

Viivi Tamminen

MLC-kondensaattorien luotettavuustestilaite

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkövoimatekniikan koulutusohjelma

Insinööriytyö

25.9.2014

Tekijä(t) Otsikko	Viivi Tamminen MLC-kondensaattorien luotettavuustesteri
Sivumäärä Aika	36 sivua 25.9.2014
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkövoimatekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Timo Kasurinen, lehtori Ari Korpela, elektroniikkasuunnittelija Martti Mattila, toimittajalaatupäällikkö
<p>Keraaminen kondensaattori on yleisesti elektroniikassa käytetty passiivinen komponentti. Passiiviset komponentit on mielletty varsin luotettaviksi osiksi elektroniikan sovelluksissa. Keraamisen kondensaattorin osalta yhä pienempi fyysinen koko luo uudenlaisia ongelmia komponentin luotettavuuteen. On huomattu, että pieneen ja yksinkertaiseen komponenttiin voi liittyä monia erilaisia vikamekanismeja ja luotettavuusongelmia.</p> <p>Tässä insinööriyössä tutkitaan keraamisten kondensaattorien vikamekanismeja ja luotettavuutta. Työn tavoitteena on suunnitella testilaitte sadalle keraamiselle kondensaattorille. Testilaitteen avulla pystytään todentamaan mahdolliset eroavaisuudet eri kondensaattorivalmistajien tai valmistuserien välillä.</p> <p>Teoriaosuudessa on pääasiallisesti keskitytty kondensaattoreissa esiintyviin vikamekanismeihin ja kondensaattorien luotettavuuteen yleisesti. Testilaitteen suunnittelu toteutettiin käyttämällä PADS logic- ja PADS layout -ohjelmistoja.</p> <p>Testielektroniikkaa ei pystytty työn aikana testaamaan. Tulevat testaukset ja mahdolliset korjaustoimenpiteet tullaan tekemään ABB Oy:n toimesta.</p>	
Avainsanat	keraaminen kondensaattori, testaus, luotettavuus, vikamekanismi

Author Title	Viivi Tamminen Multilayer Ceramic Capacitor's Reliability Tester
Number of Pages Date	36 pages 25 September 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Program	Electrical engineering
Specialisation option	Electrical power engineering
Instructor(s)	Timo Kasurinen, Senior lecturer Ari Korpela, Electronics designer Martti Mattila, Supplier quality manager
<p>Ceramic capacitor is a commonly used passive component in electronics. Passive components are generally seen as very reliable parts in electronic applications. Multilayer ceramic capacitors with a smaller physical size create new kinds of problems related to reliability of a component. It has been noticed, that a small and simple component can contain many failure mechanism and reliability problems.</p> <p>This study will examine multilayer ceramic capacitor's failure mechanisms and reliability. The aim of this work is to design a test device for one hundred ceramic capacitors. With the test device, the possible differences between capacitor manufacturers or production lots can be demonstrated.</p> <p>The theoretical part of this work is mainly focused on failure mechanisms and the overall reliability of a ceramic capacitor. The design of the test device was done by using PADS logic and PADS layout software.</p> <p>The test device could not be completely verified during this study. The actual testing for ceramic capacitors and the possible updates and improvements for the test device will be done in future by ABB Oy Drives.</p>	
Keywords	Ceramic capacitor, reliability, testing, failure mechanism

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Kondensaattori	2
2.1	Kondensaattori vaihto- ja tasavirtapiireissä	2
2.2	Keraaminen kondensaattori	3
2.3	Keraamisen kondensaattorin valmistus	6
2.4	Komponenttien luotettavuus yleisesti	8
2.5	Keraamisen kondensaattorin luotettavuus	8
2.6	Keraamisen kondensaattorin testaus	9
2.7	Keraamisten kondensaattorien vikamekanismit	11
2.8	Keraamisten kondensaattorin valmistuksessa aiheutuvat viat	12
2.8.1	Polttohalkeama	12
2.8.2	Poikittaissuuntainen halkeama	13
2.8.3	Ontelot	13
2.9	Lämpöshokin aiheuttama murtuma	14
2.10	Taivutusmurtuma	15
2.11	Keraamisen kondensaattorin eristeongelmat	17
2.12	Vuotovirta	20
2.13	Operaatiovahvistinkytkennät	21
2.13.1	Jänniteseuraaja	21
2.13.2	Oskillaattori	21
2.13.3	Ei-invertoiva vahvistin	22
3	Kondensaattorien testauslaitteen suunnittelu ja toteutus	23
3.1	Testauslaitteelle asetetut vaatimukset	23
3.2	Suunnittelussa käytetyt työkalut	24
3.3	Testauslaitteen rakenne	24
3.3.1	Taajuuden ja pulssinleveyden säädön toiminta	26
3.3.2	Alipäästösuodin	28
3.3.3	Taajuusnäyttö	28
3.3.4	MOSFET:iien ohjaus ja kondensaattoreiden kuormitus	31
3.3.5	Kondensaattorien vuotovirran mittaus	34

4 Yhteenveto

36

Lähteet

37

Lyhenteet

BaTiO ₃	Bariumtitanaatti, kemikaallinen yhdiste.
BME	Base Metal electrode, perusmetallista tehty elektrodi.
LED	Light-emitting diode, valodiodi.
MLCC	Multilayer ceramic capacitor, monikerroksinen keraaminen kondensaattori.
NASA	National Aeronautics and space Administration, Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallinto.
PME	Precious Metal electrode, jalometallista tehty elektrodi.
SMD	Surface-Mount device, pintaliitoskomponentti.

Symbolit

C	Kapasitanssi
Q	Varaus
A	Pinta-ala
$\frac{ct}{v}$	Tilavuushyötysuhde
d	Etäisyys
$\frac{du}{dt}$	Jännitteen muutos ajan suhteen
ϵ_0	Eristevakio
ϵ_r	Suhteellinen eristevakio
X_c	Reaktanssi
S	Kondensaattorin sisällä päällekkäin olevien elektrodien alue
N	Kondensaattorin yksittäisten eristekerroksien lukumäärä
H	Korkeus
L_o	Komponentin oikea elinikä
L_T	Komponentin testaus elinikä
V_o	Komponentin oikea käyttöjännite
V_T	Komponentin testausjännite
T_o	Komponentin käyttölämpötila celsiusasteina
T_T	Komponentin testauksessa käytetty lämpötila
R_T	MLC kondensaattorin luotettavuus
R_i	MLC kondensaattorin yhden kerroksen eristemateriaalin luotettavuus
G	Vahvistuserroin
T	Varausaika (tau)

1 Johdanto

Teollisuuden tuotteiden ja palveluiden tarjonnassa on jo pitkään ollut laadun merkitys asiakkaalle tärkeässä roolissa; monesti laatua pidetään jopa itsestäänselvyytenä. Tuotteen elinkaarenhallinta ja tuotteen luotettavuus ovat taas asioita, joiden merkitys asiakkaan kokemassa laadussa korostuvat vuosi vuodelta enemmän. Luotettavuuden hallinnan kannalta on erityisen tärkeä ymmärtää vikamekanismin synty ja pyrkiä löytämään tuotteissa esiintyvien vikojen juurisyyt. Asiakaslaadun ja tyytyväisyyden takaamisessa on tärkeää jatkuva parantaminen siten, että mahdollisia ongelmia pystyttäisiin ennakoimaan ennen kuin ne aiheuttavat ongelmia asiakkaalla. ABB Oy Drivesissa asiakkaan kokemaan laatuun halutaan panostaa. Näin pyritään suunnittelemaan tuotteita ja palveluita yhä enemmän luotettavuuden ja tuotteen elinkaarenhallinnan näkökulmasta.

Keraamisten kondensaattorien luotettavuuden takaaminen on nykyään vaikeampaa muun muassa niiden pienen kotelokoon takia. Vuosien saatossa erilaisista kondensaattoriongelmissa on tullut maailmanlaajuinen huolenaihe, joka on noussut pinnalle lyhyessä ajassa. Niiden luotettavuuteen vaikuttavat muun muassa niiden valmistusprosessi, eristeen ja elektrodien materiaalit sekä käyttöolosuhteet.

Erilaista kirjallisuutta löytyy keraamisiin kondensaattoreihin ja niiden vikamekanismeihin liittyen ja niitä on analysoitu eri tahoilta. ABB on tehnyt keraamisille kondensaattoreille joitain kiihdytettyjä elinikätestejä, mutta tarve luotettavuuden parantamiselle on suuri. ABB haluaa tutkia ja parantaa käytössä olevien komponenttien laatua.

Insinööri työ käsittelee keraamisen kondensaattorin vikamekanismeja ja luotettavuutta. Erinäisiin vikamekanismeihin ja niiden syihin paneudutaan työn teoriaosuudessa. Työn tavoitteena on suunnitella sadalle keraamiselle kondensaattorille luotettavuustestilaitte, jonka tarkoitus on mitata vikatilanteessa kondensaattorin läpi kulkevaa vuotovirtaa. Suunnittelu tehdään käyttäen PADS Logic- ja PADS layout -ohjelmistoja. Testausmenetelmällä voidaan nähdä eroavaisuudet saman kondensaattorivalmistajan tuotteiden välillä sekä eroavaisuudet eri kondensaattorivalmistajien välillä.

2 Kondensaattori

Kondensaattori on passiivinen elektroniikan komponentti, jolla on kyky varastoida energiaa. Yksinkertaisimmillaan se koostuu kahdesta johtavasta levystä, elektrodeista, joiden välissä on eristävää ainetta. Kun kondensaattori kytketään jännitelähteeseen, levyjen välille syntyy sähkökenttä. Kondensaattorin kykyä varastoida sähköenergiaa kutsutaan kapasitanssiksi C .

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1)$$

C on kapasitanssi

Q on varaus

U on jännite

Kondensaattorin kapasitanssi riippuu eristelevyjen etäisyydestä toisiinsa ja niiden pinta-alasta. [1.]

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2)$$

A on levyjen pinta-ala

d on niiden välinen etäisyys

ϵ_0 vastaa tyhjiön permittiivisyyttä ja suhteellinen permittiivisyys ϵ_r riippuu eristeaineen rakenteesta. Permittiivisyys kuvaa sähkökentän vaikuttamista eristeaineeseen. Koska ilman permittiivisyys tunnetaan, ja se muistuttaa lähes tyhjiötä, voidaan sitä pitää eristevakiona. Ilman eristevakio on $8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m. [1.]

2.1 Kondensaattori vaihto- ja tasavirtapiireissä

Kytettäessä kondensaattori tasajännitelähteeseen sarjavastuksen R kanssa, on virta suurin jännitteen päällekytkentähetkellä, jonka jälkeen se putoaa vähitellen. Kondensaattorin latauduttua täyteen virran arvo on nolla. Kondensaattori ei varaudu heti täyteen, sen jännite U_c on aluksi nolla ja se saavuttaa vähitellen täyden jännitteen U . Varausaika τ (tau) määräytyy kapasitanssista ja vastuksen resistanssista.

$$\tau = C \cdot R \quad (3)$$

Tau on aikavakio, joka kertoo koska kondensaattori on latautunut 63 % kokonaisjännitteestä. Samalla kaavalla voidaan myös laskea aika, jonka kondensaattori tarvitsee purkaukseen arvoon 37 % täydestä jännitteestä. [1.]

Vaihtovirtapiirissä kondensaattori latautuu, purkautuu, latautuu vastakkaiseen suuntaan ja purkaantuu uudelleen. Varauksen muuttuessa jatkuvasti näyttäisi kondensaattorissa kulkevan vaihtovirtaa. Tämä virta on verrannollinen jännitteen muutosnopeuteen.

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (4)$$

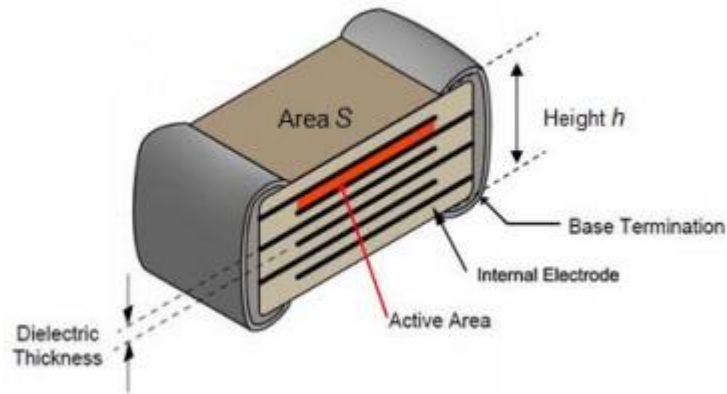
Tätä virtaa rajoittaa kondensaattorin sisäinen vastus, jota kutsutaan kapasitiiviseksi reaktanssiksi X_c .

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (5)$$

Kaavassa f on taajuus ja C kapasitanssi. Reaktanssi pienenee taajuuden kasvaessa. Taajuuden ollessa nolla (tasajännitteellä) reaktanssi on äärettömän suuri, eikä virta kulje kondensaattorin läpi.

2.2 Keraaminen kondensaattori

Tyypillisesti keraaminen kondensaattori koostuu päällekkäisistä metalliosista ja keraamisista osista, kuten kuvassa 1 on näytetty. Näiden kondensaattorien eristeaineena käytetään nimensä mukaan keraamia, tyypillisesti bariumtitanaattia (BaTiO_3). Keraamisessa kondensaattorissa joukko eristekerroksia ja sisäisiä elektrodeja on kasattu päällekkäin; Sisäiset elektrodit on kytketty rinnan sähköisen kontaktin muodostamiseksi.



