjelmointikieltä. Ohjelman haluttiin toimivan niin, että aina kondensaattorin pettäessä, se kirjoittaa ylös kyseisen kondensaattorin tarkat yksilötiedot sekä aikaleiman vikaantumishetkestä. Ohjelmassa huomioitiin mahdollisen sähkökatkon aiheuttama testin keskeytys, jolloin ohjelma osaa jatkaa edellistä testiä ja poimia muistista keskeytyneen testin kumulatiivisen ajan. Ohjelman näyttämä etupaneeli kertoo käyttäjälle tilatiedon jokaisesta yksittäisestä kondensaattorista, sekä siitä pystyy seuraamaan ohjelman kirjoittamaa tiedostoa vikaantumistietoineen testin ollessa käynnissä. Vikaantuneet kondensaattorit näkyvät punaisina ja ehjät vihreinä merkkivaloina (kuva 13). Etupaneelista ilmenee myös vikaantuneiden kondensaattorien määrä kappaleina jokaista testikorttia kohden erikseen, sekä kokonaisprosenttiosuus kaikista vikaantuneista kondensaattoreista. Lukemista voidaan seurata testin etenemistä ja päätellä, missä vaiheessa testi on menossa verrattuna Weibull-jakauman tyypilliseen käyttäytymiseen.



Kuva 13. Valmis testiohjelma kokeiluajossa.

Ohjelman kirjoittaminen oli tämän insinööriyön työläin osuus. Tekijän kokemus ohjelmoinnista oli vähäinen ja painottui pääasiassa Javan sekä Python-kielten perusteiden hallintaan. LabView on graafinen ohjelmointikieli (kuva 14), ja sen opetteluun joutui aloittamaan täysin alkeista. Työn tilaajalla oli tarjota paljon opiskelumateriaalia, henkilökohtaista opastusta sekä vinkkejä.



Kuva 14. LabView-ohjelmointikieli on graafinen.

3.5 Kondensaattorien testaus

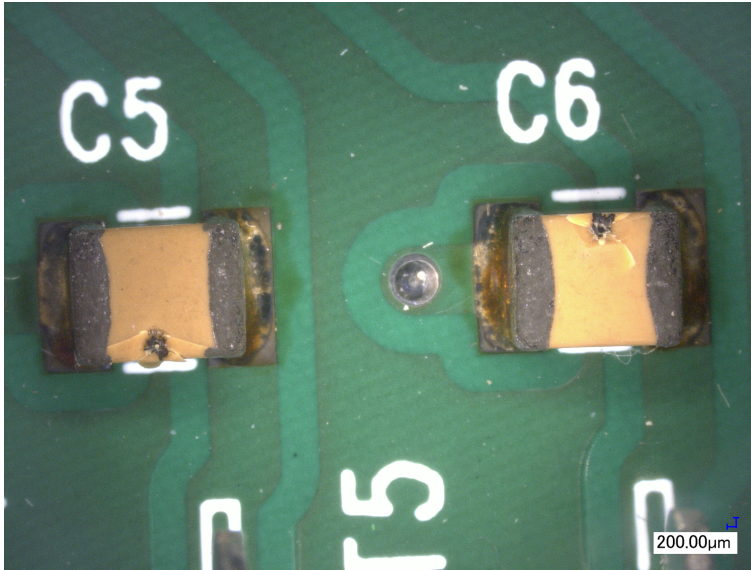
Kun testausohjelma oli saatu valmiiksi ja todettu toimivan halutulla tavalla, oli aika siirtyä työn päätavoitteeseen, ALT-testiin. Testausjärjestelmään tehtiin vielä pieniä parannuksia turvapiiriin toiminnan parantamiseksi ennen varsinaista testiä. Testausjärjestelmään kuului testikaappi, jossa oli tiedonkeruulaitteisto ja virtalähde sekä sääkaappi, johon testattavat kondensaattorit sijoitettiin testin ajaksi (kuva 15).



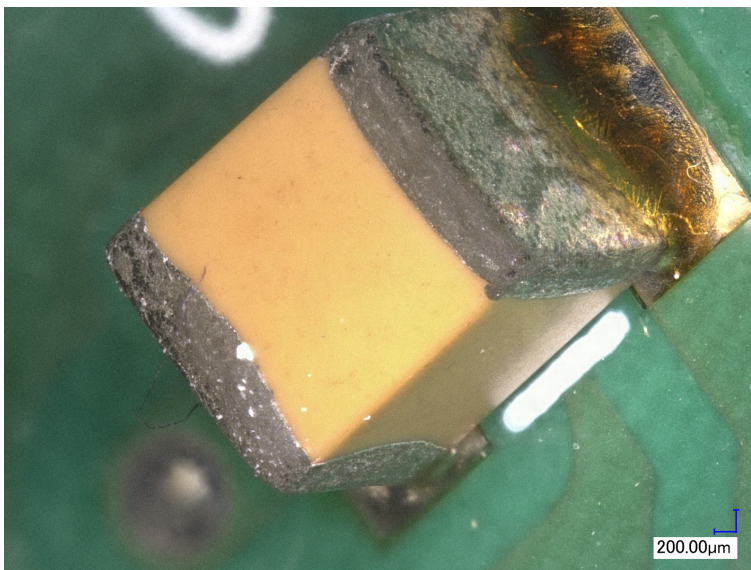
Kuva 15. Valmis testilaitteisto käynnissä.

