

Lauri Peltonen

Taajuusmuuttajan luotettavuussuunnittelu laajalle lämpötila-alueelle

Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 30.05.2011.

Työn valvoja:

Prof. Mervi Paulasto-Kröckel

Työn ohjaajat:

DI Ismo Toikka

TkT Vesa Vuorinen



Aalto-yliopisto
Teknillinen korkeakoulu

Tekijä: Lauri Peltonen

Työn nimi: Taajuusmuuttajan luotettavuussuunnittelu laajalle lämpötila-alueelle

Päivämäärä: 30.05.2011

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 10+67

Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Elektroniikan laitos

Professuuri: Elektroniikan integrointi ja luotettavuus

Koodi: S-113

Valvoja: Prof. Mervi Paulasto-Kröckel

Ohjaajat: DI Ismo Toikka, TkT Vesa Vuorinen

Taajuusmuuttajien uudet, tavallista rankemmat, käyttöympäristöt tuovat mukanaan haasteita elektroniikan toiminnallisuuden ja kestävyys suhteen. Erityisesti entistä laajemmalla toimintalämpötilat sekä lämpötilan vaihteluvälit vaikuttavat suuresti taajuusmuuttajan luotettavuuteen.

Tässä diplomityössä perehdyttiin erään taajuusmuuttajan ohjauspiirikortin luotettavuuden tarkasteluun ja kasvattamiseen tavallista laajemmalla lämpötila-alueella. Työssä otettiin kantaa sekä kortin komponenttivalintoihin että piiriratkaisuihin, joilla on vaikutusta sekä toimintaan että kestävyteen.

Työssä tarkasteltiin piirikortin komponenttien osalta lämpötilan vaikutus niiden oleellisiin parametreihin sekä toiminnallisuuteen. Lisäksi työssä analysoitiin taajuusmuuttajan piirikortti ja etsittiin ongelmalliset komponentit ja piiriratkaisut sekä ehdotettiin muutoksia, joiden avulla laajempi toimintalämpötila-alue voitaisiin saavuttaa. Tavallista matalampi lämpötila ei osoittautunut ongelmalliseksi, mutta korkeamman havaittiin vaativan huomioonottamista suunnittelussa.

Komponenteista kondensaattorit sekä ferriittisydämiset kelat ja muuntajat osoittautuivat haastaviksi. Niiden parametrien muuttuminen lämpötilan suhteen on usein suurta, ja varsinkin kondensaattorien elinikä korotetussa lämpötilassa jää lyhyeksi. Puolijohdekomponenteilla oleellista on vuotovirran kasvu, joka tulee ottaa huomioon varsinkin suuri-impedanssisissa piireissä, sekä toiminnan hidastuminen joka vaikuttaa nopeisiin yhteyksiin. Pieniä jännitteitä käytettäessä kynnyksjännitteiden muutokset saattavat aiheuttaa virheellisiä tilamuutoksia.

Kestävyys kannalta lämpötilan vaihtelut aiheuttavat komponenttien vikaantumista varsinkin juotosliitoksista. Jalalliset ja pienet komponentit, joiden lämpölaajenemiskerroin vastaa piirilevyn kerrointa kestävä lämpötilan muutoksia oletettavasti parhaiten. Muita vikamekanismeja voidaan hidastaa ylivoimalla komponentteja virran ja jännitteen suhteen, jolloin myös häviötehon aiheuttama kuumentuminen vähenee.

Avainsanat: elektroniikka, lämpötila, luotettavuus

Author: Lauri Peltonen

Title: Reliability design of frequency converter for high temperature operation

Date: 30.05.2011

Language: Finnish

Number of pages:10+67

Faculty of Electronics, Communications and Automation

Department of electronics

Professorship: Electronics integration and reliability

Code: S-113

Supervisor: Prof. Mervi Paulasto-Kröckel

Instructors: M.Sc. (Tech.) Ismo Toikka, D.Sc. (Tech.) Vesa Vuorinen

The reliability of electronics is increasingly important when frequency converters are used in harsh environments. Especially elevated temperature and larger temperature cycles affect greatly the reliability of electronics.

In this thesis, the functionality of a frequency converter's circuit board assembly in a larger temperature range is analysed. Thesis presents factors to be taken into account when selecting electronic components and circuits to increase the functionality and reliability of the circuit board assembly.

Temperature-dependent parameters of the board's components are described and the components and circuits having the greatest risk of malfunctioning are presented. Then replacement components and circuits that would make the board perform better at larger temperature range are suggested. Low temperature was not found to affect the functionality, but elevated temperature must be taken into account in the design.

Capacitors and inductors with ferrite core appear to be challenging. Their parameters vary greatly with temperature, and especially the lifetime of capacitors in elevated temperature is short. The leakage current is the crucial parameter of semiconductors, which must be taken into account especially in high impedance circuits. Other effects include the increase of delays which affects high speed circuits and variation of threshold voltages, which may cause incorrect state transitions in low voltage applications.

Solder connections are prominent breaking points with relation to temperature cycles. Small, leaded components which have the same coefficient of thermal expansion as the circuit board endure temperature cycles well. Other thermally accelerated failure mechanisms can be mitigated by derating the components with relation to voltage and current, which also decreases self heating.

Keywords: electronics, temperature, reliability

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy Drivesilla Helsingissä. Mielenkiintoisesta aiheesta haluan kiittää Teknologia-osastoa ja ohjaajaani DI Ismo Toikkaa. Kiitos myös TkT Vesa Vuoriselle ja DI Mika Niemelle avusta ja rakentavista keskusteluista.

Vanhempani Irmeli ja Erkki sekä sisarukseni Juho ja Reetta, olette kannustaneet minua opinnoissani ja vauhdittanut tulevaa valmistumistani. Kirsi, kiitos jaksamisesta ja tukemistäni kaikissa tilanteissa.

Espoo, 30.05.2011

Lauri Peltonen

Sisältö

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Symbolit ja lyhenteet	vii
1 Johdanto	1
2 Taajuusmuuttaja	3
2.1 Toiminta	3
2.2 Piirikortin rakenne	6
3 Toiminnallisuus	8
3.1 Passiivikomponentit	8
3.1.1 Vastukset	8
3.1.2 Kondensaattorit	9
3.1.3 Kelat ja muuntajat	13
3.1.4 Kiteet ja oskillaattorit	14
3.2 Puolijohteet	15
3.2.1 Puolijohdemateriaalit	16
3.2.2 Diodit	18
3.2.3 Loistediodit	19
3.2.4 Bipolaaritransistorit	20
3.2.5 MOSFET	21
3.2.6 Optoerottimet	23
3.2.7 Integroidut piirit	24
3.3 Muovit	25
4 Voittuvuus	26
4.1 Arrheniuksen yhtälö	27

4.2	Elektromigraatio	30
4.3	Ajasta riippuva dielektrinen hajoaminen	31
4.4	Tinaviikset	32
4.5	Korroosio	33
4.6	Piirilevyt	34
4.7	Lämpösyklus	35
4.8	Tärinä	39
4.9	Tehokäyrä	39
4.10	Ylimoittaminen	40
5	Piirikortin suunnittelu laajemmalle lämpötila-alueelle	42
5.1	Komponentit	43
5.2	Mittaukset	45
5.3	Piiriratkaisut	47
5.3.1	Teholähde	47
5.3.2	Jännitteenmittaus	50
5.3.3	Optoerottimet	52
5.3.4	Lineaariregulaattorit	53
5.3.5	Hakkuriregulaattorit	55
5.3.6	Hila-ajurien apujännite	57
5.3.7	Kondensaattorit	58
5.3.8	Tehonkulutus	59
6	Yhteenveto ja johtopäätökset	60
	Viitteet	62
A	Vastusten lämpötilaparametreja	66
B	Kondensaattorien lämpötilaparametreja	67