Kuva 1 Monikerroskondensaattorin rakenne (3, s. 60)

MLC-kondensaattorin (multilayer ceramic) kapasitanssin kaava on seuraava:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot N \cdot \frac{S}{d} \quad (6)$$

jossa S on sisällä päällekkäin olevien elektrodien alue, N on yksittäisten eristekerrosten lukumäärä, ε_r on suhteellinen eristevakio keraamiselle BaTiO_3 eristeelle, d on eristekerroksen paksuus ja ε_0 on vapaan tilan eristevakio.

Kaksi yleisintä keraamista kondensaattoria, joita nykyaikaisuudessa käytetään ovat keraaminen monikerroskondensaattori (MLC) ja keraaminen levykondensaattori (MLCCs). Keraamiset kondensaattorit ovat SMD- (Surface-Mount device) eli pintaliitoskomponentteja.

Yleensä keraamiset kondensaattorit ovat kapasitanssiltaan hyvin pieniä, 1nF- 1μF. Toisaalta suuremmat kapasitanssiarvot 100 μF:iin asti ovat myös mahdollisia. Keraamisilla kondensaattoreilla ei ole määrättyä napaisuutta, joten ne on turvallisia kytkeä myös vaihtojännitelähteeseen. [2.]

Jotta kapasitanssiltaan suurempiarvoisia keraamisia kondensaattoreita voidaan rakentaa pieniskoossa, tarvitsee kapasitanssin tilavuushyötysuhdetta ($\mu\text{F}/\text{cm}^3$) nostaa. Tilavuushyötysuhde on määritelty seuraavasti:

$$\frac{C_t}{V} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot N \cdot \frac{S}{d}}{S \cdot h}, \quad (7)$$

jossa $h = N \cdot d$, on kondensaattorin likimääräinen korkeus. Kuten kaavasta voidaan huomata, jotta tilavuushyötysuhdetta saadaan kasvatetuksi, kasvatetaan eristevakiota ϵ_r , vähennetään eristekerroksen paksuutta d tai tehdään molemmat kyseisistä toimenpiteistä. [3.]

Keraamiset kondensaattorit voidaan jakaa kahteen eri luokkaan. Luokkaan 1 kuuluvien kondensaattoreiden kapasitanssiarvo on vakaa eri jännitteillä, taajuuksilla ja lämpötiloilla. Nämä kondensaattorit ovat myös erittäin tarkkoja. Näitä käytetään kun sovellukselta vaaditaan korkeaa tasaisuutta ja vain vähän häviöitä.

Luokan 2 keraamiset kondensaattorit ovat kapasitanssiarvoltaan suuria, eikä niitä voida käyttää sovelluksissa, joissa tarvitaan äärimmäistä tarkkuutta, mutta ne soveltuvat erinomaisesti esimerkiksi ohituskondensaattoreiksi.

Useimpien MLC- kondensaattorien eristeaineena käytetään bariumtitanaattia. Eristeaineen vakautta on kasvatettu tekemällä eristeaineesta tasalaatuista, jottei eristeen rakenne muuttuisi missään tilanteessa. X7R-valmisteet ovat hyvin suosittuja eristeen vakiomateriaaleja. Ne sisältävät lisäaineesia, kuten kalsium-sirkonaattia. Eristeen vakiomateriaalit ovat suhteellisen homogeenisen bariumtitanaattin muodostumia, joiden rae-
koko on enemmän kuin $3 \mu\text{m}$. On otettava huomioon, että jotkin epäpuhtaudet kuten alumiini, natrium ja rauta voivat edistää sähköisiä vikoja rakenteessa. [4.]

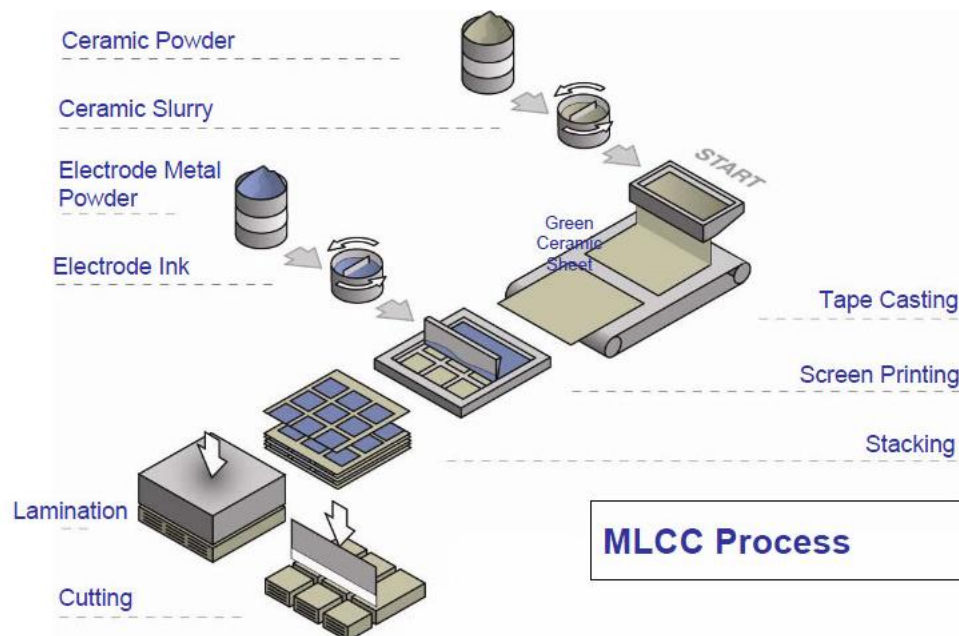
Elektrodin materiaalin tulee olla johtavaa, eikä se saa sekoittua tai reagoida muiden aineiden kanssa. Tämä edellyttää ei-hapettavaa metallia tai seoksia, joilla on korkeat sulamispisteet. Palladium on yksi aikaisemmin käytetyistä materiaaleista. Kustannussyistä käytetään yhä enemmän hopeaa lisättyä elektrodin seokseen, joka kuitenkin alentaa seoksen sulamispistettä. Hopeaakin kustannustehokkaampaa on käyttää elektrodiseoksessa nikkeliä, mutta nikkelin taipumus hapettua aiheuttaa merkittäviä muutoksia keraamisessa koostumuksessa ja sen käsittelyssä. [4.]

2.3 Keraamisen kondensaattorin valmistus

Tässä luvussa kerrotaan keraamisen kondensaattorin valmistuksesta.

Kuvassa 2 on esitetty vaiheittain keraamisen kondensaattorin valmistus. Ensimmäisessä työvaiheessa helposti käsiteltävän keraamisen lieteen valmistamiseksi, sekoitetaan keraaminen jauhe liuottimeen ja sideaineeseen. Tämän jälkeen lietteestä tehdään nauha-valu kaatamalla se kuivausuunin sisäpuolella olevalle kuljetinhihnalle, jolloin tuloksena on kuiva keraaminen nauha. Keraamisesta nauhasta leikataan neliön muotoisia levyjä, levyn paksuus määrittelee kondensaattorin jänniteluokan.

Elektrodimuste valmistetaan metallijauheesta, joka on sekoitettu keraamisen materiaalin ja liuottimeen kanssa. Elektrodit painetaan keraamisille levyille käyttäen sapluunaa, joka tukkii ne kohdat, johon elektrodimustetta ei haluta. Prosessia kutsutaan seripainatukseksi eli silkkipainoksi.



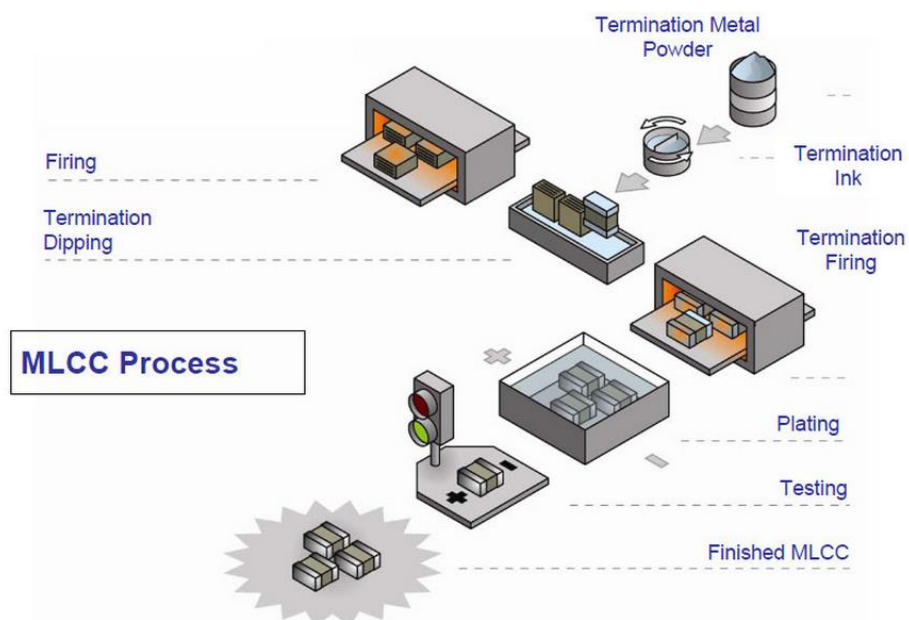
Kuva 2 Keraamisen kondensaattorin valmistusprosessi (5, s. 4)

Monikerroksisen rakenteen aikaansaamiseksi levyt kasataan päällekkäin. Tämän jälkeen suoritetaan laminointi, jossa koko pinoon kohdistetaan paine, jolloin kaikki erilliset kerrokset sulautuvat yhteen saavuttaakseen yhtenäisen rakenteen. Tämän jälkeen osiota kutsutaan palkiksi. Viimeistelynä palkki leikataan erillisiksi kondensaattoreiksi.

Mitä pienempiä kondensaattorit ovat fyysiseltä kooltaan, sitä enemmän osia on yhdessä palkissa.

Kuvassa 3 nähdään keraamisten kondensaattoreiden loppuvalmistus. Leikatut osat ladotaan hitaasti kulkevalle kuljetushihnalle, joka kuljettaa ne sintrattavaksi polttouuniin. Sintrauksessa eri kerrokset sulautuvat yhteen. Polttouunin lämpötilaprofiili on hyvin tärkeä osa keraamisen kondensaattorin valmistuksessa. Keraamisten kondensaattorien päätyterminaalien tekoon tarvitaan oma aineensa, joka valmistetaan sekoittamalla metallijauhetta liuottimen ja lasisulatteen kanssa. Kondensaattorin molemmat päätyterminaalit kastetaan aineeseen ja poltetaan lopulta polttouunissa.

Viimeistelynä keraamiset kondensaattorit päällystetään käyttämällä galvanointiprosessia. Kondensaattorin päätyterminaalit päällystetään nikkeli-kerroksella ja sen jälkeen kerroksella tinaa. Nikkeliä käytetään este-kerroksena päätyterminaalien ja tinapinnoituksen välissä. Tina estää nikkelin hapettumisen ja helpottaa komponentin juottamista piirilevylle. Viimeiseksi kondensaattorit testataan ja lajitellaan oikeisiin kapasitanssitoleransseihin. Testauksen jälkeen kondensaattorit voidaan pakata nauhaan tai myydä yksittäiskappaleina. [5.]



Kuva 3 Keraamisen kondensaattorin valmistusprosessi 2/2 (5, s. 5)

2.4 Komponenttien luotettavuus yleisesti

Komponenttien luotettavuudella tarkoitetaan komponenttien kykyä suoriutua niille määrättyistä tehtävistä. Luotettavan tuotteen perusta on kestävä rakenne, joka täyttää annetut vaatimukset ja vähentää vikaantumisen riskiä ja täyttää asiakkaan toivomukset. Komponentin luotettavuus selvitetään testaamalla komponenttia tietyn ajan kiihdytetyissä tai tavanomaisissa käyttöolosuhteissa. Sähköisessä suunnittelussa luotettavuuden varmistaminen on ajan myötä hankaloitunut elektronisten piirien monimutkaistuessa, tehovaatimusten kasvaessa, uusien materiaalien ja komponenttien tullessa markkinoille ja kestävyydeltään heikompien komponenttien käytön takia. [6.]

2.5 Keraamisen kondensaattorin luotettavuus

Yleisesti keraaminen kondensaattori on yksi luotettavimpia elektroniikan komponentteja. Keraamisten kondensaattorien valmistajat ovat antaneet seuraavan kaavan keraamisten kondensaattorien luotettavuudelle:

$$\frac{L_O}{L_T} = \left(\frac{V_T}{V_O}\right)^x \left(\frac{T_T}{T_O}\right)^y, \quad (8)$$

jossa L_O on elinikä,

L_T on testi-ikä,

V_T on testausjännite

V_O on käyttöjännite,

T_T on testi lämpötila ja

T_O on käyttölämpötila celsius asteina.

X ja Y on määritelty seuraavanlaisesti

Historiallisesti keraamisille kondensaattoreille eksponentti X on ajateltu olevan 3, lämpötilaominaisuuksille eksponentti Y on ajateltu olevan noin 8. [7.]

Huomattavaan MLC-kondensaattorien luotettavuuden heikkenemiseen vaikuttaa myös kondensaattorin valmistusvaiheessa tapahtuva valmistusvirhe, jossa kondensaattorin eristeen raekoko jää alle tietyn pisteen, mikä aiheuttaa eristevakion ϵ_r dramaattisen laskun raekoon pienentyessä. Myös BaTiO_3 alkaa menettää ferrojohtavuuttaan raekoon

alittaessa tietyn pisteen. Tähän liittyviin vikamekanismeihin on paneuduttu hieman myöhemmin. [3.]