Ensimmäiseen testiajoon laitettiin yksi piirilevy 32 kondensaattorilla, jotta pystyttiin toteamaan testin toimivuus ja luotettavuus. Testi käynnistyi hyvin ilman ongelmia. Ensimmäiset kondensaattorit alkoivat hajota jo ensimmäisten testituntien aikana. Kaikki kondensaattorit olivat hajonneet kolmen vuorokauden kuluessa testin aloittamisesta. Testin onnistumisen ja laitteiston toimivuuden toteamisen jälkeen käynnistettiin toinen testiajo 256 kondensaattorilla. Tässä testissä ilmeni heti aloituksen jälkeen, että eräs MLCC-tyyppi alkoi hajota nopealla tahdilla, ja kaikki testauksessa olleet kyseiset näytteet olivat hajonneet ensimmäisen 15 minuutin aikana. Kyseistä komponenttia ei oltu hyväksytty tilaajan käyttöön, ja sitä testattiin vertailun vuoksi vaihtoehtoisena komponenttina. Tämä komponentti sijoitettuna käytännön sovelluksiin aiheuttaisi mahdollisesti paljon ongelmia enenaikaisten vikaantumisien vuoksi (early failure). Yksi mahdollinen syy nopealle vikaantumiselle on, että eristekerroksen paksuus on liian pieni, jolloin jännitteenkestoisuus on heikko. Mitä ohuempi eristekerros on, sitä herkempi se on erilaisten epätasalaatuisuuksien vuoksi vikaantumaan. Toisin sanoen virheille ei jää juuri tilaa eristeessä. Tämä tieto oli työn tilaajalle hyvin tärkeä tulevia komponenttivalintoja tehdessä.

ALT-testeissä käytettiin rasitusolosuhteina 140 °C:n lämpötilaa ja 150 V:n jännitettä. Testien jälkeen osassa komponenteista oli silmin nähtävissä selviä tuhoutumisen merkkejä ilman tarkempia tutkimuksia (kuva 16). Tällainen vikajälki johtuu suuresta oikosulkuvirrasta, johon pystytään vaikuttamaan testauspiirin sulakekoon valinnalla. Pienemällä nimellisvirralla toimiva sulake katkaisee virran, ennen suuren vaurion muodostumista. Suurin osa testin alkuvaiheessa hajonneista kondensaattoreista ei osoittanut ulospäin merkkejä hajoamisesta (kuva 17).



Kuva 16. Hajonneita kondensaattoreita piirilevyllä. C5:ssä ja C6:ssa merkkejä voimakkaasta lämpilyönnistä.

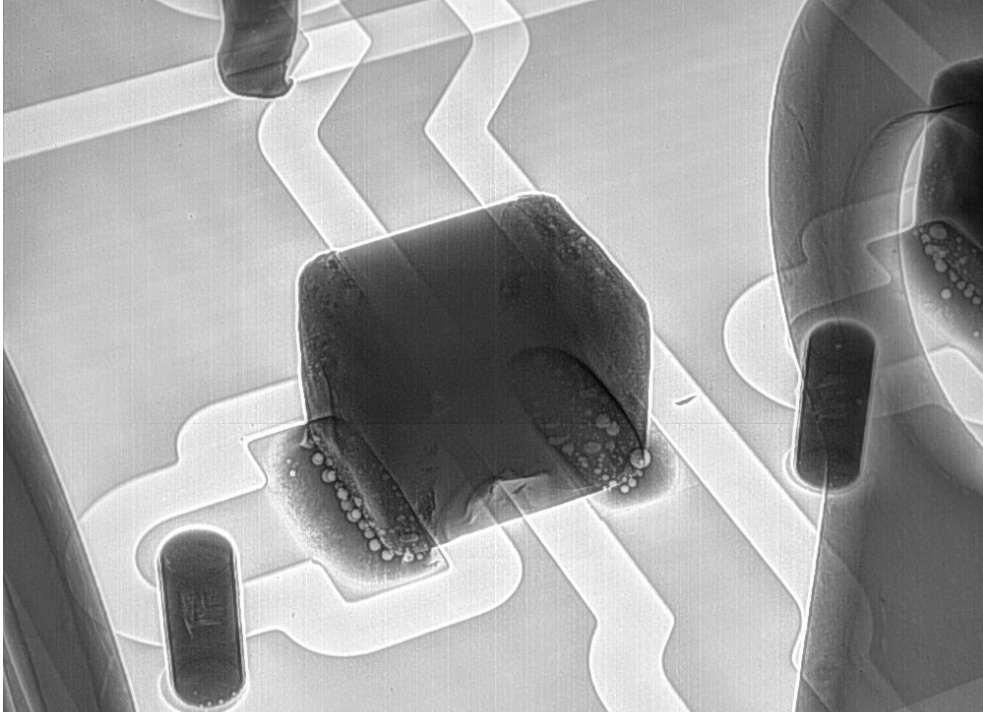


Kuva 17. Hajonnut kondensaattori ilman näkyvää vauriota.