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

α	Vikamekanismin nopeuskerroin
β	Bipolaaritransistorin virtavahvistus
β_d	Jännitteen kiihdytysparametri
Δe_p	Plastisen rasituksen vaihteluväli
ΔT_0	Elastisen rasitusta aiheuttava lämpötilaväli [°C]
γ	Sähkökentän kiihdytyskerroin [cm/MV]
σ	Johtavuus [S]
λ	MOSFET:n Early-jännite [V]
ω	Kulmataajuus [rad/s]
μ	Varauksenkuljettajien liikkuvuus
μ_{fon}	Fononisironnan rajoittama liikkuvuus
μ_I	Epäpuhtaussironnan rajoittama liikkuvuus
μ_n	Elektronien liikkuvuus
μ_p	Aukkojen liikkuvuus
$\tan \delta$	Häviökerroin
τ	Relaksaatioaika [s]
θ_{JA}	Lämpöresistanssi puolijohdeliitoksesta ympäristöön [K/W]
A	Puolijohdeliitoksen pinta-ala [nm ²]
A_E	Bipolaaritransistorin kanta-emitteriliitoksen pinta-ala [nm ²]
A_f	Vikaantumisaajan kasvamisakerroin
A_r	Kemiallisen reaktion kiihtyvyytikerroin
B	Puolijohteen materiaaliparametri
B'	Lämpövaihteluiden eksponentti
C	Kapasitanssi [F]
C'	Lämpövaihteluiden materiaaliparametri
C_{ox}	Oksidikerroksen kapasitanssi [F]
C_{dep}	Tyhjennysalueen kapasitanssi [F]
C_R	Kosteuden kiihdytyskerroin
D_f	Häviökerroin
D_n	Elektronien diffuusiokerroin
D_p	Aukkojen diffuusiokerroin
E	Sähkökentän suuruus [V/m]
E_a	Aktivaatioenergia [eV]
E_{ox}	Oksidikerroksen yli olevan sähkökentän suuruus [MV/cm]
E_g	Kielletyn energiavälin energia [eV]
f	Taajuus [Hz]
f_{sw}	KytKentätaajuus [Hz]
H	Magneettikentän voimakkuus [A/m]
h_{fe}	Bipolaaritransistorin virtavahvistus piensignaalille
I	Virta [A]

I_B	Bipolaaritransistorin kantavirta [A]
I_C	Bipolaaritransistorin kollektorivirta [A]
I_{CB}	Bipolaaritransistorin vuotovirta kollektorilta kannalle [A]
I_D	MOSFET:n nieluvirta [A]
I_{off}	Sammutetun MOSFET:n vuotovirta [A]
I_r	Estosuuntainen virta [A]
I_{RMS}	Virran tehollisarvo [A]
I_s	Saturaatiovirta [A]
J	Virrantiheys [A/m^2]
J_{crit}	Elektromigraation virrantiheysraja [A/m^2]
k_B	Boltzmannin vakio, $8,62 \cdot 10^{-5}$ eV/K
L_b	Blechin pituus [m]
L_C	MOSFET:n kanavan pituus [nm]
L_n	Elektronien diffuusiosyvyys [nm]
L_p	Aukkojen diffuusiosyvyys [nm]
m^*	Efektiivinen massa [kg]
m_e	Elektronin massa, $9,10938 \cdot 10^{-31}$ kg
n	Elektronien tiheys
n_d	Diodin rakenteesta riippuva vakio
n_e	Elektromigraation virrantiheydestä riippuva eksponentti
n_i	Vapaiden varauksenkuljettajien määrä luontaisessa puolijohdteessa
n_p	Peckin eksponentti
N	Rasitusliikkumisen eksponentti
N_p	p-tyyppin puolijohdteen seostuspitoisuus
N_n	n-tyyppin puolijohdteen seostuspitoisuus
N_f	Rasitusjaksojen määrä
N_i	Puolijohdteen sirottajien tiheys
p	Aukkojen tiheys
P	Tehohäviö [W]
P_b	Estosuuntainen häviö [W]
P_c	Johtavuushäviö [W]
P_d	Dielektrinen tehohäviö [W]
P_r	Resistiivinen tehohäviö [W]
P_{sw}	Kytkehäviö [W]
q	Alkeisvaraus, $1,60 \cdot 10^{-19}$ C
Q	Hyvyysluku
R	Reaktionopeus
$R_{DS,on}$	Nielu-lähde-resistanssi [Ω]
R_{ESR}	Ekvivalenttinen sarjaresistanssi [Ω]
RH	Suhteellinen kosteus [%]
R_s	Sarjaresistanssi [Ω]
t_0	Referenssielinikä [h]
t_{off}	Poiskytketymisaika [s]
t_{on}	Päällekytketymisaika [s]
T	Lämpötila [K]

T_0	Metallin rasmusvapaa lämpötila [K]
T_A	Ympäristön lämpötila [°C]
T_C	Komponentin kotelon lämpötila [°C]
T_d	Hajoamislämpötila [°C]
T_g	Lasiiritymän lämpötila [°C]
T_J	Liitoslämpötila [°C]
T_{ref}	Referenssilämpötila [K]
TTF	Vikaantumisaika [s]
$TTWN$	Tinaviiksen ydintymisaika [s]
v	Jännite [V]
v_d	Diffuusionopeus [m/s]
\hat{V}_{AC}	Vaihtojännitteen huippuarvo [A]
V_{BE}	Kanta-emitteri-jännite [V]
V_{CE}	Kollektori-emitteri-jännite [V]
V_{CB}	Kollektori-kanta-jännite [V]
V_{DC}	Tasajännite [V]
V_{DS}	Nielu-lähde-jännite [V]
V_f	Päästösuuntainen kynnyksjännite [V]
V_{GS}	Hila-lähde-jännite [V]
V_r	Estosuuntainen jännite [V]
V_T	Terminen jännite [V]
V_{th}	Kynnyksjännite [V]
W_B	Bipolaaritransistorin kannan efektiivinen leveys [nm]
W_C	MOSFET:n kanavan leveys [nm]
X_c	Reaktanssi [Ω]

Lyhenteet

0603	Palakomponenttien kotelotyyppi
1206	Palakomponenttien kotelotyyppi
1210	Palakomponenttien kotelotyyppi
2512	Palakomponenttien kotelotyyppi
ABB	ABB Ltd
AC	engl. <i>Alternating current</i> , vaihtosähkö
ANSI	engl. <i>American National Standards Institute</i> , standardointijärjestö
BGA	engl. <i>Ball Grid Array</i>
BJT	engl. <i>Bipolar Junction Transistor</i> , bipolaaritransistori
CMOS	engl. <i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CTE	engl. <i>Coefficient of Thermal Expansion</i> , lämpölaajenemiskerroin
CTE-XY	Lämpölaajenemiskerroin vaakasuunnassa
CTE-Z	Lämpölaajenemiskerroin pystysuunnassa
DIP	engl. <i>Dual-Inline package</i>
DRAM	engl. <i>Dynamic Random Access Memory</i>
EIA	engl. <i>Electronic Industries Alliance</i> , elektroniikan standardoimisjärjestö