MLC-kondensaattorien luotettavuus R_t voidaan ilmaista seuraavasti

$$R_t = R_1 \times R_2 \times R_3 \dots \times R_i \dots \times R_N = R_i^N \quad (9)$$

Jossa R_i on yhden kerroksen eristemateriaalin luotettavuus. Eristemateriaalin huononeminen on yksi pääsyyistä pitkäaikaisluotettavuuden heikkenemiseen yksikerros kondensaattoreissa, joten voidaan olettaa, että luotettavuus R_i määräytyy pääasiassa keraamisesta BaTiO_3 -eristemateriaalista.

Useassa tapauksessa eristemateriaalin R_i voi olla tuhansia vuosia normaalissa sovelluksessa ilman, että se osoittaa merkittävää heikentymistä, jolloin komponentin kokonaisluotettavuus on suuri. Kuitenkin R_i :n pienentyessä laskee myös kokonaisluotettavuus R_t nopeasti.

ABB on tunnistanut keraamisten kondensaattorien luotettavuusriskin, kun jännitteenmuutos ajan suhteen komponentin yli on nopea ja sitä tapahtuu usein. Useissa ABB:n sovelluksissa keraamista kondensaattoria on käytetty jännitteen muutosnopeuden suodattamiseen. Kaavan neljä mukaan voidaan huomata, että $\frac{du}{dt}$:n ollessa suuri, kasvaa myös kondensaattorin läpi kulkeva virta, jolloin se voi aiheuttaa lämpöstressiä lopulta rikkoen kondensaattorin. Ongelmana on, ettei kondensaattorien valmistajilla tyypillisesti ole vakiotestiä vaihtojännitteellä testaamiseen, jolloin luotettavuusongelmien riski kasvaa sovelluksissa, joissa jännitteenmuutos on suuri. Kondensaattorien testaamisesta lisää alla.

2.6 Keraamisen kondensaattorin testaus

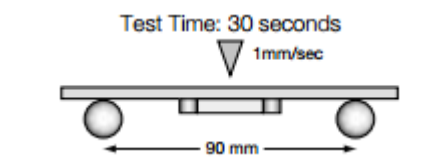
Keraamisten kondensaattorien valmistajat testaavat kondensaattorit ennen kuin ne todetaan kelvollisiksi.

Tyypillisesti testattavia suureita ovat kapasitanssi, häviökerroin, eristysvastus, eristeen vahvuus ja taivutuskestävyys. Kondensaattorit käyvät ensin läpi visuaalisen tai optisen tarkistuksen, jossa rikkoutuneet ja vioittuneet kondensaattorit hävitetään.

Kondensaattorien kapasitanssi ja häviökerroin voidaan mitata syöttämällä kondensaattoriin 1kHz taajuus, 1,0 Vrms jännitteellä. Häviökerroin on suurin pienjännitteisille kondensaattoreille eli noin 5 %, kun taas suurempien esim. 50 V kondensaattorien häviökerroin noin 2,5 %.

Kondensaattoreiden eristysvastus on suuri, noin 100 000 MΩ. Eristysvastus testataan lataamalla kondensaattori sen nimellijännitteellä minuutin ajaksi ja mittaamalla samaan aikaan vuotovirta. Itse eristeen vahvuus testataan syöttämällä kondensaattoriin 300 % sen nimellijännitteestä 1-5 sekunnin ajaksi.

Keraamisen kondensaattorin taipuma testataan alla olevan kuvan 4 mukaan, jossa piirilevyllä tai testausalustalla olevaa kondensaattoria taivutetaan 2 mm, 30 sekunnin ajan. Juostavalla terminoinnilla varustettu MLC-kondensaattorin taipuma on 5 mm. Kondensaattorin ollessa kunnossa sen kapasitanssi arvo voi sallitusti muuttua enintään ± 12 % taivutuksen aikana.



Kuva 4 Kondensaattorin taipuma-testaus (8, s. 12)

Kondensaattorien valmistajat testaavat tyypillisesti myös keraamisten kondensaattorien juotettavuuden, lämpöshokkien kestävyys, juotoslämmön kestävyys, lämpörasituksen ja kosteusrasituksen.

Juotettavuus voidaan testata kastamalla kondensaattori viideksi sekunniksi eutektiseen 230 °C juotokseen, jonka jälkeen kondensaattorien päätyterminaalien pitäisi olla 95 % uuden juotoksen peitossa. Juotoslämmön kestävyttä testataan kastamalla kondensaattori minuutin ajaksi eutektiseen juotokseen, joka on 260 °C astetta. Tämän jälkeen kondensaattori varastoidaan huoneenlämpöön 24 tunniksi ennen mittausten suorittamista. Kondensaattorin ollessa kunnossa sen kapasitanssi arvo voi muuttua $\pm 7,5$ %.

Lämpöshokit testataan neljässä eri vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa keraaminen kondensaattori laitetaan testikammioon puoleksi tunniksi lämpötilaan -55 °C astetta. Toisessa vaiheessa kondensaattorin annetaan olla huoneenlämmössä 3 minuuttia. Kol-

mannessa vaiheessa kondensaattori siirretään takaisin testikammioon +125 °C lämpötilaan puoleksi tunniksi. Viimeisessä eli neljännessä vaiheessa se otetaan huoneenlämpöön 3 minuutiksi. Vaiheet 1-4 toistetaan viiden kerran jaksoissa, mittaukset suoritetaan huoneenlämmössä 24 tuntia uunitusten jälkeen.

Komponentin rasitustestissä kondensaattoriin syötetään kaksinkertainen käyttöjännite, ja se laitetaan testikammioon 1000 tunniksi, 125 °C asteeseen. 1000 tunnin jälkeen kondensaattorin annetaan tasautua huoneenlämmössä 24 tuntia, jonka jälkeen mittaukset tehdään. Kosteusrasituskokeessa kondensaattori jätetään nimellisjännitteisenä testikammioon 1000 tunniksi, +85 °C asteeseen. Vaaditun ajan jälkeen kondensaattorin annetaan tasautua huoneenlämmössä 24 tuntia ennen mittauksia. [8.]

2.7 Keraamisten kondensaattorien vikamekanismit

Vaikka yleisesti keraaminen kondensaattori on hyvin luotettava komponentti, vikaantuvat ne edelleen eri syistä. Tässä luvussa paneudutaan keraamisten kondensaattorien vikaantumisiin ja vikaantumisen mahdolliseen ehkäisyyn.

Vikamekanismi kertoo, miksi komponentti on vikaantunut, esimerkiksi halkeama eristeessä. Vikamoodi taas kertoo vikaan liittyvän oireen esimerkiksi oikosulku tai avoin piiri.

Kondensaattorin elinkaaren alkupäässä tapahtuvat vikaantumiset ovat harvinaisia, mutta eivät mahdottomia. Keraamisen kondensaattorin viat voidaan jaotella kutakuinkin kolmeen ryhmään: valmistuksen aikana tapahtuvat viat, taivuttamisesta aiheutuva murtuminen ja liiallisen lämpörasituksen tuomat viat.

Yleisin syy keraamisen kondensaattorin vikaantumiseen on siihen syntynyt murtuma. Murtumilla on kolme ilmenemistyyppiä, ja ne voivat syntyä monesta eri syystä ja eri vaiheissa kondensaattorin elinikä. Jotkut halkeamista ovat visuaalisesti havaittavissa, mikä on kuitenkin hyvin harvinaista. Osa halkeamista voidaan todeta sähköisillä mittauksilla, mutta pahimmassa tapauksessa halkeamat ovat mikroskooppisen pieniä, jolloin niiden havainnoiminen on mahdotonta.

Murtumat voivat muun muassa syntyä liiallisesta voimasta, joka kohdistuu kondensaattoriin tai muusta mekaanisesta tärähdyksestä, kondensaattorin liiallisesta taittamisesta

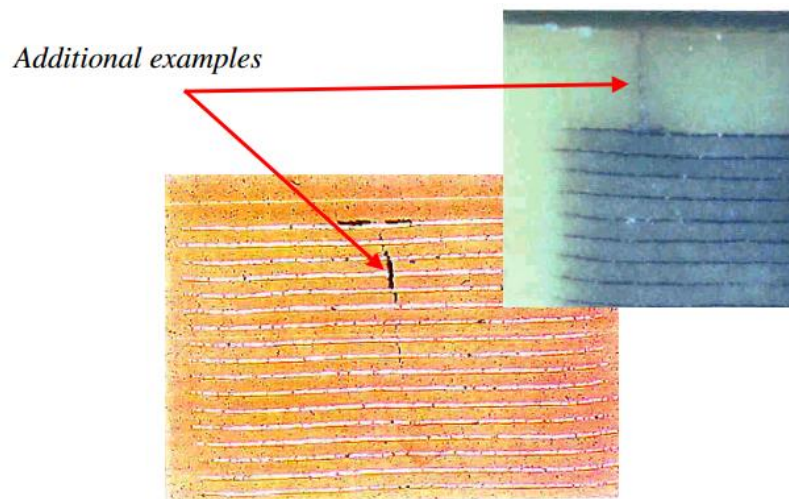
tai lämpötilan aiheuttamasta eri materiaalien laajenemisesta. Murtumisen aiheuttajiksi on myös luettu kondensaattorin fyysinen koko ja paksuus sekä pääty terminaalien materiaali. Halkeaminen voi aiheuttaa kondensaattoriin sisäistä ionista johtamista tai jännitteen vähenemistä eristeen läpi. Eristeen haljetessa ilmarako toimii aluksi kuin kondensaattori mikä tekee vian havaitsemisesta hyvin vaikeaa. Vähentynyt eriste päästää enemmän virtaa kulkemaan sen läpi, joka aiheuttaa suuremman vuotovirran synnyn. [9.]

2.8 Keraamisten kondensaattorin valmistuksessa aiheutuvat viat

Keraamisen kondensaattorin valmistusvaiheessa voi syntyä kolmea erilaista vikaa: polttohalkeama, poikittaissuuntainen halkeama tai ontelo.

2.8.1 Polttohalkeama

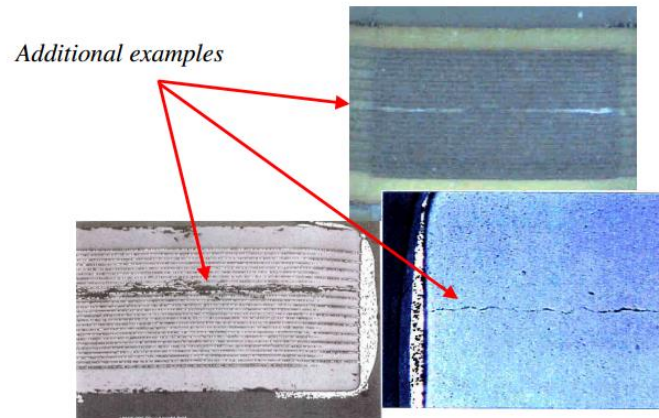
Kondensaattoriin syntyvä polttohalkeama saa alkunsa nopeasta jäähtyksestä valmistuksen aikana. Keraamiset kondensaattorit sintrataan hyvin korkeassa lämpötilassa, tyyppillisesti 1000 °C:ssa. Nopea lämpötilan muutos voi aiheuttaa halkeaman kondensaattorin sisällä, joka yleensä alkaa elektrodin reunasta ja etenee kohtisuoraan niitä vasten. Kuvassa 5 nähdään polttohalkeama, joka etenee kohtisuoraan elektrodeja vastaan. [10.]



Kuva 5 Esimerkki kondensaattoriin syntyneestä polttohalkeamasta (10, s.16)

2.8.2 Poikittaissuuntainen halkeama

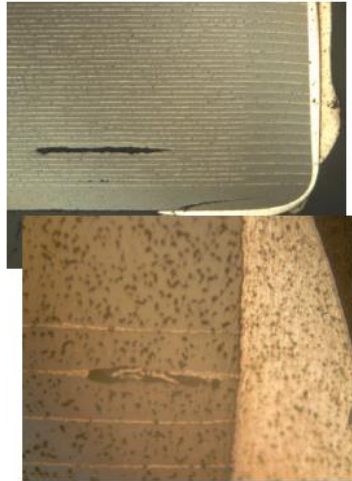
Poikittaissuuntainen halkeama syntyy riittämättömästä puristusvoimasta tai sintrauksesta, jolla elektrodit ja eristeaine sidotaan. Riittävän puristusvoiman puuttuessa syntyy keraamisen kondensaattorin sisälle aukko, johon jää ilmaa tai muuta sinne kuulumatonta ainetta. Halkeamat ovat yleensä hyvin suuria ja rosoisia ja ne etenevät samassa suunnassa elektrodien kanssa, kuten voimme nähdä kuvasta 6. [6,10.]



Kuva 6 Esimerkki kuva kondensaattoriin syntyneestä poikittaissuuntaisesta halkeamasta (10, s.19)

2.8.3 Ontelot

Ontelot MLC-kondensaattorissa, kuvassa 7, syntyvät orgaanisista ja epäorgaanisista epäpuhtauksista keraamisessa eristeessä ja ei-optimoidusta polttamisesta. Kahden tai useamman elektrodin siltautuessa ne luovat polun vuotovirrälle sekä luovat piilevän sähköisen vian. Suuret ontelot voivat johtaa kapasitanssiarvon pienenemiseen. [6,10.]