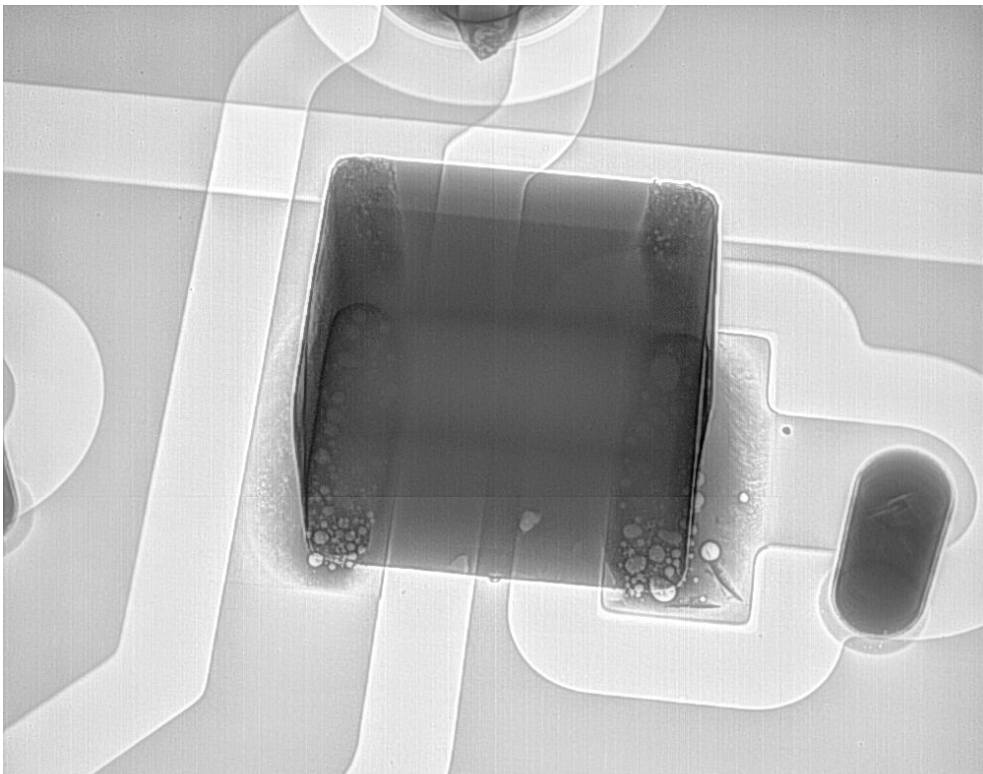
4 Tuloksien analysointi

Testeistä saaduista tuloksista tehtiin laskelmia ja päätelmiä eri MLCC mallien välillä. Monet tulokset yllättivät, joskin osa oli sellaisia kuin osattiin odottaa. Erään testatun MLCC-tyyppin tulokset esitettiin graafisesti ja muodostuneesta kuvaajasta määritettiin ennenaikeisten vikaantumisien osuus (liite 1). Kuvaajan muodosta pystyttiin myös toteamaan vikamekanismin olevan haluttu. Kyseisessä testissä olosuhteet olivat 140 °C ja 150 V. Testin otanta kyseiselle kondensaattorille oli 64 kappaletta. Testin aloituksessa yksi MLCC vikaantui lähes välittömästi. Seuraavat vikaantuivat vasta usean vuorokauden jälkeen, ja vikaantumisia tapahtui tasaisella rytmillä. Tästä voidaan päätellä, että kaikilla muilla, pois lukien ensimmäisellä kondensaattorilla, on melko varmasti sama vikaantumismekanismi. Liitteessä 1 olevista kuvaajista nähdään, että vikaantumiset asettuvat siististi kahdelle suoralle, kun tulokset jaetaan ennenaikaisiin ja eliniän lopussa tapahtuviin vikaantumisiin. Yhden suoran sovittaminen kaikkien vikaantuneiden näytteiden välille ei olisi mielekäästä, koska se ei kuvaisi tuloksia hyvin kokonaisuudessaan. Vikaantumismekanismi voidaan määrittää näytteiden Weibull-kuvaajista, ja vielä lopullisesti varmistaa tekemällä komponenteille läpileikkauskuvaus elektronimikroskoopilla.