EU	Euroopan Unioni
FIT	engl. <i>Failures In Time</i> , vikaantumisia 10^9 tuntia kohti
FPGA	engl. <i>Field Programmable Gate Array</i> , ohjelmoitava logiikkapiiri
FR4	Piirilevymateriaaliluokka
IC	engl. <i>Integrated Circuit</i> , integroitu piiri
IGBT	engl. <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
I/O	engl. <i>Input/Output</i> , tulo/lähtö
JEDEC	Mikroelektroniikan standardointijärjestö
LCCC	engl. <i>Leadless Ceramic Chip Carrier</i>
LCP	engl. <i>Liquid Crystal Polymer</i> , polymeerityyppi
LED	engl. <i>Light Emitting Diode</i> , loistediodi
LQFP	engl. <i>Low-profile Quad Flat Package</i>
LVDS	engl. <i>Low-Voltage Differential Signaling</i>
MOSFET	engl. <i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i>
MTBF	engl. <i>Mean Time Between Failures</i> , keskimääräinen vikaantumisväli
PBGA	engl. <i>Plastic Ball Grid Array</i>
PQFP	engl. <i>Plastic Quad Flat Pack</i>
PCB	engl. <i>Printed Circuit Board</i> , piirilevy
PEN	Polyetyleeninaftalaatti
PET	Polyetyleenitereftalaatti
PC	Polykarbonaatti
PI	Polyimidi
PLLC	engl. <i>Plastic Leaded Chip Carrier</i>
PMMA	Polymetyylimetakrylaatti
PP	Polypropeeni
ppm	engl. <i>Parts Per Million</i> , miljoonasosa
PPS	Polyfenyleenisulfidi
PQFP	engl. <i>Plastic Quad Flat Pack</i>
PS	Polystyreeni
PWM	engl. <i>Pulse Width Modulation</i> , pulssinleveysmodulaatio
RIAC	<i>The reliability information analysis center</i>
RMS	engl. <i>Root Mean Square</i> , neliöllinen keskiarvo, tehollisarvo
RoHS	engl. <i>Restriction of Hazardous Substances</i> , EU-direktiivi
SIL	engl. <i>Single-Inline Package</i>
SMD	engl. <i>Surface Mount Device</i> , pintaliitoskomponentti
SOI	engl. <i>Silicon On Insulator</i> , eristekerroksen päälle valmistettu puolijohde
TDDB	engl. <i>Time-dependent Dielectric Breakdown</i> , ajasta riippuva dielektrinen hajoaminen
VITA	engl. <i>VMEbus International Trade Association</i>

1 Johdanto

Energian säästäminen, hiilidioksidipäästöt ja uusiutuvat energianlähteet ovat nousseet kiinnostuksen kohteeksi 2000-luvulla. Energian säästäminen on varsinkin teollisuudessa paitsi myyntivaltti, myös selkeä taloudellinen etu, joten teollisuuden prosessien energiankulutusta pyritään minimoimaan. Myös hiilidioksidipäästöjen määrä on suoraan verrannollinen sähkön kulutukseen.

Eräs suurimmista energiaa kuluttavista laiteryhmistä ovat sähkömoottorit. Sähkömoottoreita on käytössä lukuisissa eri kohteissa ja niiden koko vaihtelee hyvin pienestä useiden megawattien teholuokkaan. Tyypillisiä sähkömoottorin käyttökohteita teollisuudessa ovat pumput, tuulettimet ja erilaiset kuljettimet.

Taajuusmuuttajalla voidaan säätää sähkömoottorin pyörimisnopeutta tai vääntömomenttia. Tällöin voidaan saavuttaa huomattava säästö sähkömoottorin kuluttamassa energias-
sa verrattuna ratkaisuun, jossa esimerkiksi pumpun virtausnopeutta säädettäisiin putkessa sijaitsevalla kuristimella. Lisäksi prosessin tarkempi säätö mahdollistaa laadun parantamisen ja vähentää mekaanista rasitusta. [1] [2]

Nykyisissä taajuusmuuttajissa moottorin jarruttamisessa syntyvä energia voidaan käyttää hyödyksi esimerkiksi lataamalla akkua tai syöttämällä energia takaisin sähköverkkoon. Tällainen regeneroiva taajuusmuuttaja vähentää edelleen häviötehoa, sillä perinteisesti jarrutusenergia muutetaan jarruvastuksessa lämmöksi. Syntyvä lämpö täytyy edelleen siirtää laitteesta ulos puhaltimien avulla.

Taajuusmuuttajia on alettu käyttää tuuli- ja aurinkovoimaloissa inverttereinä, sekä erilaisissa hybridiratkaisuissa sähkömoottoreiden kanssa yksinkertaistamaan voimansiirtoa. Hybridikäyttöjä on esimerkiksi laivoissa, työkoneissa ja ajoneuvoissa, joissa ne korvaavat perinteisesti käytettyjä hydraulisia voimansiirtojärjestelmiä.

Tavallisesti taajuusmuuttajat sijaitsevat tuotantolaitoksissa sisätiloissa, joissa käyttöolosuhteet ovat elektroniikan kannalta varsin hyvät. Lämpötila näissä tiloissa on vakaa lämmityksen ja ilmastoinnin ansiosta, ja suodattimien avulla saadaan pöly ja lika pysymään laitteen ulkopuolella. Tuuli- ja aurinkovoimakäytössä taajuusmuuttaja tai invertteri on sijoitettava käytännön syistä usein lähelle generaattoria tai aurinkopaneelia, jolloin käyttöolosuhteet ovat hankalammat. Tuulivoimaloiden optimaalinen sijoituspaikka on avoimella alueella, kuten merellä, jossa tuulen voimakkuus on suuri, lämpötila voi olla talvella kymmeniä asteita pakkasen puolella ja ilmasto suolainen.

Aurinkovoimaloiden optimaalinen asennuspaikka puolestaan on mahdollisimman aurinkoinen alue, kuten esimerkiksi aavikko, jossa lämpötilan vaihtelut yön ja päivän välillä ovat suuria ja auringonpaisteen vaikutuksesta lämpötila voi nousta hyvinkin korkeaksi. Työkoneissa, ajoneuvoissa ja laivoissa taajuusmuuttaja asennetaan usein dieselmoottoreiden läheisyyteen, jolloin moottorit lämmittävät elektroniikkaa ja aiheuttavat laitteeseen

tärinää. Vaikeat toimintaolosuhteet on otettava huomioon uusien tuotteiden suunnittelussa, jotta taajuusmuuttaja tai invertteri toimisi oikein myös käyttöympäristön ääriolosuhteissa.

Tässä diplomityössä perehdytään erään taajuusmuuttajan tehoasteen pääpiiriliitynnän piirikortin luotettavuussuunnitteluun, jotta kortti toimisi rankemmissa olosuhteissa ja että sen elinikä säilyisi tarpeeksi pitkänä, esimerkiksi 60000 käyttötuntia. Käyttöympäristön lämpötilan vaihteluvälin arvioidaan nousevan teollisuuden 0...60 °C lämpötilasta -40...90 °C lämpötilaan. Tämän lämpötilavälin oletetaan kattavat tuulivoimaloiden, aurinkovoimaloiden ja hybridilaitteistojen lämpötilavaihtelut. Määritellyllä lämpötila-alueella tarkoitetaan ympäristön lämpötilaa, elektroniikka laitteen sisällä on vielä huomattavasti kuumempi tehohäviöiden vuoksi. Työssä keskitytään piirikortin elektroniikkakomponenttien valintoihin ja piiriratkaisuihin, joiden avulla toimintavarmuus ja elinikä-tavoite voitaisiin saavuttaa.

Luvussa 2 käydään läpi taajuusmuuttajan toiminta sekä komponentit, joista työn kohteena oleva jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja koostuu. Samassa luvussa esitellään myös työn kohteena olevan piirikortin toiminnan kannalta oleelliset osat. Tämän jälkeen luvussa 3 perehdytään elektroniikan toiminnallisuuteen, eli laitteen suunnitellusti toimimisen varmistamiseen elektroniikkasuunnittelun osalta. Käytännössä tämä tarkoittaa eri komponenttien parametrien lämpötilakäyttäytymisen tuntemista ja ottamista huomioon suunnittelussa. Luvussa 4 otetaan käsittelyyn lämpötilan ja sen vaihteluiden, sekä lyhyesti myös värinän, vaikutukset komponenttien ja siten koko piirikortin elinikään.

Taajuusmuuttajan ohjauskortin kriittisiksi havaitut piiriratkaisut ja ongelmalliset komponentit käsitellään luvussa 5. Lisäksi tässä luvussa esitetään vaihtoehtoiset ratkaisut, joilla ongelmalliset komponentit ja piiriratkaisut saataisiin toimimaan laajemmalla lämpötila-alueella. Tämä edellyttää joidenkin komponenttien vaihtamista ja osittain jopa kokonais-ten piiritopologioiden muuttamista.