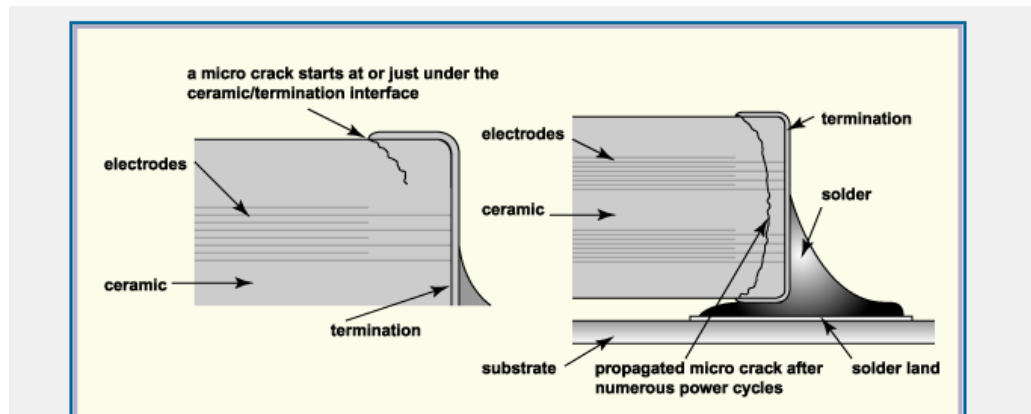


Kuva 7 Esimerkki kuva kondensaattoriin jääneestä onkalosta (10, s. 20)

2.9 Lämpöshokin aiheuttama murtuma

On huomattu, että juottaminen ja lämpötilan vaihtelu aiheuttavat pintaliitoskomponenttien halkeamista. Tämä voi johtua suuresta lämpörasituksesta, mikä kohdistuu komponenttiin juotoksen jäähmettyessä. Kooltaan suuremmat pintaliitoskomponentit (kotelokoot 1812, 2220) kokevat suuremman lämpörasituksen, koska suuremmat juotospadit keräävät itseensä enemmän juotosta kuin pienet tai läpijuotettavat komponentit, jotka haihduttavat lämmön nopeammin ympäriltään kuin suuremmat komponentit. Voidaan siis todeta, että suuremmat pintaliitoskomponentit ovat herkempiä rikkoutumaan lämpöshokin seurauksena.

MLC-kondensaattorit murtuvat herkästi ympäristön tai juotoslämpötilan vaihdellessa. Lämpöshokista aiheutuvat murtumat syntyvät liiallisesta lämpötilan vaihtumisesta esimerkiksi aaltojuotoksessa, sulatusjuotoksessa tai korjausjuottamisen aikana. Lämpötilan tai jännitteen vaihtelu edistää halkeaman kasvamista. Suurin vetolujuus tapahtuu päätyterminaalin lähetyvillä aiheuttaen mikrohalkeaman kondensaattorin päätyterminaalin läheisyydessä, kuten kuvasta 8 voidaan nähdä. [6.]



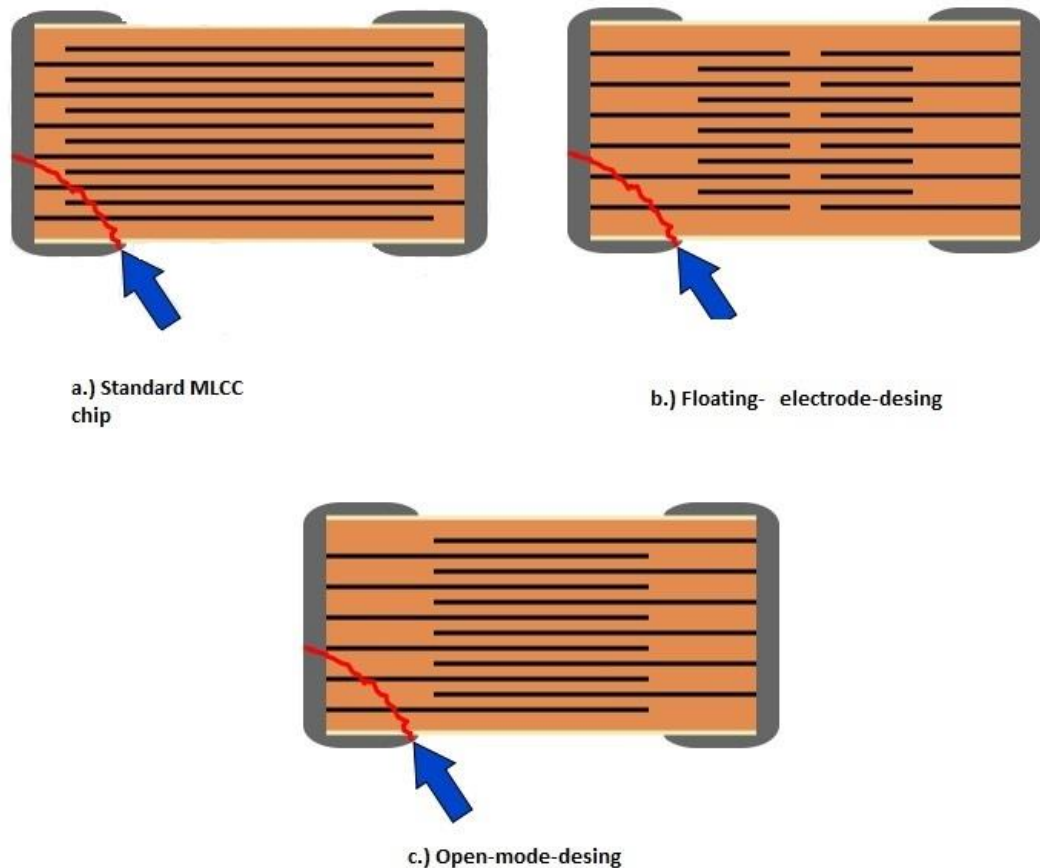
Kuva 8 Keraamisessa kondensaattorissa esiintyvä mikromurtuma (Wikipedia, micro crack in ceramic capacitor)

Komponenttien luotettavuutta voidaan parantaa valitsemalla sopivat juotosolosuhteet. Useimmat aaltojuotoksessa tapahtuvat ongelmat voidaan ratkaista kontrolloimalla esilämmitystä ja vähentämällä juotuslämpötilaa (235 - 245 °C). Suositeltavaa on, ettei MLC-kondensaattoreissa lämpötilanvaihtelu ylitä 2 °C astetta sekunnissa. Mikrohalkeamia on todettu syntyvän myös käsin tehdyistä korjausjuotoksesta tai esilämmityksen aikana lämpötilan vaihdellessa suuresti. [6.]

2.10 Taivutusmurtuma

Keraamiset kondensaattorit ovat hyvin herkkiä liialliselle taivuttamiselle, joka on yksi yleisimmistä keraamisen kondensaattorin vikaantumissyistä. Piirilevyn taivuttamisesta syntyvä jännitys on suurimmillaan kondensaattorin pohjassa. Jos kondensaattoriin kohdistuva jännitys ylittää sen murtolujuuden, kondensaattori murtuu. Kondensaattorin keraaminen materiaali, juotos ja päätyterminaalien materiaalit vaikuttavat voimaan joka rikkoo kondensaattorin. Elektrodirakenne vaikuttaa taivutusmurtuman rakenteeseen, kuten kuvassa 9 nähdään.

Liiallisesta taivuttamisesta aiheutuva halkeaminen voi syntyä muun muassa kokoonpanon prosessien aikana. Prosessi voi olla esimerkiksi sulatusjuotos, testaus, kokoonpano tai komponentin kiinnitys muihin osiin. [11.]



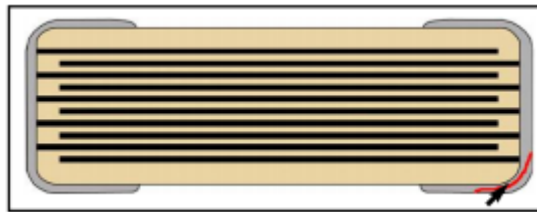
Kuva 9 Kondensaattoriin syntyvä taivutusmurtuma erilaisissa elektrodrakenteissa.

Kuvassa 9 kohta a kuvastaa tyypillistä MLC-kondensaattorin rakennetta, jossa kondensaattoriin syntymä murtuma kulkee eri potentiaalissa olevien elektrodien läpi luoden niiden välille oikosulun. Kohdassa b on kuvattu kelluvaa elektrodirakennetta, jossa syntynyt murtuma kulkee kahden saman potentiaalin elektrodin läpi, jolloin ei synny oikosulkua vaan kondensaattorin kapasitanssiarvo laskee. Kohta c edustaa kondensaattorimallia, jossa elektrodit ovat huomattavasti lyhyempiä, ja tähän syntynyt halkeama kulkee kohdan b tavoin, jolloin oikosulkua ei synny, mutta kapasitanssiarvo laskee.

Kondensaattorien valmistajat ovat kehittäneet joustavan päädyterminaalirakenteen, jonka tarkoituksena on estää erilaiset keraamisissa kondensaattoreissa tapahtuvat halkeamat. Uudet joustavat kondensaattorin päädyn terminaalit on suunniteltu erityisesti parantamaan mekaanisia ja lämpötilan aiheuttavia taivutuksia. Ne koostuvat johtavasta polymeeristä, joka tyypillisesti koostuu hopeasta ja epoksista, jossa hopea tuo sähköisen

johtavuuden ja epoksi joustavuuden. Rakenne takaa sähköisen toimivuuden taivutusrasituksesta huolimatta. Sitä käytetään sekä jalometalli- että perusmetallielektrodien kanssa.

Juostavien terminaalien ansiosta kondensaattori halkeaa taivutuksen seurauksena kuvan 10 osoittamalla tavalla. Joustavilla päädyillä ei synny halkeamia kondensaattorin keeramisiin osiin tai runkoon. Sen sijaan jos murtuma tapahtuu, murtuu kondensaattorin pääty. [12.]



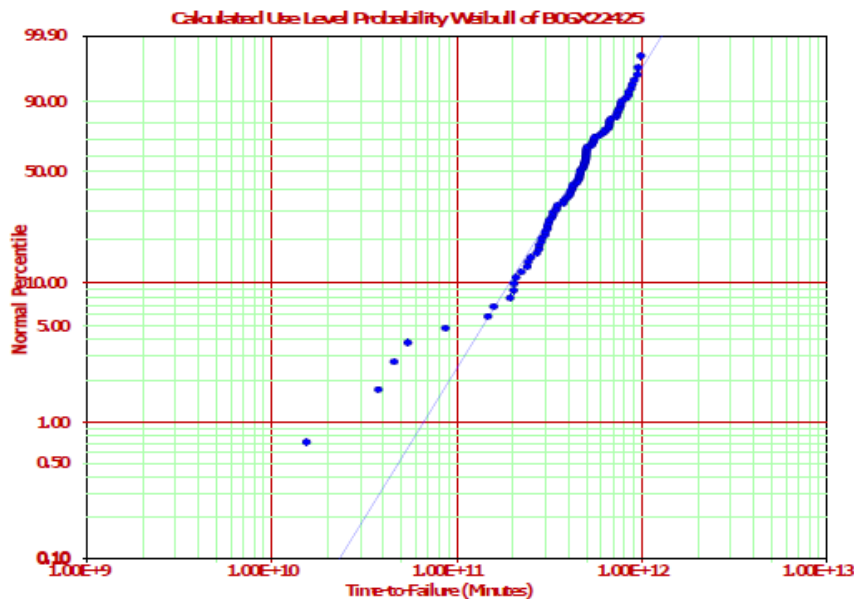
Kuva 10 Kondensaattorin halkeaminen joustavilla päädyterminaaleilla

Kustannukset ovat aina ratkaiseva tekijä tietyn komponentin käyttöä ajatellen. Suunnitteluvaiheessa on tärkeää tunnistaa mahdolliset riskit, jos sovelluksessa esiintyy taivuttamista ja täten päättää, kannattaako joustavia päädyterminaaleja käyttää. Joustavilla päädyterminaaleilla varustettu kondensaattori on kalliimpi kuin normaalit kondensaattorit, mutta jos vikaantumisia voidaan täten estää, säästetään kustannuksissa huomattavasti. Ennen joustavan päädyterminaalin valitsemista kannattaa tehdä riskikartoitus esimerkiksi venymäliuskamittauksella.

2.11 Keraamisen kondensaattorin eristeongelmat

Intel Corporation on raportoinut vuonna 2010 mahdollisista vikamekanismeista BaTiO₃-pohjaisissa MLC-kondensaattoreissa, joissa eriste on ohut. Yleisesti on esitetty, että MLC-kondensaattori voi kestää tuhansia vuosia rikkoutumatta, mutta kondensaattorin tilavuushyötysuhdetta nostettaessa eristekerroksen paksuus vähenee, jolloin se tulee alttiimmaksi vikaantumiselle. On myös tutkittu, että MLC-kondensaattorit, joissa on enemmän eristekerroksia aiheuttavat enemmän haasteita eristeen materiaalin luotettavuudelle. [3.]

Niin sanottu aikainen vika on pääsyy MLC-kondensaattorin luotettavuuden tippumiseen pienillä eristepaksuuksilla. Odottamaton vika syntyy ulkoisesta kuormituksesta, joka johtaa vyörymäiseen vuotovirran kasvuun. Tämä odottamaton vika johtuu valmistusvirheestä kondensaattorin valmistusvaiheessa. Kuvassa 11 nähdään esimerkki NASAN tutkimuksesta [3] kondensaattorin vikaantumisprosentista ajan funktiona. Kuvasta voimme nähdä kondensaattorin vikaantumisiin sovitetun käyrän.