Kuva 18 on röntgenlöpivalaisukuva, jossa näkyy selvästi jänniteläpilyönnin aiheuttama vikajälki kondensaattorin alakulmassa. Näin suuren vikajäljen syntymistä edeltää suuri virta, joka rikkoo komponentin rakenteita merkittävästi. Kuvassa 19 on testin loppuvaiheessa hajonnut kondensaattori. Siinä vikajälki on selvästi pienempi ja sijaitsee komponentin sisällä. Jälkimmäisen kuvan tilanne on ideaalinen, sillä kondensaattoria pystytään tutkimaan vielä poikkileikkauskuvien avulla.



Kuva 18. Röntgenkuva testin alussa vikaantuneesta kondensaattorista.



Kuva 19. Röntgenkuva testin lopussa vikaantuneesta kondensaattorista.

Liitteen 1 kaikki kuvaajat ovat samasta testiajosta ja kuvaavat yhtä MLCC-tyyppiä. Siinä on eriteltynä ennenaikaiset ja eliniän lopussa tapahtuvat vikaantumiset sovitettuina Weibull-jakaumaan 90 %:n luottamusvälillä. Liitteen 1 kaksi viimeistä kuvaajaa havainnollistavat niin sanottua elinikäanalyysiä testatuille komponenteille. Ne kuvaavat samaa tilannetta kuin edeltävät kuvaajatkin, mutta asia on esitetty eri tavalla. Jälkimmäisissä kuvaajat alkavat siitä tilanteesta, että jäljellä on 100 % ehjiä komponentteja. Kuvaaja etenee kohti tilaa, jossa kaikki näytteet ovat hajonneet.

Kun ensimmäiset testit oli ajettu usealle eri valmistajan komponentille, saatiin tuloksista luotua ensimmäiset vertailut. Liitteessä 2 on esitetty eri värein viiden eri MLCC:n Weibull-kuvaajat, joista pystyy hahmottamaan niiden välisiä eroavaisuuksia. Erot testatuissa komponenteissa olivat selkeitä ja merkittäviä. Työn tilaaja sai ensimmäisistä testeistä heti tärkeää tietoa tuotekehitykseen. Kun jatkossa testejä ajetaan lisää eri rasiuspisteissä, saadaan niistä laskettua Prokopowicz ja Vaskas -yhtälön (kaava 10) aktivointienergia ja jännite-eksponentti. Nämä vakiot ovat komponenttikohtaisia, ja ne on määritettävä jokaiselle testattavalle MLCC:lle erikseen. Kun aktivointienergia ja jännite-eksponentti tiedetään, voidaan komponentin elinikä laskea hyvin luotettavasti.

Kaavasta 10 määritetään aktivointienergia E_a sekä jännite-eksponentti n :

$$\frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^n e^{\left(\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right)}$$

$$\rightarrow E_a = kT_1T_2 * \ln \left(t_1 * \frac{\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{-n}}{t_2} \right)$$

$$\rightarrow n = \frac{\ln \frac{(t_1 * e^{-\left(\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right)}}}{t_2}}{\ln \left(\frac{V_2}{V_1}\right)}$$

5 Yhteenveto

Työn päätavoite saavutettiin eli testausjärjestelmä valmistui, ja tilaaja sai käyttöönsä toimivan laitteiston, jota pystyy hyödyntämään jatkossa. Testijärjestelmä toimii halutulla tavalla sekä antaa järkeviä tuloksia. Laitteiston avulla tilaaja pääsee itse toteamaan eri valmistajien ja tuotteiden välisiä laatu- ja luotettavuuseroja. Työn merkitys tilaajalle oli erittäin tärkeä, ja MLCC-testilaitteistolle oli ollut selvä kysyntä jo pitkään. Testijärjestelmä jää tilaajan käyttöön ja suunnitteilla on monta erilaista uutta testiä, joita tehdään tulevaisuudessa.

Mietittäessä kehityskohteita testijärjestelmään, tuli ilmi muutama asia, joita voisi jatkossa vielä lisätä. Yksi jatkokehityskohde olisi kondensaattoreita syöttävän virtalähteen automaattinen ohjaaminen testiohjelmasta. Lisäksi testiohjelman ajonaikainen näkymä olisi hyvä jakaa reaaliaikaisena etäluettavaksi, jotta testin etenemistä pystyisi seuraamaan muualta. Lisäksi työn tilaajalla on herännyt uusi jatkokehitysjärjestelmä, jossa kondensaattorien vuotovirtoja pystytään tarkkailemaan testin aikana. Tämä mahdollistaisi vikamekanismien tarkemman analysoinnin.