Luvussa 6 on yhteenveto ja johtopäätökset työn aikana havaituista oleellisimmista suunnittelukriteereistä, jotka täytyy ottaa huomioon, kun suunnitellaan piirikorttia tavallista toimintaympäristöä laajemmalle lämpötila-alueelle.

2 Taajuusmuuttaja

Tässä luvussa käydään läpi työn kohteena olevan jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan toiminta sekä sen sisältämät komponentit taajuusmuuttajan toiminnan kannalta oleellisilta osin.

2.1 Toiminta

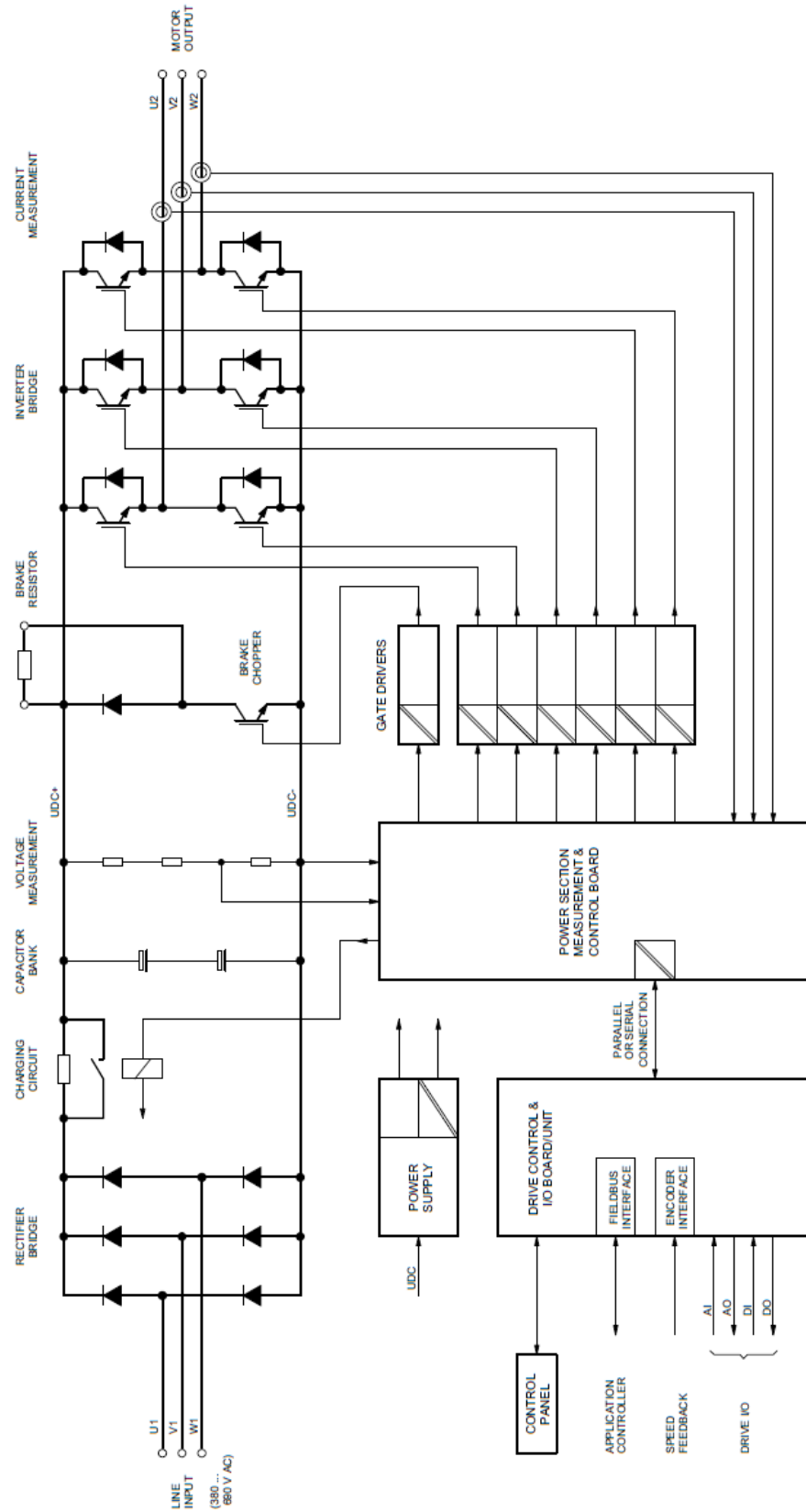
Taajuusmuuttajalla voidaan muuttaa vaihtojännitteen taajuus ja amplitudi, sekä joskus myös vaihe, halutuiksi. Yleensä taajuusmuuttajaa käytetään yhdessä 3-vaiheisen sähkömoottorin kanssa, joten taajuusmuuttajan lähtö on 3-vaihejännite. Selvästi yleisin taajuusmuuttajien topologia on jännitevälipiirillinen, IGBT-transistorikytkimiä (engl. *Insulated Gate Bipolar Transistor*) käyttävä taajuusmuuttaja, joka on myös tämän työn kohteena. Tällainen taajuusmuuttaja muuttaa ensin syöttöverkon vaihtojännitteen tasajännitteeksi, jolla ladataan energiavarastona toimiva välipiirin kondensaattori. Tästä tasajännitteestä IGBT-kytkimien avulla sopivan modulaatiotavan ja mahdollisten suodattimien avulla muodostetaan halutun kaltainen vaihtojännite. Kuvassa 1 on esitetty taajuusmuuttajan lohkoakaavio.

Taajuusmuuttaja koostuu tasasuuntaajasta, jännitevälipiiristä, vaihtosuuntaajasta ja sen ohjauselektronikasta. Tasasuuntaaja voi koostua yksinkertaisimmillaan diodeista, jolloin kyseessä on ohjaamaton tasasuuntaaja, tai esimerkiksi tyristori- tai transistorikytkimistä, jolloin kyseessä on puoli- tai täysin ohjattu tasasuuntaaja riippuen kytkimien lukumäärästä ja sijoittelusta. Täysin ohjatulla tasasuuntaussillalla välipiiristä voidaan syöttää sähkötehoa takaisin sähköverkkoon esimerkiksi moottorin jarrutuksen aikana.

Jännitevälipiiri varastoi taajuusmuuttajan verkosta ottamaa energiaa kondensaattoreihin. Nopeat lähtötehon muutokset saadaan tällöin kondensaattorista, ja sähköverkon kuormitus on tasaisempaa. Välipiiriin voidaan lisätä myös suodatin, jolloin sähköverkkoon kytkeytyviä häiriöitä saadaan pienennettyä. Turvallisuussyistä välipiirin kondensaattorien rinnalla on myös vastus, joka purkaa kondensaattorin varauksen laitteen syöttöverkosta irrottamisen jälkeen.

Vaihtosuuntaajan tehtävänä on muuttaa välipiirin tasajännite jälleen vaihtojännitteeksi halutulla taajuudella ja amplitudilla. Vaihtosuuntaaja koostuu IGBT-transistorikytkimistä, joilla voidaan kytkeä kukin lähtövaihe vuorollaan välipiirin positiiviseen tai negatiiviseen jännitteeseen. Moduloimalla kytkimien kytkeytymistä esimerkiksi pulssinleveysmodulaatiolla (PWM, engl. *Pulse Width Modulation*), saadaan kunkin vaiheen hetkellinen lähtöjännite määrättyä halutuksi.

Ohjauselektronikka ohjaa vaihtosuuntaajan lähtötransistorien kytkeytymistä, mittaa välipiirin jännitettä, lähtövirtoja ja transistorien saturoitumista sekä hoitaa myös kommunikoinnin esimerkiksi ohjauspaneelin kanssa. Ohjauselektronikka on jaettu useaan piiri-



Kuva 1: Jännitevälipiirillisen 3-vaiheisen taajuusmuuttajan lohkoakaavio.