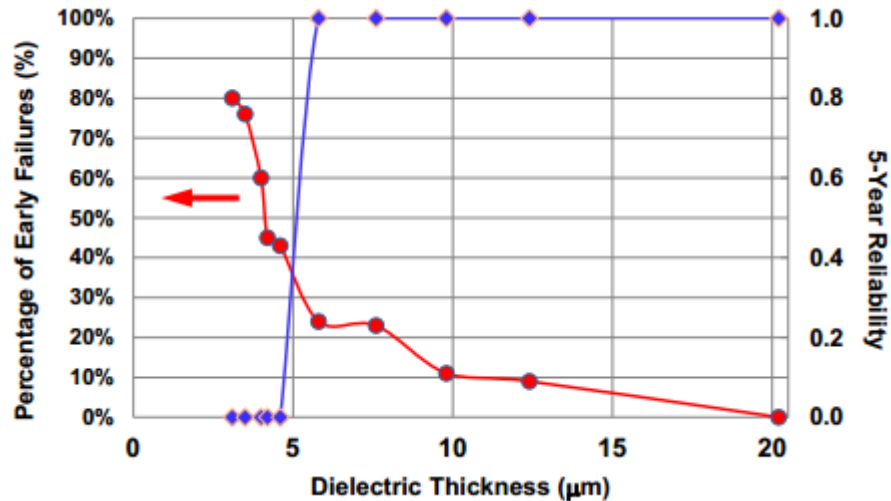


Kuva 11 Kondensaattorien vikaantumisprosentti ajan suhteen (3, s. 65)

Ennen normaalia kulmista aiheutuvat viat voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

1. Vikaantumisiin, jotka tapahtuvat heti, kun kondensaattori varataan ensimmäisen kerran. Näitä vikoja ei edes piirretä yllä olevaan kuvaan.
2. Vikaantumisiin, jotka tapahtuivat kiihdytettyllä elinikätestillä kaavan 8 mukaan. Kuvassa pisteet jotka eivät sovi sovitettuun käyrään.
3. Vikaantumisiin, jotka tapahtuivat hyvin aggressiivisissa testiolosuhteissa. Hyvin aggressiivinen testi luo uuden vikamekanismin, eikä näin ollen vastaa todellisen sovelluksen vikaantumisia.

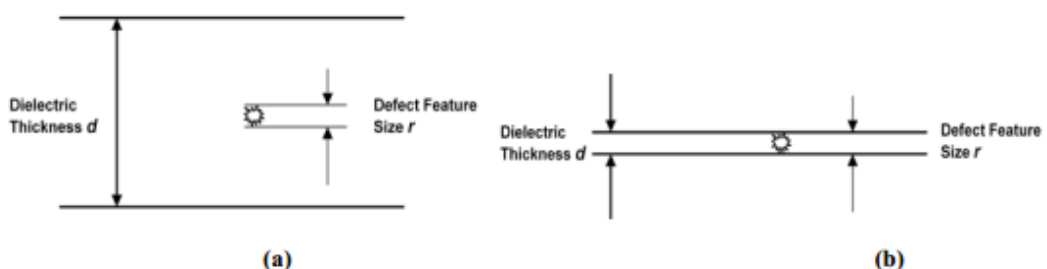
Oheisessa kuvassa 12 NASA on esittänyt kokeellisesti määritellyn aikaisen vian prosentteina eristeen paksuuden funktiona. Samassa kuvassa on myös esitelty viiden vuoden



Kuva 12 Kondensaattorissa esiintyvät aikaiset viat eristeen paksuuden funktiona

luotettavuus. Kuvasta voimme huomata, että samassa kiihdytetyssä elinikätestissä olleissa komponenteissa, aikaisen vikaantumisen prosenttiosuus kasvaa eristeen paksuuden pienentyessä. Voimme siis päätellä niin sanotun uuden vikatilanteen tullessa esiin, kun eristekerroksen paksuus on alle $6 \mu\text{m}$.

Vaikka aikaiset viat johtavat vuotovirran vyörymäiseen kasvuun, johtuu vikaantuminen liiallisesta lämpöstressistä, joka syntyy nopeasta lämpötilan vaihtumisesta. Liiallisesta lämpöstressistä vuotovirta kasvaa, jolloin kondensaattori tuottaa liikaa lämpöä tuhoten eristeen rakenteen. MLC-kondensaattoreissa vyörymäinen rikkoutuminen on kuitenkin erilaista kuin esimerkiksi avalanche-diodissa. Tämä johtuu siitä, että lämpöjohtavuus keraamisessa BaTiO_3 materiaalissa on yli 100 kertaa pienempi kuin piipohjaisessa diodissa, jolloin vyörymäisen vuotovirran aiheuttama massiivinen lämpö ei ehdi haihtua tarpeeksi nopeasti estääkseen nopean lämpötilan nousun keraamisessa kondensaattorissa.



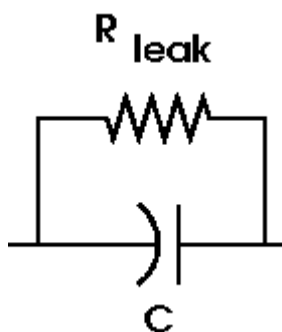
Kuva 13 Kondensaattorin eristeen paksuuden d vaikutus, vian koolla r .

Kuvasta 13 voidaan nähdä eristeen paksuuden vaikutus aikaisiin vikaantumisiin. Kohdassa a voidaan huomata, että eristeen paksuuden ollessa suuri, ei vika vaikuta kondensaattorin toimintaan. Kohdassa b eristeen paksuuden ollessa pieni aiheuttaa vika kondensaattorissa läpilyönnin, joka johtaa vuotovirran kasvuun. Aikaiset viat voivat käytyä kahdella tapaa: joko ne pysyvät hyvänlaatuisina pitkään (jopa yli niiden vaaditun eliniän) tai ne voivat aiheuttaa katastrofaalisia eristevahinkoja riippuen ulkoisesta kuorimituksesta tai eristekerroksen paksuudesta.

Yhteenvetona voidaan todeta, että aikainen vika syntyy rakennusvirheestä MLC-kondensaattorin valmistuksen aikana. Useimmat viat johtuvat eristeaineen rakeiden epähomogeenisesta rakenteesta tai saastumisesta muodostettaessa BaTiO_3 :a. Eristeaineen paksuus, vian ominaiskoko, eristeaineen keskimääräinen raekoko ja eristekerrosten määrä vaikuttavat MLC-kondensaattorin luotettavuuteen. [3.]

2.12 Vuotovirta

Edellä mainittiin, että kondensaattorin sisäinen resistanssi on suuri, noin 100000 $\text{M}\Omega$. Kondensaattorin läpi kulkee virtaa, mutta se on äärimmäisen pieni, vain muutamia mikro- tai nanoampeereita, jolloin voidaan ajatella virran olevan lähes nolla. Tätä pientä virtaa ei siis tarvitse huomioida kondensaattoria mitoittaessa. Kuvasta 14 voidaan nähdä kondensaattorin sisäinen vastus.



Kuva 14 Kondensaattorin sisäinen vastus R_{LEAK} (Wikipedia, capacitor insulation resistance)

Kun kondensaattori vuotaa, eli sen läpi kulkee vuotovirtaa, kondensaattorin sisäisen vastuksen arvo on laskenut huomattavasti. Vastuksen arvo on tuolloin noin 100000 Ω . Sisäisen vastuksen arvon aleneminen voi johtua muun muassa mikrohalkeamista, epä-

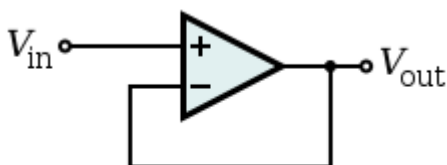
puhtauksista keramiikassa, valmistustilanteissa kondensaattoriin jääneistä tyhjiä tiloista tai ulkoisen elektrodin materiaalin, esimerkiksi hopean muutosliikkeistä. Eli kondensaattorin vastusarvon laskiessa virta kasvaa vaikuttaen kondensaattorin toimintaan.

2.13 Operaatiovahvistinkytkennät

Koska työssä käytetään monta eri operaatiovahvistinkytkentää, on niiden toimintaan syytä paneutua. Työssä käytettävät operaatiovahvistinkytkennät ovat jänniteseuraaja, oskillaattori ja vahvistin.

2.13.1 Jänniteseuraaja

Yksinkertaisin operaatiovahvistinkytkentä on jänniteseuraaja, kuvassa 15, jossa käytetään negatiivista takaisinkytkentää ja vahvistus kytkennässä on aina 1, jolloin $V_{IN} = V_{OUT}$.



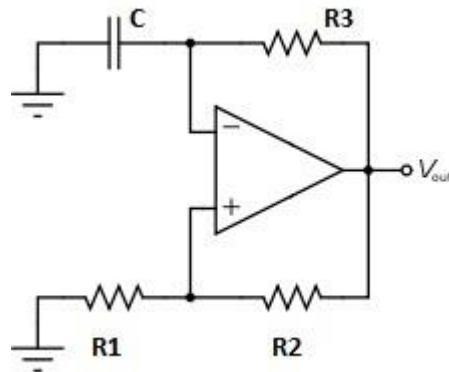
Kuva 15 Perus operaatiokytkentä jänniteseuraajalle (Wikipedia, jänniteseuraaja)

Koska operaatiovahvistimen sisäinen tuloimpedanssi on suuri (reaalisessa noin 1 M Ω), virta ei kulje operaatiovahvistimen sisään, jolloin se ei kuormita muuta piiriä. Toisaalta sen lähtöimpedanssi on puolestaan pieni, jolloin sitä voidaan kuormittaa huomattavasti enemmän kuin tulopiiriä.

2.13.2 Oskillaattori

Perus operaatiovahvistin muutamalla lisäkomponentilla muodostaa oskillaattorin, eli värähtelijän. Piiri muodostuu vastuksista ja kondensaattorista sekä operaatiovahvistimella toteutetusta vahvistimesta ja takaisinkytkennästä. Operaatiovahvistimen alapuolella olevat vastukset, kuvan 16 mukaan, kytkeytyvät + jalkaan muodostaen vertailujännitteen operaatiovahvistimen ei-kääntävälle tulolle. Piirissä oleva kondensaattori ja vastus sen

sijaan muodostavat aikavakiopiirin, joka määrittää toimintataajuuden. Vastuksen tai kondensaattorin arvoa muuttaen voidaan toimintataajuutta muuttaa. [13.]



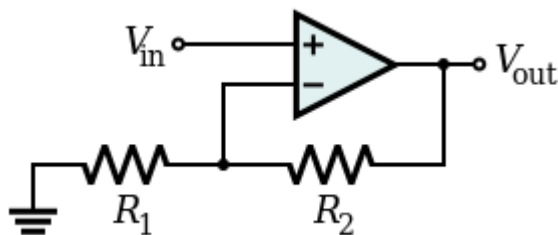
Kuva 16 Perus oskillaattorimalli (Wikipedia, oskillaattori)

Jotta oskillaattori alkaisi värähdellä, tulee jännitevahvistuksen olla tarpeeksi suuri. Vahvistus G voidaan laskea käyttämällä kaavaa:

$$G = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (10)$$

2.13.3 Ei-invertoiva vahvistin

Operaatiovahvistimella tehtäviä vahvistuksia on kahdenlaisia: kääntäviä ja ei-kääntäviä. Kääntävät vahvistimet nimensä mukaan kääntävät tulevan signaalin napaisuuden. Ei-kääntävässä, kuten kuvassa 17, napaisuus pysyy samana. Vahvistus ei-kääntävällä vahvistimella määritellään vastusten R_1 ja R_2 avulla, ja se on aina suurempi kuin yksi.



Kuva 17 Operaatiovahvistin kytkentä: Ei-invertoiva vahvistin (Wikipedia, ei-invertoiva vahvistin)

Vahvistimen lähtöjännite saadaan laskettua kaavasta:

$$V_{\text{OUT}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \cdot V_{\text{IN}} \quad (11)$$

3 Kondensaattorien testauslaitteen suunnittelu ja toteutus

3.1 Testauslaitteelle asetetut vaatimukset

Kuten edellä mainittiin, keraamisten kondensaattorien luotettavuus on yksi puhuttavimmista asioista nykyelektronikassa. MLC-kondensaattorien testilaitteella pyritään todentamaan kondensaattorien luotettavuutta syöttämällä niihin katkottua tasajännitettä ja mittaamalla niiden läpi mahdollisesti kulkevaa vuotovirtaa. Testaamalla eri valmistajilta tulleita komponentteja voidaan huomata mahdolliset eroavaisuudet eri kondensaattorivalmistajien kesken. Testilaitteella pyritään kuormittamaan kondensaattoreita eri tavoin, kuten kytkentätaajuutta ja pulssileveyttä säätämällä. Testilaitteelle annetut vaatimukset ovat seuraavat:

- Kondensaattoreita tulee testata katkotulla tasajännitteellä.
- Kytkentätaajuuden tulee olla säädettävissä 5 kHz:iin asti ja sen tulee olla luettavissa.
- Pulssinleveysmodulaation tulee olla säädettävissä, suhteella 20 - 80 %.
- Jokaiselle kondensaattorille tulee suunnitella oma mittauspiiri ja siihen kuuluva valvonta, esimerkiksi LED, joka kertoo kondensaattorin olevan vuotava.
- Testilaitteella tulee voida testata kerralla 100 kappaletta MLC-kondensaattoreita, jotka ovat koteloko'oiltaan 1206, 1210, 1812 tai 2220.
- Testattavat kondensaattorit tulevat olemaan jännitearvoltaan 25 V, 50 V, koteloko'oilla 1206 ja 1210 ja 1000 voltin kondensaattorit koteloko'oiltaan 1812 ja 2220.