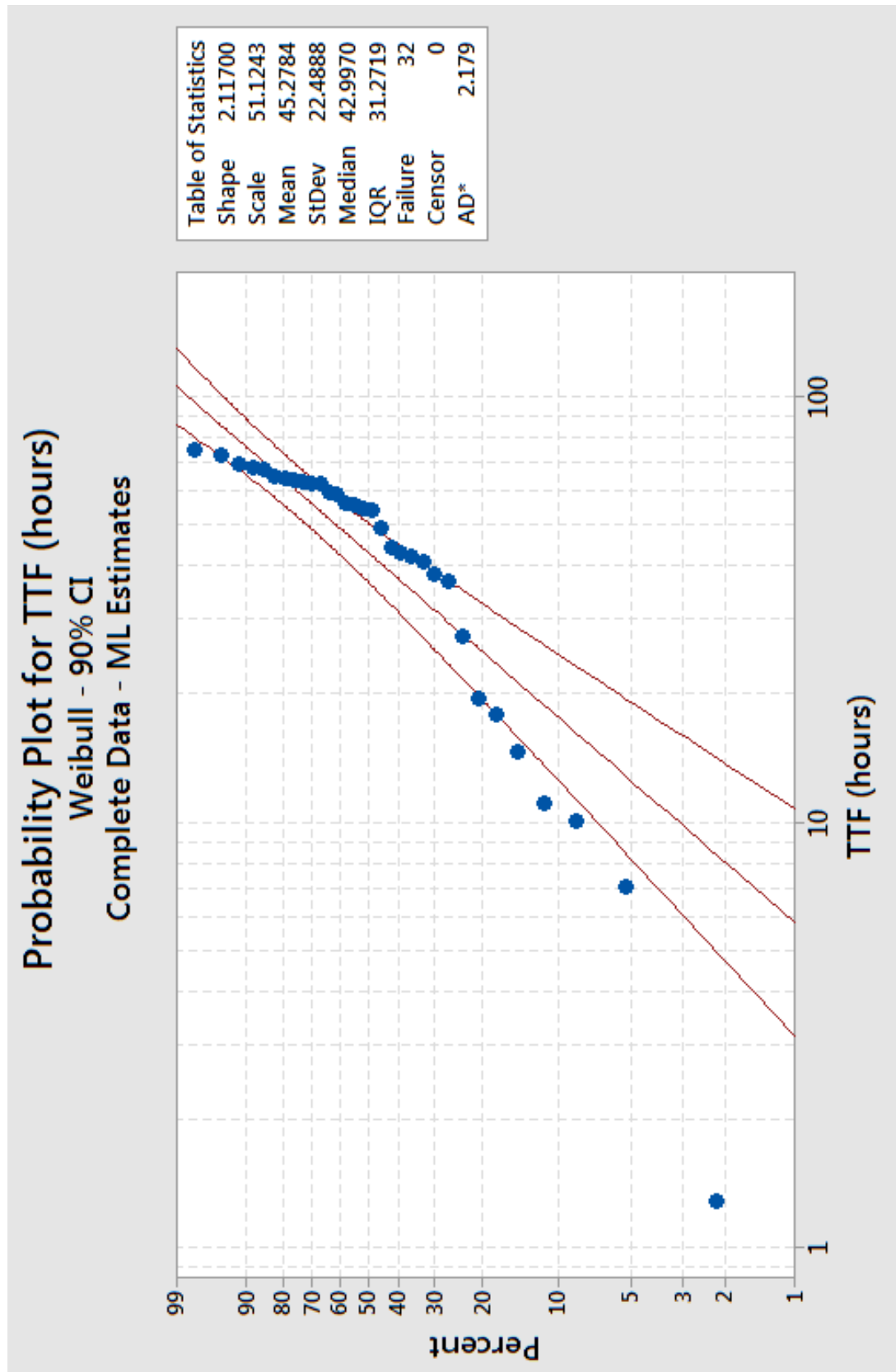
Työ eteni alusta alkaen määrätietoisesti ja varmasti eteenpäin. Aikataulun suunnittelu tuotti hetkittäin hankaluuksia, kun ei pystytty ennakoimaan tilattavien tarvikkeiden toimitusaikoja. Piirilevy-suunnittelu pyrittiin tekemään mahdollisimman nopealla aikataululla, jotta valmis, kalustettu piirilevy saataisiin käyttöön testausjärjestelmän ollessa valmis. Valmiin piirilevyn saamiseen menikin yllättävän pitkä aika, mutta onneksi ne ehtivät saapumaan hyvin ennen testien aloitusta. Testijärjestelmän rakentaminen vei aikaa myös oletettua kauemmin. Testiohjelmaa kirjoitettaessa tilaaja huomasi muutamia lisästarpeita, jotka toivat aina uusia haasteita koodin kirjoittamiseen. Hyvien ohjeiden ja tilaajan antaman opetuksen ansiosta testiohjelma saatiin käyttökuntoon riittävän ajoissa.

Työ valmistui ajallaan, eikä mitään erityisiä vastoinkäymisiä tullut työn aikana vastaan. Pitkän suunnittelu- ja rakentamistyön jälkeen laitteisto oli toimintakuntoinen ja vastasi tilaajan toiveita. Heti ensimmäisten testiajojen jälkeen työn tilaaja sai arvokasta tietoa, etenkin komponenttien laadullisista eroavaisuuksista. Työn lopussa tehtiin vielä vika-analyysiä eri kondensaattorimalleille. Työssä käsiteltiin monipuolisesti eri osa-alueita aina piirilevy-suunnittelusta testituloksien analysointiin.