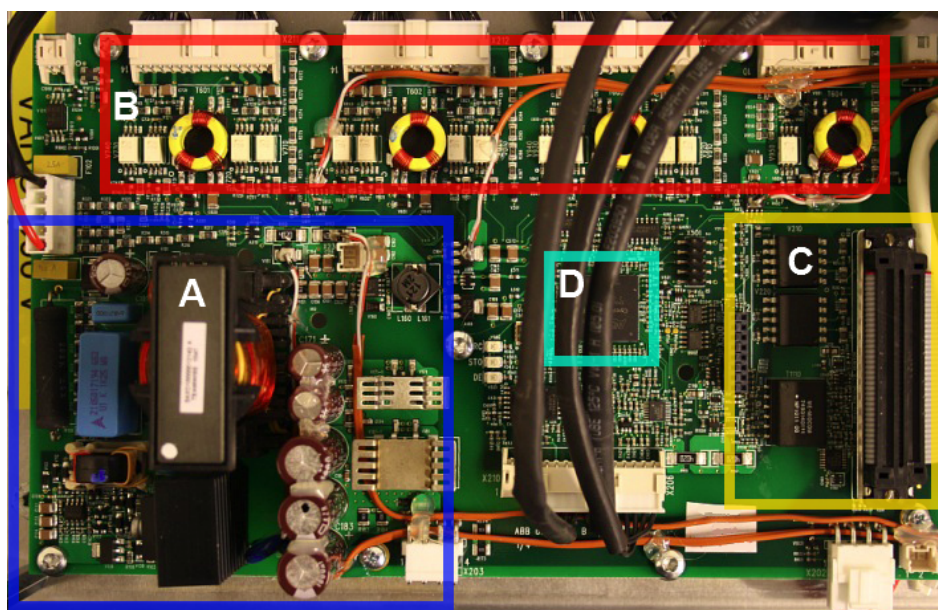
korttiin, joista jokainen suorittaa yhtä ohjauksen osa-alueita. Tämän työn kohteena olevan taajuusmuuttajan ohjauselektronikka on jaettu ohjaus- ja I/O-yksikköön, pääpiiriliityntä- ja mittausyksikköön sekä hilaohjaimiin.

Ohjaus- ja I/O-yksikössä on liitynnät taajuusmuuttajan ulkopuolelle. Liityntöjä on esimerkiksi ohjauspaneelille ja turvalaitteille sekä analogia- ja digitaalitulot ja -lähdöt erilaisten ohjaus- ja hallintalaitteiden kytkemiseksi. Lisäksi ohjausyksikkö sisältää moottorin säätöä ohjaavan suorittimen.

Pääpiiriliityntä- ja mittausyksikkö muuntaa ohjausyksiköltä tulevat säätökomennot modulointiohjeiksi ja ohjaa vaihto- sekä tasasuuntaajaa. Tämän lisäksi yksikkö sisältää tehonlähteen, joka muodostaa välipiirijännitteestä ohjauselektronikan tarvitsemat matalat jännitteet, sekä mittauspiirit, joilla mitataan välipiirin jännitettä ja vaihtosuuntaajan teho-transistorien kytkeytymistä.

Hilaohjaimet sisältävät IGBT-transistorien ohjaukseen vaadittavan elektronikan, joka kytkee transistorit päälle ja pois ohjaussignaalin perusteella.

Tässä diplomityössä tarkastellaan lähemmin pääpiiriliityntä- ja mittausyksikön muodostavaa piirikorttia, kuva 2, sekä sen toiminnan varmistamista aikaisempaa laajemmalla lämpötila-alueella. Jatkossa korttiin viitataan termillä "piirikortti".



Kuva 2: Pääpiiriliityntän ja mittausyksikön piirikortti. Alueella A sijaitsee kortin tehonlähte ja alueella B hilaohjainten tehonlähteet ja signaalierottimet. Alueella C on kommunikointilinkit ohjauskortille ja alueella D korttia ohjaava FPGA-piiri.

2.2 Piirikortin rakenne

Pääpiiriliitynnän, mittausyksikön ja teholähteen muodostava piirikortti sisältää useita toiminnallisia lohkoja, jotka on esitelty kuvassa 3. Kuvassa 2 on piirikortista valokuva, johon on merkitty lohkojen sijainnit.

Kortti sisältää välipiirijännitteestä matalat erotetut käyttöjännitteet tekevän *quasi-resonant flyback* -tyyppisen teholähteen (ks. luku 5.3.1), sekä erotetut hilaohjainjännitteet tekevät *push-pull*-tyyppiset teholähteet (luku 5.3.6). Teholähteiden lisäksi kortilla on välipiirijännitteen, lähdön vaihejännitteiden ja lähtövirtojen mittauskytkennät (luku 5.3.2). Pääkäyttöjännitteet tekevä teholähde on kuvassa 3 ylimpänä ja kuvassa 2 alue A, hilaohjainjännitteet lohkokaaavion oikeassa reunassa alhaalla, valokuvassa alue B ja mittauskytkennät kaavion vasemmassa reunassa.

Kortin sydämenä toimii FPGA-piiri (engl. *Field Programmable Gate Array*), joka kommunikoi sekä LVDS-kanavan (engl. *Low-Voltage Differential Signaling*, matalajännitteinen differentiaalikanava) että 24 V turvakytkenän kautta ohjaus- ja I/O-yksikön kanssa. Kommunikointikanavat ovat erotettuja, LVDS-kanava erotetaan muuntajan avulla ja turvakytkentä optoerottimilla. FPGA-piiri on valokuvassa alue D ja kommunikointilinkit alue C. Kommunikointilinkit ovat lohkokaaavion oikeassa yläkulmassa.

Hilaohjainten ohjaukset välitetään FPGA-piiriltä optoerottimilla hilaohjainkortteille (lohkokaaavion oikeassa reunassa alhaalla). Päätoimintojen lisäksi kortti sisältää paljon muita toiminnan kannalta oleellisia komponentteja, kuten oskillaattorin, muistipiirejä sekä ohjelmointiliitännät.

3 Toiminnallisuus

Toiminnallisuudella tarkoitetaan tässä työssä elektronisen laitteen toimimista suunnitellulla tavalla. Oleellinen vaatimus laitteen toimimiselle oikein on komponenttien ominaisuuksien hyvä tunteminen, minkä perusteella piiriratkaisut voidaan valita oikein. Toiminnallisuudelle on tyypillistä, että odottamattoman tilanteen, esimerkiksi oletusten vastaisen ympäristöolosuhteiden, sattuesssa laite toimii virheellisesti tai toiminta pysähtyy kokonaan, mutta olosuhteiden palautuessa normaaleiksi myös laitteen toiminta palautuu ennalleen. Pysyvää rikkoutumista käsitellään luvussa 4. Koska tämän työn tarkoituksena on selvittää taajuusmuuttajan piirikorttiin tarvittavat muutokset, jotta sen toiminta voitaisiin varmistaa tavallista laajemmalla lämpötila-alueella, täytyy eri komponenttien toiminnan muutokset lämpötilan suhteen tuntea.

Tässä luvussa käsitellään eri komponenttityyppien käyttäytymistä lämpötilan muuttuessa. Komponentit esitellään lyhyesti, jonka jälkeen käydään läpi kunkin komponenttityypin lämpötilan suhteen oleellisesti muuttuvat parametrit. Koska ympäristölämpötilan lisäksi komponenttien sisäiseen lämpötilaan vaikuttaa huomattavasti komponenteissa muodostuva häviöteho, käydään läpi myös kunkin komponentin häviöiden muodostuminen ja häviötehon suuruuden laskeminen.

3.1 Passiivikomponentit

3.1.1 Vastukset

Vastukset ovat hyvin yleisiä elektroniikan peruskomponentteja. Ne jaotellaan eri luokkiin niiden valmistustekniikan ja materiaalien mukaan ja pääasialliset käyttökohteet riippuvat vastuksen tyypistä. Lisäksi erityyppiset vastukset käyttäytyvät lämpötilan muutoksissa eri tavoin.