Työtä päätettiin rajata toteutuksen osalta suunnittelun alkuvaiheessa. Ensimmäinen raja on, että testilaitte toteutetaan analogisena, jolloin työssä keskitytään pelkästään laitteiston suunnitteluun. Toinen raja on mittauslaitteen layoutin alihankinta ajan puutteen vuoksi. Työssä pyritään yhdistämään laitteen kompakti koko käytön helppouteen.

3.2 Suunnittelussa käytetyt työkalut

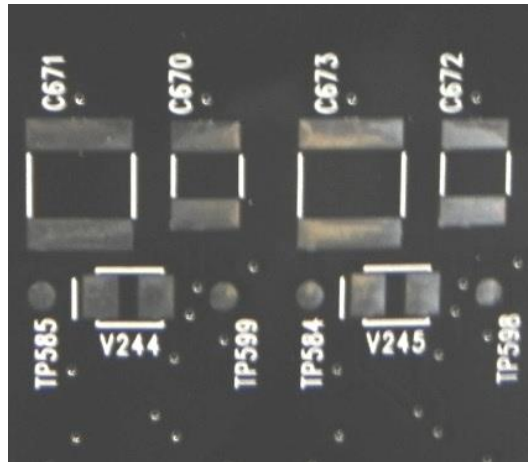
Työn suunnittelu aloitettiin simuloimalla kytkentöjä LTSpice- ja OrCAD capture- nimisillä ohjelmilla. Työstä rakennettiin myös testikytkentä, jotta suurin osa kytkennöistä saatiin todennettua toimiviksi.

Mittauslaite on suunniteltu käyttämällä PADS logic- ohjelmaa ja piirilevyn layout ohjeistettiin ja sen suunnittelu tilattiin alihankkijalta. ABB käyttää PADS-ohjelmistojen kanssa Omnify-nimistä komponenttietokantaa, josta halutut komponentit on helppo valita ja josta ne siirtyvät suoraan PADSin editoriin.

3.3 Testauslaitteen rakenne

Tässä aliluvussa käydään läpi testilaitteen lopullinen rakenne osakokonaisuuksineen perheiden käytettyihin komponentteihin, niiden toimintaan ja valintaan.

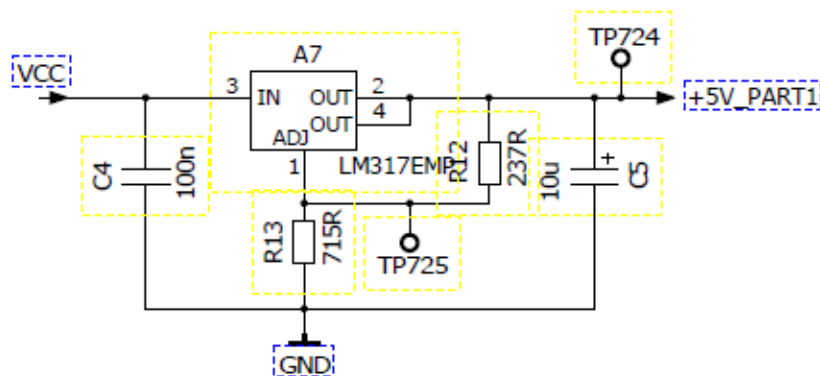
Testipiirikortti on suunniteltu niin, että kerrallaan yhteen korttipohjaan kalustetaan 100 kappaletta joko 25 tai 50 voltin kondensaattoreita sekä 100 kappaletta jompaakumpaa kotelokkoa olevaa 1000 voltin kondensaattoria. Eli yhteen korttipohjaan kalustetaan kerralla pien- ja suurjännitteisiä kondensaattoreita, joita voidaan mitata vuorotellen.



Kuva 18 1000 voltin kondensaattorien layout, jossa näkyy kondensaattoreiden kalustuspaikat (PADS layout, CADMIC 2014)

Kuvasta 18 voidaan nähdä 1000 voltin kondensaattoreiden kalustamaton layout. Kuvassa C_{671} ja C_{673} ovat kotelokokoa 2220 ja C_{670} ja C_{672} ovat kotelokokoa 1812. Jokaisen mittauspiirin LED on kalustettu kondensaattoreiden eteen, jotta viallinen kondensaattori olisi helpompi havaita. Kuvan 18 mukaisia lohkoja, jotka koostuvat mitattavasta kondensaattorista, mittauspiiristä ja LED:stä, esiintyy piirilevyllä 100 kappaletta pien- sekä suurjännitteisenä.

Mittauspiirin ylikuumentumisen estämiseksi suunniteltiin aina 25 mittauspiirille oma +5 voltin jännitteensyöttö. Tämä toteutettiin käyttämällä perusregulaattoria kuvan 19 mukaan.



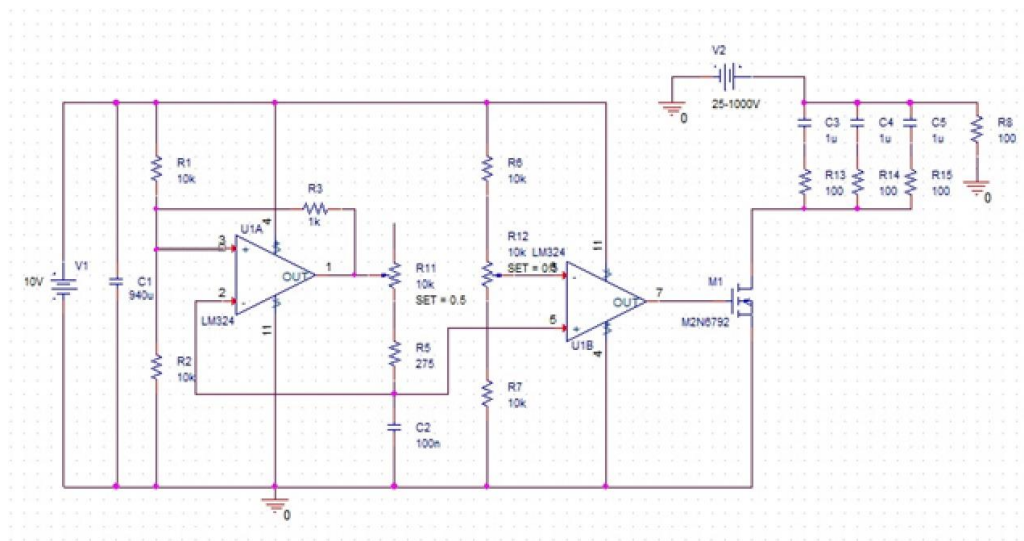
Kuva 19 +5 voltin regulaattoriipiiri

Regulaattorina käytetään LM317-piiriä, joka on yleinen ratkaisu samankaltaisissa sovelluksissa. Hyvin paljon tekniikassa käytetty kytkentä on katsottu piirin valmistajan datalehdeltä. Ulostulojännite voidaan määrittää kaavan 12 mukaan. [14.]

$$V_{OUT} = 1,25 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ}(R_2) \quad (12)$$

3.3.1 Taajuuden ja pulssinleveyden säädön toiminta

Työssä taajuuden ja pulssinleveyden säätöön käytettiin LM324-operaatiovahvistinpiiriä kuvassa 20. Se koostuu neljästä itsenäisestä taajuuskompensoidusta teho-operaatiovahvistimesta, jotka on suunniteltu toimimaan laajalla skaalalla yksipuoleisella jännitteellä.

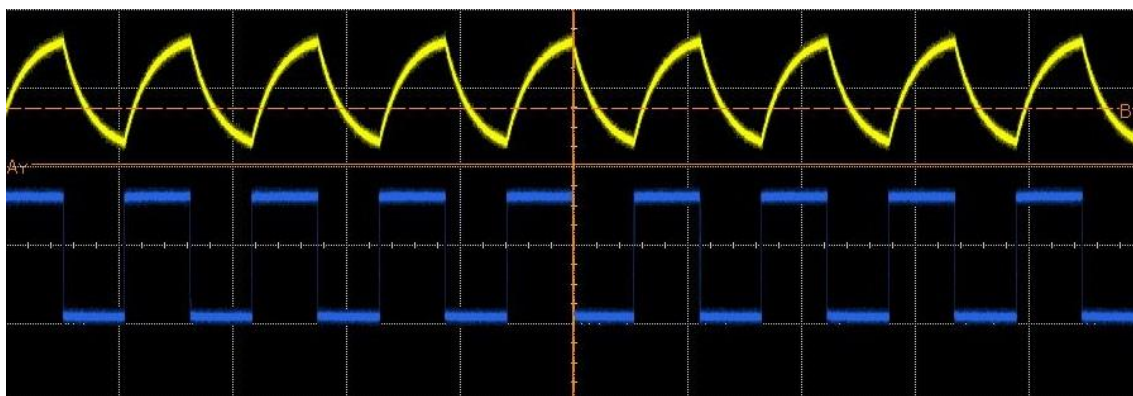


Kuva 20 Taajuuden ja pulssinleveyden säätö (OrCAD Capture Viivi Tamminen 2014)

Kuvassa 20 nähdään oskillaattorimalli, jota on käytetty taajuuden ja pulssinleveyden säätöön. Kuvassa C₃, C₄ ja C₅ edustavat mitattavia MLC-kondensaattoreita. Potentiometrillä R₁₁ taajuutta voidaan säätää välillä 100 Hz – 5 kHz ja potentiometrillä R₁₂ voidaan pulssinleveyttä säätää 20 – 80 %. Muuttamalla vastuksen R₅ ja kondensaattorin C₂ arvoja voidaan kytkeä taajuuden arvoa säätää. Nämä kaksi komponenttia luovat aikavakiopiirin. [15.]

Kun ensimmäisen operaatiovahvistimen ulostulo on positiivinen, alkaa ajastinkondensaattori latautua, kunnes se ylittää 2/3 piirin käyttöjännitteestä, kuten kuvassa 21 voidaan nähdä. Tulojännitteen eron muuttuessa negatiiviseksi kondensaattori purkaa varausaan, kunnes sen arvo on hieman alle 1/3 käyttöjännitteestä. Tulojännitteen muuttuessa taas positiiviseksi muuttuu myös operaatiovahvistimen ulostulo saaden kondensaattorin taas latautumaan. Operaatiovahvistimille on luotu jännitteen jako, jotta kondensaattori

voi saavuttaa annetut rajat. Sykli toistaa itseään ja taajuuden suuruus riippuu potentiometrin asennosta.



Kuva 21 Ensimmäisen operaatiovahvistimen ulostulo, kondensaattorin varaus ja purkaus

Ensimmäisen operaatiovahvistimen ulostulo potentiometrin jälkeen on saha-aallon muotoinen ja kyseinen jännite tuodaan toisen operaatiovahvistimen sisääntuloon. Tämä vertaa kyseistä jännitettä toisella potentiometrillä säädettävissä olevaan tasajännitteeseen. Vertaamalla säädettyä tasajännitettä ja saha-aaltoa keskenään saadaan toisen operaatiovahvistimen ulostulosta kanttiaaltoa, jolloin pulssin leveyttä voidaan säätää. Kyseinen kantti-aalto tuodaan MOSFET:n ohjausjännitteeksi.

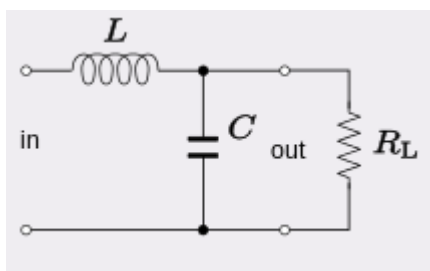
Oskillaattori päätettiin toteuttaa käyttäen operaatiovahvistinparia työn alkurajauksen vuoksi. Kuten mainittu mittauslaite päätettiin pitää analogisena, jolloin taajuuden- ja pulssinleveyden säätöä ei voida toteuttaa mikrokontrollerilla. Mikrokontrollerin käytön tuoma ohjelmointi vie huomattavasti aikaa itse laitteiston suunnittelusta, jolloin siitä tulee suuri osa työtä. Mikrokontrolleri ei ole työn lopputuloksen kannalta merkittävä, mutta sitä voidaan pitää loistavana jatkokehitys mahdollisuutena. Sillä voitaisiin mahdollistaa automaatio esimerkiksi testisekvensseihin.

Koska mikrokontrolleri ei ole käytössä, mittalaitteen aikasignaali tarvitsee toteuttaa erillisellä piirillä. Ajastinpiiri 555 on hyvin tunnettu ja paljon elektroniikassa käytetty komponentti, jota lähdettiin referoimaan heti työn alussa. Jotta pulssinleveyttä ja taajuutta voitaisiin säätää riippumatta toisistaan, tarvitaan kaksi referenssisignaalia. Yhtä ajastinpiiriä käyttämällä voidaan kuitenkin saavuttaa vain yksi referenssisignaali, jolloin yhdellä ajastinpiirillä toteutettu taajuuden ja pulssinleveyden säätö on mahdotonta.