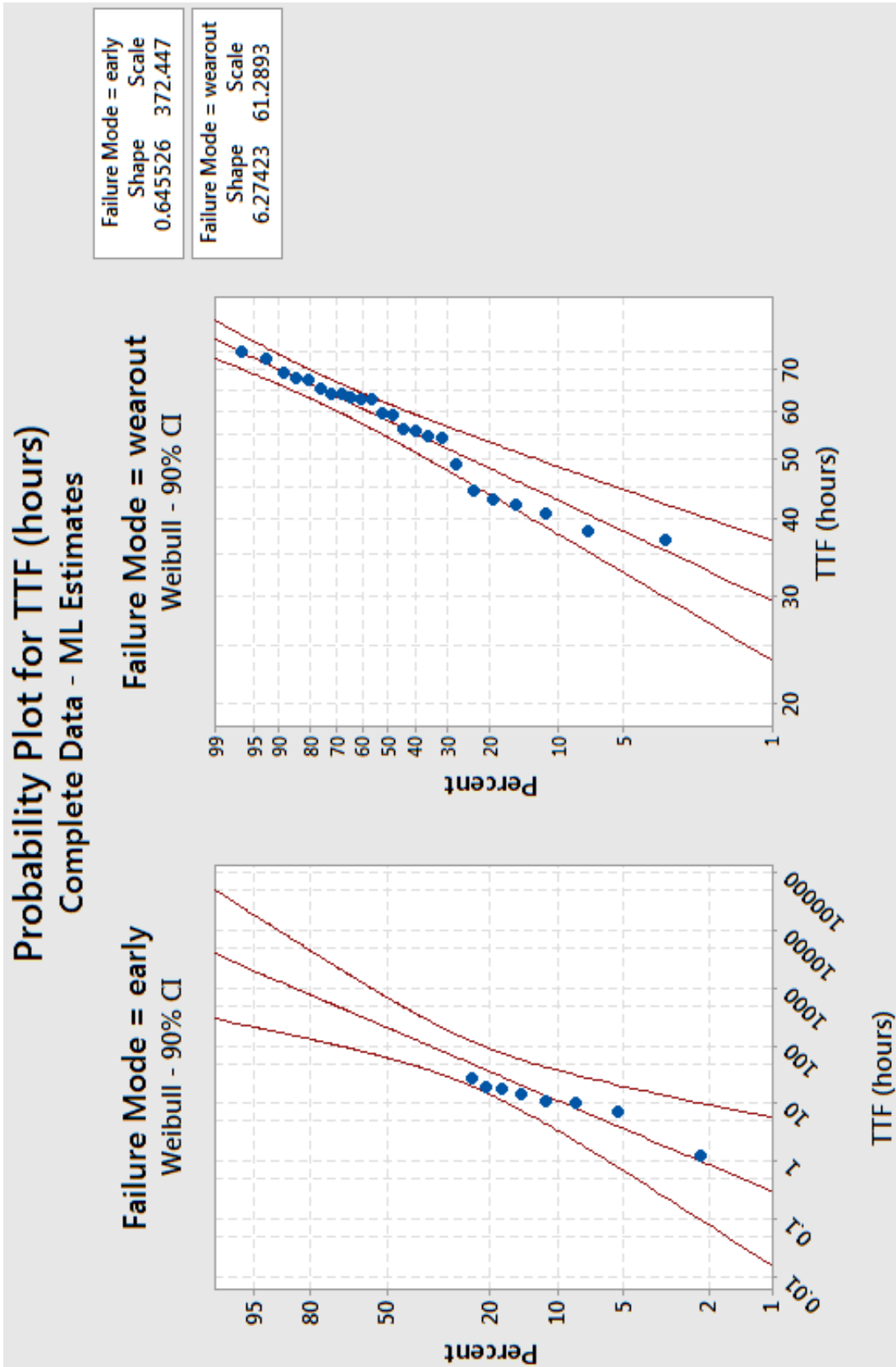
Lähteet

- 1 Liu, David (Donhang) – Sampson, Michael J. 2012. Some Aspects of the Failure Mechanisms in BaTiO₃-Based Multilayer Ceramic Capacitors. Verkkodokumentti. CARTS International, Las Vegas, NV, USA. <https://nepp.nasa.gov/files/24291/CARTS2012_Liu_BaTiO3.pdf>. Luettu 31.1.2017.
- 2 Gong, Huiling – Wang, Xiaohui – Zhang, Shaopeng – Wen, Hai – Li, Longtu. 2013. Grain size effect on electrical and reliability characteristics of modified fine-grained BaTiO₃ ceramics for MLCCs. Maksullinen verkkodokumentti. Tsinghua University, Beijing 100084, China. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221913006018>>. Luettu 13.3.2017.
- 3 Kahn, Manfred. n.d. Multilayer Ceramic Capacitors- Materials and Manufacture. Verkkodokumentti. AVX Corporation, Myrtle Beach, SC, USA. <<http://www.avx.com/docs/techinfo/CeramicCapacitors/mlcmat.pdf>>. Luettu 2.4.2017.
- 4 Liu, Donghang (David). 2014. Insulation Resistance Degradation in Ni-BaTiO₃ Multilayer Ceramic Capacitors. Verkkodokumentti. ASRC Federal Space and Defence. <<https://nepp.nasa.gov/files/26544/2015-562-Liu-Final-Paper-NEPPweb-IEEEpaper2015-TN22737.pdf>>. Luettu 27.2.2017.
- 5 Basic of Ceramic Chip Capacitor. 2008. Verkkodokumentti. Johansson Dielectric. <http://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/JohansonDielectrics_709/PDF/JDI_Training_MLCC-Basics.pdf?redirected=1>. Luettu 19.1.2017.
- 6 Blattau, Nathan – Hillman, Craig. n.d. Design Guidelines for Ceramic Capacitors Attached with SAC Solder. Verkkodokumentti. DfR Solutions, College Park, Maryland. <http://www.dfrsolutions.com/hubfs/DfR_Solutions_Website/Resources-Archived/Publications/2005-2007/2006_DesignCeramCapSAC.pdf>. Luettu 27.2.2017.
- 7 Surface Mount Ceramic Capacitor Products. n.d. Verkkodokumentti. AVX <<http://www.mouser.com/catalog/supplier/library/pdf/AVXSurfaceMountCeramic.pdf>>. Luettu 31.3.2017
- 8 Prokopowcz, T. I. – Vaskas, A. R. 1969. Research and Development Intrinsic Reliability Subminiature Ceramic Capacitors. ECOM United States Army Electronics Command, Fort Monmouth, N.J., USA.
- 9 McPherson, J. W. 2013. Reliability Physics and Engineering. 2. painos. USA: Springer.
- 10 O'Connor, Patrick D. T. – Kleyner, Andre. 2012. Practical Reliability Engineering. 5. painos. Yhdistynyt kuningaskunta: John Wiley & Sons, Ltd.