Pintaliitosvastuksien yleisimmät luokat ovat paksu- ja ohutkalvovastukset, sekä metallikalvovastukset. Näiden lisäksi on myös hiilikalvovastuksia ja virranmittausvastuksia. Pintaliitosvastuksissa kontaktien väliin valmistetaan ohut kalvo halutusta materiaalista, jonka jälkeen resistanssiarvo asetetaan kohdalleen esimerkiksi leikkaamalla kalvoa laserilla. Lopuksi vastus koteloidaan eristävällä materiaalilla. Paksu- ja ohutkalvovastuksien resistiiviseen kalvoon seostetaan erilaisia aineita, joiden avulla lämpötilakäyttäytyminen ja muut ominaisuudet saadaan halutuksi. Materiaalin johtavuuden muutoksien lisäksi lämpökäyttäytymiseen vaikuttaa myös materiaalin lämpölaajeneminen. [3]

Lankavastukset koostuvat keraamisen ytimen ympärille kierretystä vastuslangasta, ja ne ovat lämpötilan suhteen hyvin vakaita, sillä vastusarvo riippuu vain vastuslangan materiaalin ominaisuuksista. Lisäksi lankavastukset on usein suunniteltu kestäämään suuria tehoja ja toimimaan kuumana, joten niiden lämmönkesto on hyvä. Lankavastuksen vastusarvo

asetetaan kohdalleen tekemällä vastuslankaan pieni lovi, joka rankoissa olosuhteissa (kuten lämpösyklus, luku 4.7) voi toimia rikkoutumisen alkamiskohtana. [4]

Vastuksien resistanssin muutos suhteessa lämpötilaan ilmoitetaan yleensä miljoonasosina (ppm, engl. *Parts Per Million*) yhden asteen lämpötilan muutosta kohti ja vastuksen korkein toimintalämpötila riippuu sen rakenteesta. Tyypillisiä arvoja eri vastustyypeille on liitteen A taulukossa A1. Lämpötilan noustessa 100 °C, aiheuttaa 100 ppm/°C lämpötilakerroin 1 % muutoksen vastusarvoon ja 500 ppm/°C lämpötilakerroin 5 % muutoksen vastusarvoon. Lisäksi tarkkuutta vaativissa sovelluksissa on otettava huomioon vastuksen stabiilisuus, eli resistanssin muuttuminen vastuksen vanhentuuessa korkeassa lämpötilassa.

Vastuksia käytetään usein esimerkiksi jännitteenjakopiireissä, jolloin saman suhteellisen lämpötilakertoimen omaavilla vastuksilla jakosuhte pysyy lämpötilan suhteen muuttumattomana.

3.1.2 Kondensaattorit

Toinen peruskomponenttiryhmä ovat kondensaattorit, jotka vastusten tapaan jaotellaan materiaalien ja rakenteen mukaan. Eräs yleisesti käytetty kondensaattorityyppi on alumiinielektrolyyttikondensaattori, jossa sähkökenttä muodostuu kahden, yleensä alumiinisen, kalvon väliin. Kalvoista ainakin toinen on pinnoitettu alumiinioksidilla, joka toimii eristeenä, ja kalvojen välissä on elektrolyytinestettä. Toinen yleinen kondensaattorityyppi ovat keraamiset kondensaattorit, joissa metallilevyjen välissä eristeenä on keraamista materiaalia. Yleensä keraamiset kondensaattorit koostuvat useista kerroksista. Muita kondensaattorityyppejä ovat muun muassa filmikondensaattorit ja polymeerikondensaattorit, joissa eristeenä on muovinen kalvo tai orgaaninen polymeeri. Tässä työssä käsitellään vain kondensaattoreiden lämpötilakäyttäytymistä, joten työn ulkopuolelle jäävät muun muassa kondensaattorityypeille ominaiset kapasitanssiarvot, dielektrisen häviön suuruus ja fyysinen koko.

Lämpötila vaikuttaa muun muassa kondensaattoreiden sarjaresistanssiin, kapasitanssiarvoon ja jännitekeston. Parametrien muutokset johtuvat lämpötilariippuvuuksista johtimissa, kondensaattorilevyissä ja eristemateriaalissa. Lämpötilamuutokset ovat hyvin erilaisia kondensaattorityyppien välillä.

Alumiinielektrolyyttikondensaattoreiden ekvivalenttinen sarjaresistanssi R_{ESR} on usein suuri, mutta se pienenee nopeasti lämpötilan kasvaessa. Varsinkin korkeajännitekondensaattoreilla ilmiö on huomattava: sarjaresistanssi voi puolittua siirryttäessä 20 °C lämpötilasta 40 °C lämpötilaan ja -40 °C lämpötilassa sarjaresistanssi voi olla kymmeniä ohmeja. Toisaalta korkea lämpötila nopeuttaa kondensaattorin elektrolyytin haihtumista kondensaattorin kotelon ja pohjan välisestä saumasta. Elektrolyytin vähenemisestä seuraa kondensaattorin sarjaresistanssin jopa neliöllinen kasvu käyttöiän suhteen. Haihtumista voidaan hidastaa pienentämällä kondensaattorin kotelon ja pohjan sauman pituutta

suhteessa tilavuuteen. Koska halkaisijan suurentaminen kasvattaa sauman pituutta lineaarisesti, mutta tilavuutta neliöllisesti, on suuremman halkaisijan elektrolyyttikondensaattoreilla tyypillisesti pidempi elinikä. [5]

Lämpötilan noustessa elektrolyyttikondensaattoreiden kapasitanssi kasvaa, mutta elektrolyytin kuivuminen korkeammissa lämpötiloissa johtaa kapasitanssiarvon laskuun ikääntymisen myötä. Suuren pinta-alan, eli suuren kapasitanssiarvon, omaavilla kondensaattoreilla kapasitanssin suhteellinen muutos on suurempi kuin pienillä kondensaattoreilla. Myös kondensaattorin vuotovirta kasvaa ikääntymisen myötä [6]. Matalassa lämpötilassa kapasitanssin pieneneminen on huomattavaa, ja lämpötilan mennessä riittävän alas nestemäinen elektrolyytti jäätyy ja menettää ominaisuutensa. Nykyisin käytössä olevilla elektrolyyteillä kondensaattoreiden pienin toimintalämpötila voi olla jopa $-45 \dots -55 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tantaalikondensaattorit ovat rakenteeltaan hyvin lähellä alumiinielektrolyyttikondensaattoreita; niissä eristeenä toimii joko nestemäinen tai kiinteä (kuiva) tantaali. Nestemäisillä tantaalikondensaattoreilla kapasitanssi käyttäytyy lämpötilan ja ikääntymisen suhteen hyvin samalla tavalla kuin alumiinielektrolyyttikondensaattoreilla, mutta kuivilla tantaalikondensaattoreilla lämpötilavaikutukset ovat huomattavasti pienemmät ja ikääntymisilmiötä ei esiinny lähes ollenkaan.

Polymeerikondensaattoreissa elektrolyytti on korvattu joko orgaanisella puolijohteella tai johtavalla polymeerikalvolla. Nestemäisiin elektrolyyttikondensaattoreihin verrattuna polymeerikondensaattoreilla on pienempi R_{ESR} , joka on myös vakaampi kylmissä olosuhteissa. Kiinteä elektrolyytti ei haihdu komponentin ikääntyessä, jolloin kapasitanssi pysyy vakaampana ja kondensaattorin elinikä pitenee lämpötilan laskiessa enemmän kuin alumiinielektrolyyttisen. [7]

Keraamisten kondensaattoreiden kohdalla lämpötilavaikutuksia kuvataan yleensä EIA:n (engl. *Electronics Industries Alliance*) EIA-198-1-F -standardin mukaisella nimeämiskäytännöllä. Tällöin kondensaattorille annetaan kolmemerkkinen tyyppikoodi, joka kuvaa kondensaattorin toimintalämpötila-alueen ja toleranssia tällä alueella. Standardi määrittelee neljä eri luokkaa, joista tässä työssä käsitellään vain luokkia 1 ja 2. Luokat 3 ja 4 jäävät työn ulkopuolelle, sillä ne käsittelevät kondensaattoreita, joiden ominaisuuksilla, kuten kapasitanssilla lämpötilan suhteen tai vuotovirroilla, ei ole suurta merkitystä.