Kahden referenssisignaalin luonti onnistuu oskillaattorilla, joka on toteutettu käyttäen operaatiovahvistinparia sekä muutamaa lisäkomponenttia. Operaatiovahvistinparilla toteutettu oskillaattori on luotettava ja se täyttää työn vaatimukset yksinkertaisuudesta sekä kompaktista koosta. Oskillaattorin toimivuuden toteamiseksi testikykentä on rakennettu koekytkentä alustalle.

3.3.2 Alipäästösuodin

Kuten edellä mainittiin, ensimmäisen operaatiovahvistimen ulostulo potentiometrin jälkeen on saha-aallon muotoista. Jotta LED ohjainta pystytään ohjaamaan, tulee siihen syötettävän jännitteen olla tasajännitettä. Tämä pystytään toteuttamaan alipäästösuodattimella, joka koostuu kuvan 22 mukaisesti kelasta, kondensaattorista ja vastuksesta.

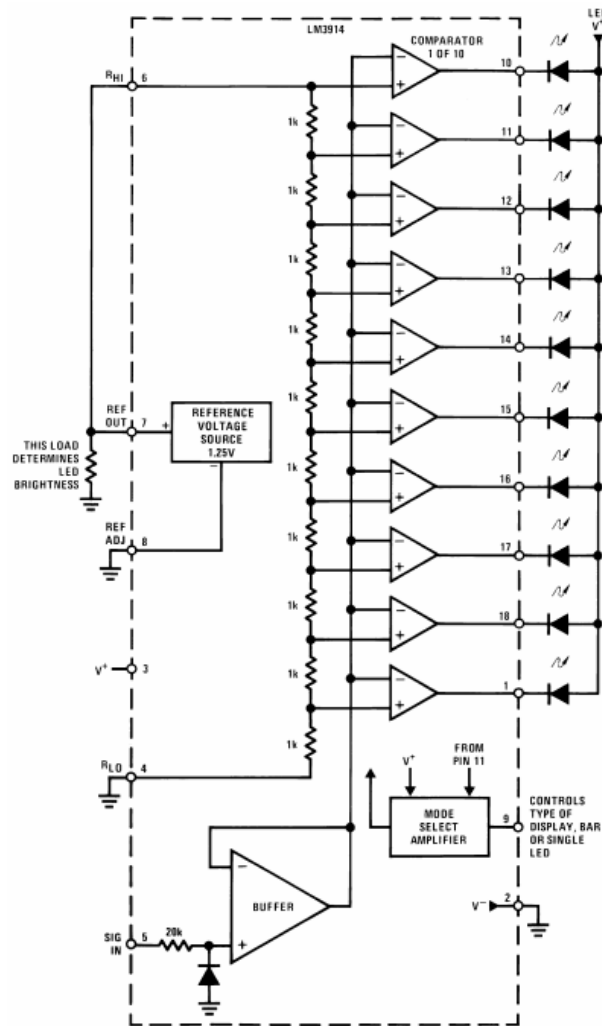


Kuva 22 RLC-suodin kytkentä (Wikipedia, RLC-suodin)

RLC-suodattimella suodatetaan aaltomuodosta kaikki vaihtojännitekomponentit pois, jolloin jäljelle jää vain tasajännitekomponentti. Matalat taajuudet pääsevät kulkemaan kelan läpi, kun taas korkeat taajuudet jäävät kondensaattoriin. RLC-suodattimen ulostulona on siis pelkkä tasajännitekomponentti.

3.3.3 Taajuusnäyttö

Taajuusnäyttö on toteutettu LM3914 LED- ohjainpiirillä kuvassa 23. Se on monoliittinen integroitu piiri, joka tunnistaa analogiset jännitetasot ja ohjaa kymmentä LEDiä tarjoten analogisen lineaarisen näytön. Piiri sisältää oman säädettävän referenssin ja tarkan 10 askeleen jännitteen jakajan.

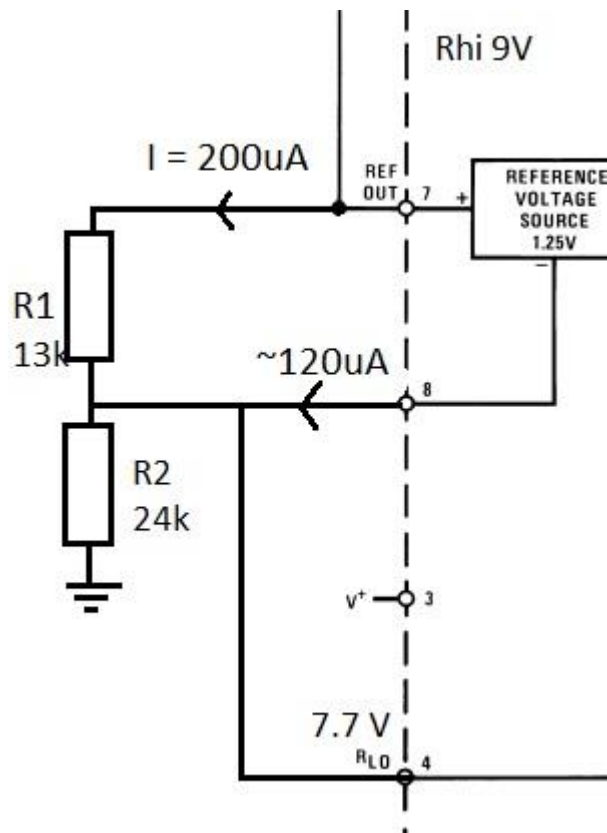


Kuva 23 LM3914 LED-ohjain piiri (15, s.8)

Yksinkertaisimmillaan piiri toimii siten, että piirin ohjaussignaali tulee nastaan 5, josta se operaatiovahvistimen kautta syötetään kymmenelle piirin sisällä ovella komparaattorille. Komparaattorit vertaavat sisälle tulevaa jännitettä sisäiseen vastusjonossa olevaan jännitteeseen. Yksinkertaisimmassa sovelluksessa R_{LO} (referenssijännitteen alaraja) on nolla pisteen ollessa kuvan 23 mukaisesti maissa. Jännitteen noustessa syttyy ensin LED_1 , jonka jälkeen LED_2 ja niin edelleen, kunnes jännite on saavuttanut täyden arvonsa. Jos sovellukseen ei ole ulkoisesti lisätty muita komponentteja, olettaa piiri käyttävän sen sisäistä referenssijännitettä eli 1,25 voltia tarkoittaen sitä, että jännite on 0 – 1,25 V ja jokainen LED syttyy 0,125 voltin välein. [16.]

Kun ensimmäisen operaatiovahvistimen ulostulo on saatu tasajännitteeksi, saadaan LEDien ohjaus toteutettua pelkästään kahdella vastuksella kuvan 24 mukaan. Testikytkentä

on tehty, jotta LED-ohjaimen ohjausjännitteen tasot tiedetään RLC- suodattimen jälkeen. Kytkenästä voitiin huomata ohjausjännitteen olevan 7,7 – 9 voltia, joka on suoraan verrannollinen taajuuteen.



Kuva 24 LEDien ohjaus, mitoitetut vastukset ja datalehdeltä luetut virrat (PADS Logic: Viivi Tamminen 2014)

Määritellään siis, että R_{HI} on 9 V ja R_{LO} on 7,7 V, jolloin niiden erotukseksi jää referenssijännitteeksi 1,3 V. Tämä jännite voidaan kuvitella olevan siis sama kuin piirin sisäinen referenssijännite 1,25 V, tarkoittaen sitä että LEDit syttyvät 0,125 voltin ja 500 Hz:n välein. Vastukset R_1 ja R_2 on sijoitettu kuvan 24 mukaan. Piirin datalehdellä on annettu seuraava kaava LEDien virran mitoittamiseen [16.]:

$$I_{LED} = \frac{12,5}{R_1}, \quad (13)$$

LEDien läpi kulkevan virran halutaan olla mahdollisimman pieni. Tässä virraksi on määriteltä 2 mA. Nyt vastus R_1 ja sen läpi kulkeva virta voidaan laskea ohmin lain mukaisesti. Vastuksen läpi kulkevaa virtaa laskiessa jännitteenä käytetään piirin sisäistä referenssijännitettä. Vastusta mitoittaessa on myös huomioitava, että näin kytkettynä se on rinnan piirin sisäisten (10 x 1 k) vastusten kanssa. Huomioitavaa on myös, että piirin datalehdeltä selviää vastusten oikeat arvot, jolloin 1000 Ω :n vastukset ovat oikeasti 1200 Ω ,

jolloin kokonaisvastusjonon arvoksi tulee 12 k Ω , 10 k Ω sijaan. Tällöin oikea R₁:n arvo voidaan laskea seuraavasti:

$$R_1 = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{12K}} \quad (14)$$

Datalehdeltä on selvitetty pinnan 8 virta, joka on noin 120 μ A. Vastusta R₂ laskiessa kyseinen virta tulee huomioida yhdessä vastuksen R₁ läpikulkevan virran kanssa, jolloin vastuksen R₂ läpi kulkevan virran arvoksi saadaan 320 μ A.

Eli kytkentä toimii siten, että potentiometriä säätämällä LEDit syttyvät yksitellen 500 Hz:n välein 5 kHz:iin asti.

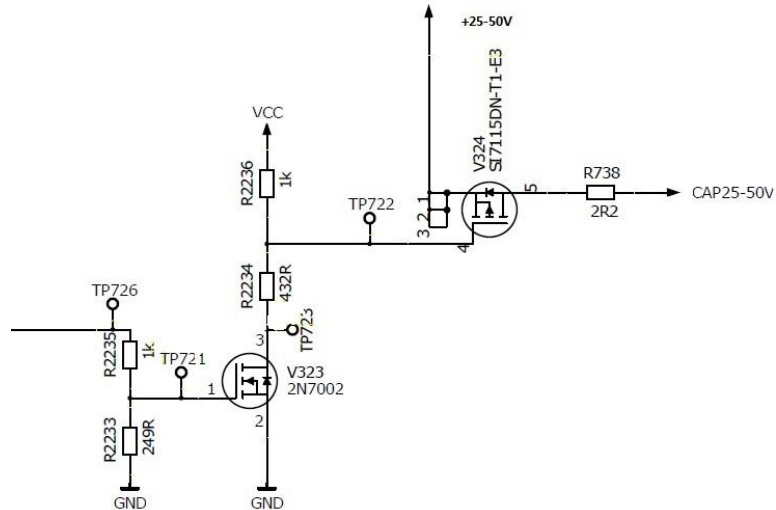
LED:ien ohjauspiiriksi mietittiin Siemensin UAA180- sekä Linear Technologyn LT3754-piirejä, mutta molempien piirien haittapuolena oli useamman kuin kymmenen LED:n ohjaaminen. UAA180- piirillä ohjataan yhteensä 12 LED:iä, kun taas LT3754 piirillä 16 LEDiä, näin ollen ne eivät ole optimaalisia taajuusnäytön skaalan suhteen. Texas Instrumentin LM3915 ja LM3916 LED-ohjain piirit olivat myös mukana vertailussa, mutta ne eivät sovellu lineaariseen säätöön ja niitä käytetään useimmiten audiokäytöissä.

Taajuusnäyttö päätettiin toteuttaa käyttämällä Texas Instrumentin LM3914 LED-ohjainpiiriä, joka on pitkään teollisuudessa käytetty, luotettava, edullinen ja pienikokoinen komponentti. Piiri on optimaalinen työhön liittyen, sillä sen avulla voidaan ohjata lineaarisesti kymmentä LEDiä. Täten jokainen LED saadaan syttymään 500 Hz:n välein. Piirillä on myös mahdollista valita, palavatko LED:t yksitellen vai palavatko ne niin sanotusti LED pylväänä. Sen etuuksiin kuuluu myös monet sovellusesimerkit, eikä yksittäiset LED:t tarvitse erikseen etuvastuksia.

3.3.4 MOSFET:ien ohjaus ja kondensaattoreiden kuormitus

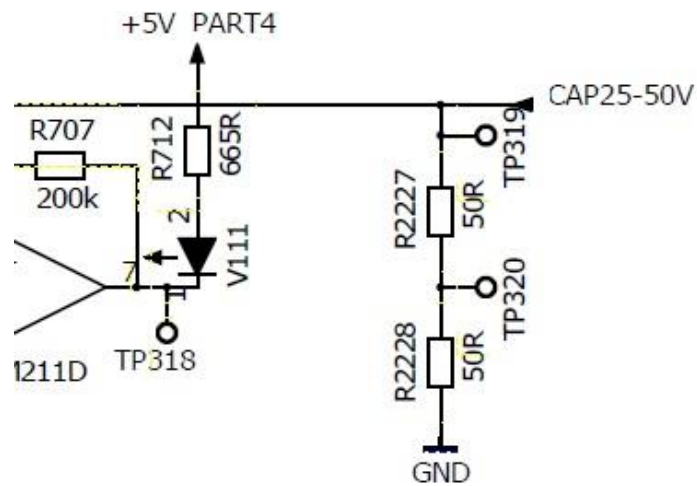
Mittauspiirillä 1000 voltin ja 25-50 voltin kondensaattoreilla on erilainen MOSFET:n ohjaus. Molemmissa kytkennöissä käytetään myös erilaista kuorman ohjausta. Tasajännitelähteiden yleisyyden vuoksi MLC-kondensaattorit päätettiin testata MOSFET:illä katkottulla tasajännitteellä.