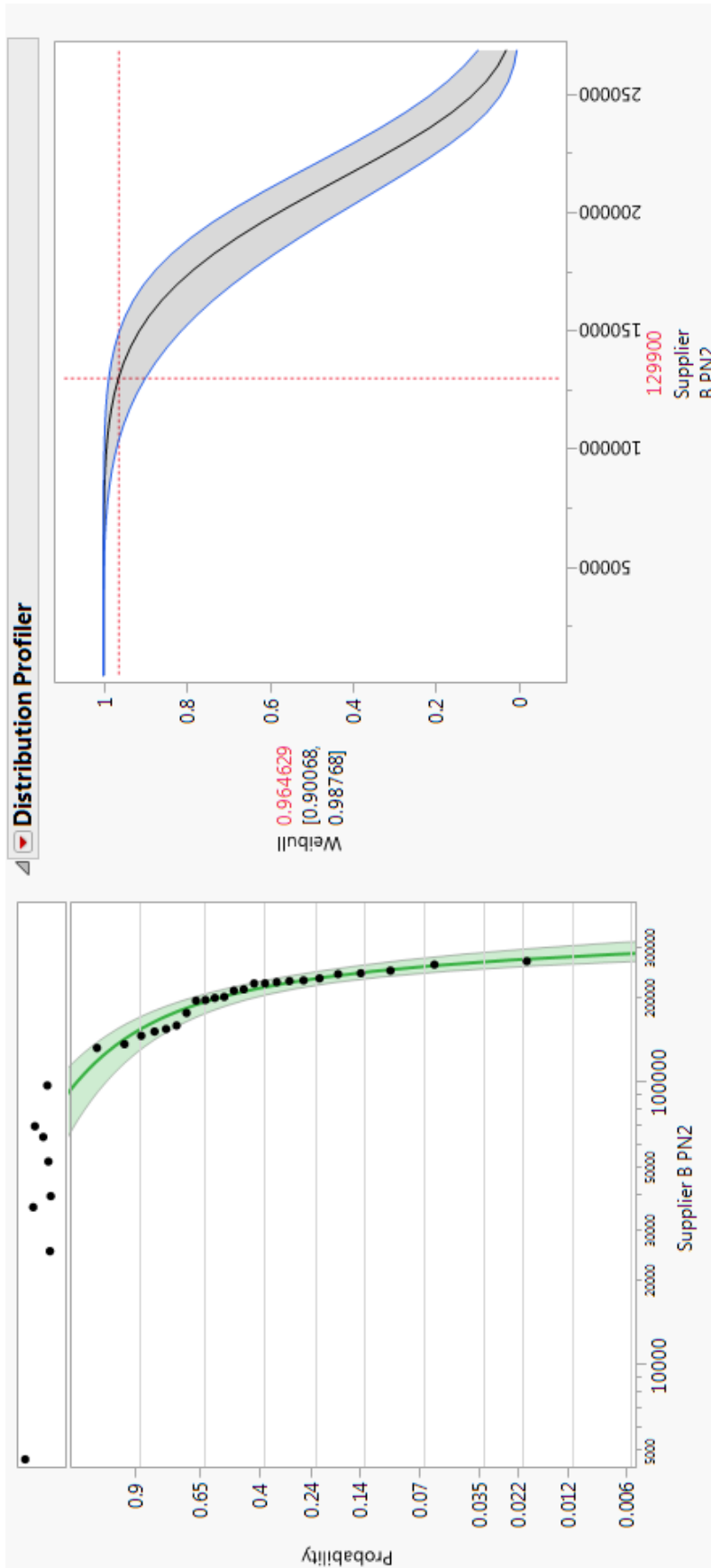
Erään MLCC-tyyppin testituloksia



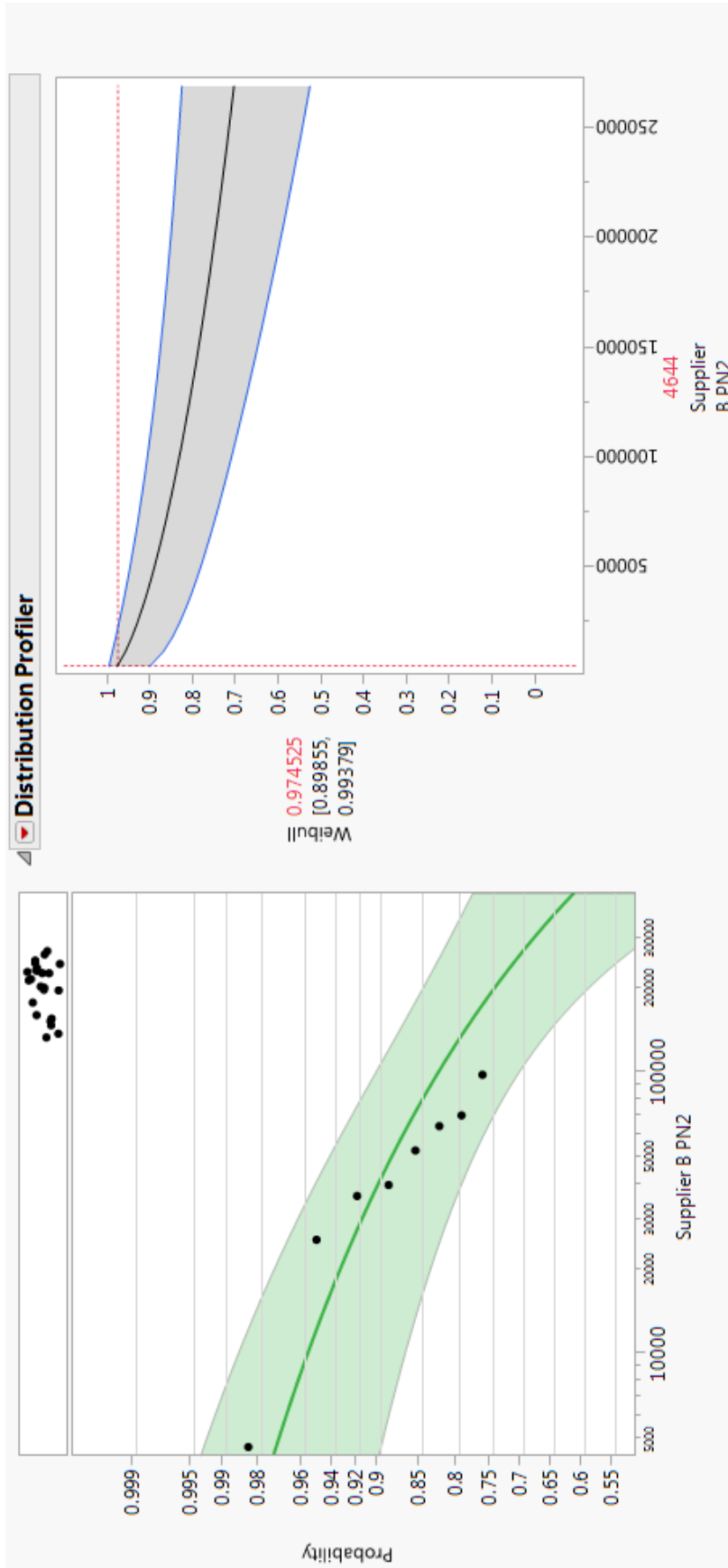
Erään MLCC-tyypin testituloksia



Erään MLCC-tyypin testituloksia



Erään MLCC-tyypin testituloksia



Kaikkien testattujen komponenttien Weibull-kuvaajat