Luokan 1 kondensaattorit ovat lämpötilakompensoituja ja tarkoitettu resonanssipiireihin, joissa kondensaattorilta vaaditaan suurta hyvyyslukua ja kapasitanssin vakautta sekä lämpötilan että käyttöiän suhteen. Luokan 1 koodissa (taulukko 3) ensimmäinen kirjain kertoo kapasitanssin muutoksen miljoonasosissa jokaista asteen muutosta lämpötilassa kohti ($\text{ppm}/^\circ\text{C}$), keskimäinen numero on kerroin ja viimeinen kirjain kapasitanssin toleranssi miljoonasosissa lämpötilan muutoksen suhteen ($\text{ppm}/^\circ\text{C}$) lämpötila-alueella $25 \dots 85 \text{ }^\circ\text{C}$. Esimerkiksi usein käytettävän C0G-tyyppisen kondensaattorin kapasitanssin muutos on suurimmillaan $-0,3 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ (lämpötilakerroin $0 \dots 0,3 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, joka kerrotaan luvulla -1) toleranssin ollessa $\pm 30 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. [8]

Taulukko 3: Luokan 1 kondensaattoreiden merkinnät. Toleranssi tarkoittaa kapasitanssin muutosta nimellisestä 25 . . . 85 °C lämpötilavälillä. [8]

Lämpötilakerroin [ppm/°C]		Kerroin		Toleranssi [ppm/°C]	
C	0,0	0	-1	G	±30
B	0,3	1	-10	H	±60
L	0,8	2	-100	J	±120
A	0,9	3	-1000	K	±250
M	1,0	4	1	L	±500
P	1,5	6	10	M	±1000
R	2,2	7	100	N	±2500
S	3,3	8	1000		

Luokan 2 kondensaattorit ovat tarkoitettu sellaisiin sovelluksiin, joissa hyvyysluku ja kapasitanssin vakaus eivät ole kriittisiä. Luokan 2 koodin ensimmäinen kirjain kertoo toimintalämpötila-alueen minimin, keskimäinen numero maksimin ja viimeinen kirjain on kapasitanssin vaihteluväli tällä alueella. Merkkien selitykset ovat taulukossa 4. Esimerkiksi yleisen X7R-tyyppisen kondensaattorin toimintalämpötila-alue on -55...125 °C, jolla kapasitanssi pysyy ±15 % rajoissa. Vielä parempi lämmönkesto on X8R-tyypillä, jonka toimintalämpötila-alue on -55...150 °C ja vaihteluväli sama ±15 %. [8]

Taulukko 4: Luokan 2 kondensaattoreiden merkinnät. Toleranssi tarkoittaa kapasitanssin muutosta nimellisestä koko toimintalämpötila-alueella. [8]

Alin lämpötila [°C]	Korkein lämpötila [°C]	Toleranssi [%]			
X	-55	2	45	A	±1
Y	-30	4	65	B	±1,5
Z	-30	5	85	C	±2,2
		6	105	D	±3,3
		7	125	E	±4,7
		8	150	F	±7,5
				P	±10
				R	±15
				S	±22
				T	-33 / +22
				U	-56 / +22
				V	-82 / +22

Luokan 2 kondensaattoreiden dielektriselle materiaalille on tyypillistä ikääntyminen, josta seuraa kapasitanssin pieneneminen. Ikääntyminen johtuu sähkökentän aiheuttamasta

kiderakenteen muuttumisesta ja siitä seuraava kapasitanssin muutos on jotakuinkin vakio aina käyttöiän kymmenkertaistuesssa. Ikääntyminen lasketaan siitä hetkestä, kun kondensaattori on edellisen kerran kuumennettu sen Curie-lämpötilan yläpuolelle, tyypillisesti lämpötilaan 150 °C, jossa dielektrisen materiaalin kiderakenne järjestyy uudelleen. Ikääntymisilmiö voidaan kumota ja nimellinen kapasitanssi palauttaa kuumentamalla kondensaattori uudelleen Curie-lämpötilan yläpuolelle. [8] [9]

Kaikille keraamisille kondensaattoreille on tavallista, että nimellinen kapasitanssi saavutetaan huoneenlämmössä. Tätä korkeammassa ja matalammassa lämpötiloissa kapasitanssi tyypillisesti pienenee [10]. Lisäksi ikääntymisilmiön vuoksi nimellinen kapasitanssiarvo mitataan tyypillisen käyttöiän, yleensä 1000 tunnin, perusteella, minkä vuoksi uuden kondensaattorin kapasitanssi vaikuttaa usein suurelta nimelliseen verrattuna. [8]

Filmikondensaattoreissa anodin ja katodin välillä on ohut eristekalvo (filmi). Kalvon materiaali vaikuttaa huomattavasti kondensaattorin ominaisuuksiin. Kalvo voi olla esimerkiksi muovia, lasia tai teflonia. Yleisimmät muovityypit ovat polypropeeni (PP), polyeteenitereftalaatti (PET), polofenyleenisulfidi (PPS) ja polyetyleeninaftalaatti (PEN).

Muovikalvoisten kondensaattoreiden suurimpaan käyttölämpötilaan vaikuttaa muun muassa muovimateriaalin eristysvastuksen pieneneminen lämpötilan noustessa yli materiaalille ominaisen rajan, joka on yleensä 20...80 °C. Käyttölämpötilaa voidaan nostaa tästä rajasta vielä korkeammaksi rajoittamalla kondensaattorin jännitettä. Häviökerroin (kaava 1) riippuu eristemateriaalista; PP:n ja PPS:n häviökerroin on pieni koko toimintalämpötila-alueella, kun taas PEN:n häviökerroin on suurempi ja kasvaa lämpötilan noustessa. PET:n häviökerroin on kylmässä ja kuumassa suuri, ja näiden välillä pieni. [11]

Teflon-kondensaattoreilla käyttölämpötila voi olla jopa -65...200 °C, mica-paperikondensaattoreilla kyllästysaineesta riippuen -65...125 °C (epoksi), -55...200 °C (polyesteri) tai jopa 260 °C (silikoni). Lasikondensaattoreiden kapasitanssi ja häviökerroin pienenevät ja vuotovirta kasvaa lämpötilan noustessa. Mica-paperikondensaattoreiden ja teflon-kondensaattoreiden ominaisuudet ovat erittäin vakaita lämpötilasta riippumatta. [12] [13]

Kondensaattoreiden vaihtovirran AC-tehohäviö ilmaistaan häviökertoimella D_f (engl. *dissipation factor*), joka on resistiivisen tehohäviön ja kondensaattorissa oskilloivan reaktiivisen tehon suhde,

$$D_f = \tan \delta = \frac{R_{ESR}}{|X_c|} = \omega C R_{ESR} \quad , \quad (1)$$

jossa R_{ESR} on kondensaattorin ekvivalenttinen sarjaresistanssi, X_c reaktanssi, ω vaihtosähköön kulmataajuus ja C kondensaattorin kapasitanssi. Häviökerroin ilmoitetaan usein prosentteina. Rippelivirran (aaltoiluvirta) aiheuttama keskimääräinen resistiivinen tehohäviö lasketaan R_{ESR} :n avulla, $P_r = R_{ESR} I_{RMS}^2$, jossa I_{RMS} on rippelivirran tehollisarvo.

Kondensaattorin kokonaistehohäviö koostuu dielektrisistä häviöistä P_d ja resistiivisistä häviöistä P_r

$$P = P_d + P_r = \hat{V}_{AC}^2 \pi f C \tan \delta + I_{RMS}^2 R_{ESR} \quad , \quad (2)$$

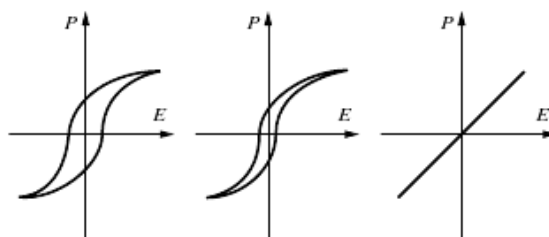
jossa \hat{V}_{AC} on symmetrisen AC-jännitteen huippuarvo, f taajuus ja $\tan \delta$ dielektrisen materiaalin häviökerroin. [14]

Liitteen B taulukkoon B1 on kerätty eri kondensaattorityyppien parametreja, kuten toimintalämpötila-alue, kapasitanssin lämpötilakerroin ja stabiilisuus.