25-50 voltin kondensaattorin mittausspiirissä MOSFETin ohjaus on toteutettu käyttämällä N- ja P-kanavaista MOSFET:ia, jossa N-kanavainen MOSFET ohjaa P-kanavaista MOSFET:ia, kuvan 25 tavoin.



Kuva 25 P-MOSFET:n ohjaus N-MOSFET:illa (PADS logic, Viivi Tamminen 2014)

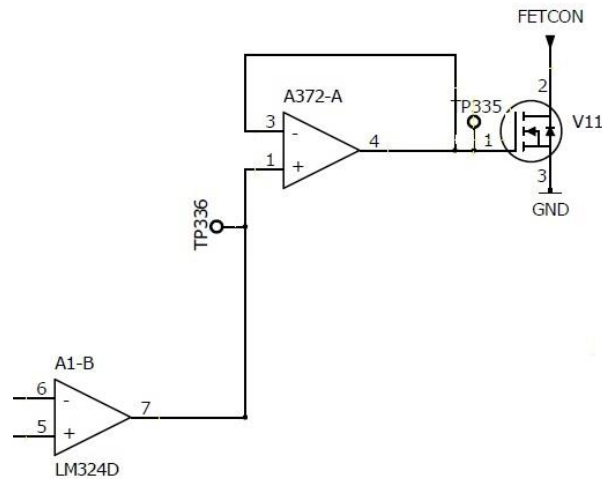
Vastuksilla R₂₂₃₃, R₂₂₃₅, R₂₂₃₄ ja R₂₂₃₆ on luotu sopiva ohjausjännite MOSFET:ille. Matalajännitteisten kondensaattorien kuormavastuksina toimii kuvan 26 mukaan kaksi kappaletta 50 Ω:n tehovastusta, jolloin kuormavirta on suurimmillaan 0,5 A.



Kuva 26 Pienjännitteisten kondensaattoreiden kuormavastukset

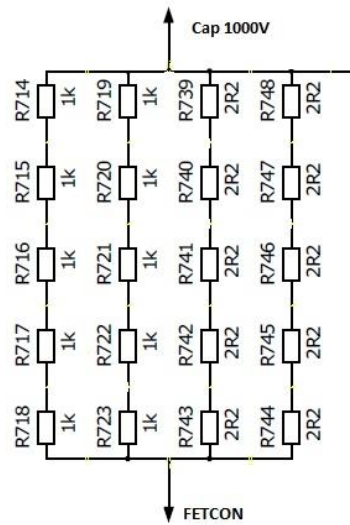
Toisin kuin matalajännitteisten kondensaattorien jännitteenohjaus piirissä suurjännitteisen MOSFET:n jännitteen ohjaus on tehty kuvan 17 mukaan käyttämällä yhtä N-kanava-

vaista MOSFET:iä, koska riittävän suurjännitteisiä P-kanavaisia MOSFET:jä ei ollut saatavilla. Piiriin on myös lisätty jänniteseuraaja MOSFET:n eteen, jotta MOSFET ei kuormittaisi muuta piiriä. MOSFET:ien ohjaus on tehty kahdella tapaa, koska suurjännitteisiä P-kanavaisia MOSFET:jä ei ole saatavilla.



Kuva 27 N-MOSFET:n ohjaus (PADS Logic: Viivi Tamminen 2014)

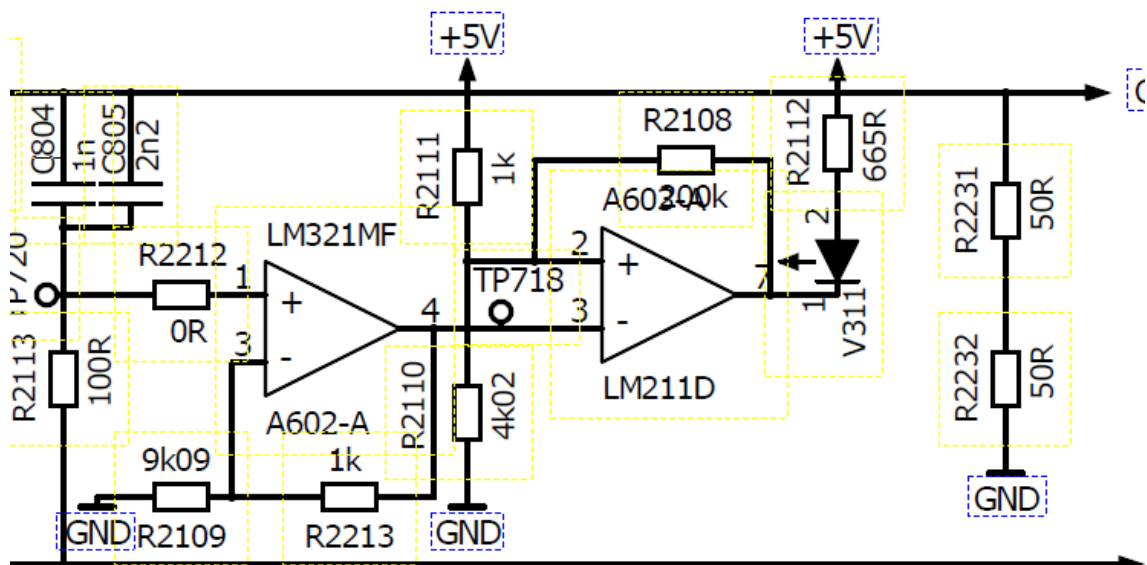
Suurjännitteisten kondensaattorien kuormavastuksena on käytetty niin sanottua vastusneliötä kuvassa 28, joka koostuu neljästä viiden vastuksen vastusjonosta. Ensimmäiset kaksi vastusjonoa koostuu viidestä $1\text{ k}\Omega$:n vastuksesta ja nämä kaksi vastusjonoa on kytketty rinnan toistensa kanssa. Kuormavirta on näin ollen $0,4\text{ A}$. Toiset kaksi vastusjonoa ovat kalustamattomia ja niihin kalustetaan kuormavastuksia tarpeen mukaan. Näin kuormavastuksen kokoa ja kondensaattorien kuormitettavuutta voidaan lisätä tai poistaa.



Kuva 28 Suurjännitteisten kondensaattoreiden kuormavastuksena toimiva vastusneliö

3.3.5 Kondensaattorien vuotovirran mittaus

Kuten aiemmin mainittiin, että kondensaattorin läpi kulkeva virta on hyvin pieni. Vikatilanteessa kondensaattorin vuotovirta kasvaa jopa 100-kertaiseksi. Kondensaattorien vuotovirran mittaussiiri koostuu ei-kääntävästä operaatiovahvistinkytkenästä ja komparaattorista, eli jännitevertailijasta, joka yksinkertaisesti vertailee kahden sisääntulojännitteen eroa. Operaatiovahvistimena käytettiin LM321-piiriä ja komparaattorina LM211-piiriä. Mittauspiiri on tehty kuvan 29 mukaan.



Kuva 29 Kondensaattorin vuotovirran mittaussiiri (PADS Logic: Viivi Tamminen 2014)

C_6 ja C_7 edustavat mitattavia kondensaattoreita (vain toinen kalustettu kerralla), ja R_{20} on kondensaattorin 100Ω :n sarjavastus. R_{14} $200 \text{ k}\Omega$ on komparaattorin yli oleva hystereesivastus, jonka tehtävä on estää komparaattoria värähtelemästä ja aiheuttamasta niin sanottua melua muuhun piiriin.

KytKentä on suunniteltu niin, että vuotovirran kasvaessa se sytyttää mittauspiirissä olevan LEDin merkiksi vikaantuneesta komponentista. Piiri toimii siten, että kondensaattorin vuotaessa vastuksen läpi kulkee virtaa luoden pienen jännitteen vastuksen yli. Operaatiovahvistinkytkentä vahvistaa tämän jännitteen kymmenkertaiseksi, jonka jälkeen komparaattori vertailee tätä jännitettä sille annettuun referenssijännitteeseen. Jos operaatiovahvistimen ulostulojännite ylittää komparaattorille annetun referenssijännitteen, syttyy LED.

Komparaattorille referenssijännite on laskettu kaavaa 15 käyttäen

$$V_{\text{REF}} = 1,25 * \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{IN}} \quad (15)$$

Kondensaattorin vuotaessa sen läpi kulkee yli 1 mA :n virta, jolloin ohmin lain mukaan vastuksen yli oleva jännite on ainakin $0,1 \text{ V}$. Operaatiovahvistin vahvistaa jännitteen kymmenkertaiseksi, jonka jälkeen jännitteen arvo on 1 V . Komparaattorin referenssijännitteeksi on mitoitettu 1 V , jolloin kondensaattorin läpi kulkee enemmän virtaa kuin 1 mA . Tällöin mittauspiirin LED syttyy.

4 Yhteenveto

Keraaminen kondensaattori on pieni, yleisesti käytetty passiivinen komponentti, johon liittyy yllättävän monta erilaista vikamekanismia. Erilaisia esiintyviä vikamekanismeja ja luotettavuutta on tutkittu ympäri maailmaa ja niissä esiintyvät viat on huomattu laajalti ja toimenpiteitä niiden ehkäisemiseksi on alettu laatia. Tutkimusten perusteella voidaan myös olettaa, että jatkuvasti pienemmässä koossa rakentaminen heikentää komponentin luotettavuutta.

Teoriapohjaista tutkimusta tehdessä suureen jännitteen vaihteluun liittyviä vikamekanismitutkimuksia ei löytynyt. Koska suurten jännitevaihteluiden suodatus keraamisten kondensaattoreiden avulla on keskeisessä roolissa ABB:llä, työssä keskityttiin luotettavuuden varmistamiseen kyseisessä sovelluksessa.

Työssä on suunniteltu sadalle 25-1000 voltin keraamiselle kondensaattorille luotettavuustestilaite, jonka tarkoituksena on kuormittaa kondensaattoreita käyttäen eri kytkentäaajuuksia sekä säätämällä kuormittavan jännitteen pulssinleveyttä. Tämä on toteutettu katkomalla tasajännitettä Mosfetilla.

Suunnitellun testikortin ja kondensaattorien testauksien aloittaminen tulee jäämään seuraavaan vaiheeseen. Testaukset ja mahdolliset muutostoimenpiteet tullaan tekemään ABB:n toimesta.

Jo viallisiksi todettuja kondensaattoreita tullaan mittaamaan ensin testielektroniikan toimivuuden varmistamiseksi. Tulevat korjaavat jatkotoimenpiteet tullaan raportoimaan ja työhön liittyvät raportit tullaan arkistoimaan ABB:lle.

Lähteet

1. Johnsson, Bo. 2000. Elektoniikka Perusteet. Iisalmi: Punamusta.
2. Kondensaattori opas. Verkkodokumentti :<http://www.capacitorguide.com/ceramic-capacitor/>, luettu 9.4.2014.
3. Liu David, Sampson Michael J. Nasa. 2012. Some Aspects of the Failure Mechanisms in BaTiO₃-Based multilayer ceramic capacitors
https://www.nepp.nasa.gov/files/24291/CARTS2012_Liu_BaTiO3.pdf,
luettu 22.4.2014.
4. Kahn Manfred .AVX Corporation. Multilayer Ceramic Capacitors-Materials and Manufacture <http://www.avx.com/docs/techinfo/mlcmat.pdf>, luettu 22.4.2014.
5. Johansson Dielectric. 2008. Basic of Ceramic Chip Capacitor http://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/JohansonDielectrics_709/PDF/JDI_Training_MLCC-Basics.pdf?redirected=1, luettu 19.3.2014.
6. Keimasi Mohammadreza. Univesity of Maryland. 2007. Flex cracking and temperature-humidity-bias effects on reliability of multilayer ceramic capacitor
<http://drum.lib.umd.edu/bitstream/1903/4257/1/umi-umd-4115.pdf>,
luettu 11.4.2014.
7. AVX. MLC Chip capacitors: Basic construction <http://www.avx.com/docs/Catalogs/apmlcrel.pdf>, luettu 9.4.2014.
8. AVX. Multilayer ceramic chip capacitor, <http://www.avx.com/docs/masterpubs/mccc.pdf>, luettu 10.4.2014.
9. KEMET. 2002. Yleiset keraamisen kondensaattorin vikatyypit, <http://www.kemet.com/kemet/web/homepage/kfbk3.nsf/vaFeedback-FAQ/EC6B11184B8913AC85256A8700515D23?OpenDocument>, luettu 10.4.2014.

10. University of Maryland. Desing and Process Guidelines for use of ceramic chip capacitors.http://www.ieca-inc.com/images/Ceramic_capacitor_Failure_Mechanisms.pdf, luettu 11.4.2014.
11. Tulkoff Cheryl. SMT Hybrid packing. Design for reliability & Sourcing of Printed Circuit Boards <http://www.dfrsolutions.com/wp-content/uploads/2013/11/SMT-Hybrid-2012-DFR-PCB-Sourcing-Final.pdf>, luettu 10.4.2014.
12. Stewart Mark. AVX MLCC Flexitem:Guarding against capacitor crack failures. <http://www.avx.com/docs/techinfo/mlccflex.pdf>, luettu 10.4.2014.
13. H.Honkanen. Kajaanin Ammattikorkeakoulu. Oskillaattorit <http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/OSKILLAATTORIT.pdf>, luettu 23.4.2014.
14. Texas Instrument, LM317 <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/lm117.pdf>, luettu 12.4.2014.
15. Efficient PWM driver <http://www.instructables.com/id/The-ultimate-PWM-driver-for-many-applications/step2/The-schematic/> luettu 10.2.2014.
16. LM3914 Datasivu <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3914.pdf> .