3.1.3 Kelat ja muuntajat

Kolmas passiivikomponenttiluokka ovat kelat, joissa sydänmateriaalin, yleensä ilman, raudan tai ferriitin, ympärille on kierretty johdinkäämejä. Kelasta saadaan muuntaja käämimällä useita keloja saman rungon ympärille. Lämpötilan vaikutuksesta sekä johdintta sydänmateriaalin ominaisuudet muuttuvat, mistä seuraa myös kelan tai muuntajan ominaisuuksien muutos.

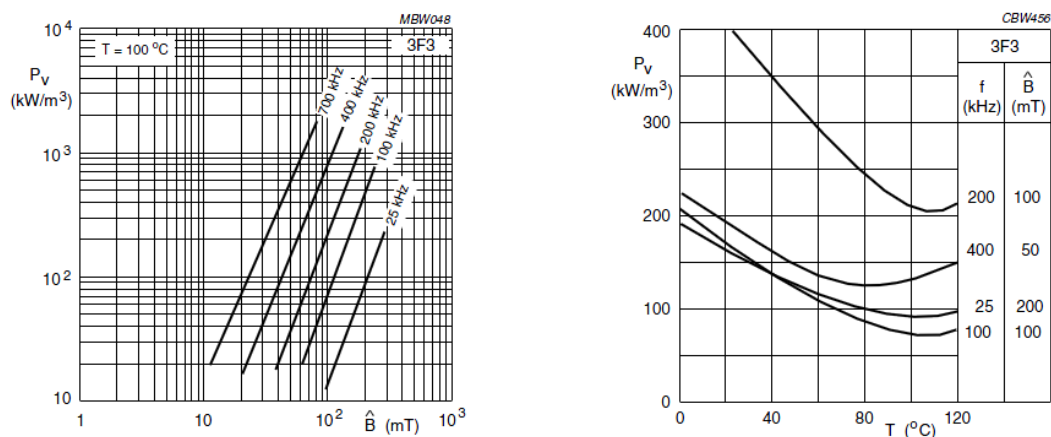
Ferromagneettisilla materiaaleilla, joita usein kutsutaan ferriiteiksi, lämpötila vaikuttaa kiderakenteeseen. Kiderakenteen muutokset ovat jokaiselle materiaalille ominaisia, mutta muutoksen vaikutus näkyy varsinkin materiaalin dielektrisessä vakiossa. Lisäksi matalissa lämpötiloissa pienemmän lämpöliike-energian vuoksi magneettisten momenttien järjestymiseen vaaditaan enemmän energiaa ulkoisesta kentästä, jolloin materiaalin hystereesikäyrä (kuva 4) on leveä. Lämpötila noustessa nollautumiseen vaadittavan kentän voimakkuus laskee, mikä johtaa kapeampaan hystereesikäyrään. Jos lämpötila nostetaan yli Curie-lämpötilan, muuttuu materiaali ferromagneettisesta paramagneettiseksi, se menettää magneettiset ominaisuutensa ja hystereesikäyrä muuttuu suoraksi viivaksi. [15, s. 384] [16, s. 187]



Kuva 4: Esimerkki lämpötilan vaikutuksesta ferromagneettisen aineen hystereesikäyrään. Vaaka-akselilla on ulkoinen magneettikenttä ja pystyakselilla materiaalin sisäinen. [15, s. 384]

Syötettäessä kela tai muuntajaa sinimuotoisella jännitteellä, vastaa hystereesikäyrän sisälle jäävä alue sydänmateriaalissa muodostuvia häviöitä. Tämän vuoksi lämpötilan noustessa sydänhäviöiden määrä pienenee [17, s. 26]. Kuitenkin muun muassa anisotropian ja

pyörrevirtojen sekä niiden lämpötilakäyttäytymisen vuoksi tietyn materiaalille ominaisen lämpötilan yläpuolella häviöt alkavat jälleen kasvaa. Sopivilla materiaalivalinnoilla saadaan sydänhäviöiden minimi asetettua oletettuun käyttölämpötilaan, esimerkiksi 80...100 °C alueelle. Esimerkki erään materiaalin sydänhäviöistä lämpötilan funktiona on kuvassa 5. Koska sydänhäviöt vaikuttavat kelan hyvyyslukuun, eli Q-arvoon, tarkoittaa häviöiden pieneneminen Q-arvon kasvua. Myös kelan induktanssi muuttuu sydänmateriaalin ominaisuuksien muuttuessa. Tämän vuoksi kelojen valinnassa sydänmateriaaliin on kiinnitettävä erityistä huomiota, mikäli sovellus on tarkka kelan induktanssille ja hyvyysluvulle.



Kuva 5: Erään ferriittimateriaalin sydänhäviökäyrä magneettivuon tiheyden ja taajuuden sekä lämpötilan funktiona [18]

Muuntajien häviöteho on summa käämilangan resistiivisistä häviöistä ja muuntajasydämen häviöistä. Käämilangan häviöt riippuvat käytetyistä johdinmateriaaleista sekä johtimen paksuudesta ja pituudesta. Muuntajasydämen häviöt taas riippuvat lämpötilan lisäksi myös kytKentätaajuudesta, magneettivuontiheydestä ja ytimen pinta-alasta, minkä vuoksi valmistajat yleensä antavat datalehdessä käyrän sydänhäviöistä eri parametrien arvoilla, kuten kuvassa 5.

3.1.4 Kiteet ja oskillaattorit

Kiteet ovat pietsosähköiseen ilmiöön perustuvia komponentteja, joilla saadaan aikaan tietyn taajuinen värähtelevä signaali. Oskillaattoreissa on kiteen yhteyteen valmiiksi liitetty muuta elektroniikkaa, kuten vahvistin, jolla värähtelystä muodostetaan logiikkatasoinen signaali. Myös muiden värähtelypiirien, kuten esimerkiksi resonanssi- tai piirien, käyttö kiteen tilalla on mahdollista.

Kiteillä lämpötila vaikuttaa huomattavasti värähtelytaajuuteen, ja kiteen leikkauksella on suuri merkitys siinä, miten lämpötila muuttaa taajuutta [4]. Usein kiteet on leikattu siten,

että taajuuskäyttäytyminen muodostaa paraabelin, jonka huippu tai pohja on huoneenlämpötilassa, eli taajuus on kohdallaan huoneenlämmössä mutta poikkeaa siitä sekä kylmemmissä että kuumemmissä lämpötiloissa [19].

Monesti oskillaattoreissa kiteen lämpötilakäyttäytymistä tasataan piirin sisäisellä lämpöanturilla sekä kompensointipiirillä. Näiden huonona puolena on kuitenkin hitaasta vasteesta lämpötilamuutoksiin johtuva taajuuden vaeltaminen sekä arvaamaton taajuuskäyttäytyminen nopeissa lämpötilamuutoksissa. [20]

3.2 Puolijohdeet

Puolijohdemateriaalit ovat avainasemassa nykyisissä elektronisissa komponenteissa. Puolijohdeiden sähkönjohtavuus sijoittuu eristeiden ja johteiden väliin, ja siihen voidaan vaikuttaa seostamalla materiaaliin epäpuhtauksia. Erilaisia puolijohdemateriaaleja yhdistämällä saadaan rakennettua komponentteja, jotka reagoivat ulkoiseen jännitepotentiaaliin halutulla tavalla.

Puolijohdeet erotetaan eristeistä ja johteista niiden valenssivyön ja johtavuusvyön välisen energian, eli kielletyn energiavälin, suuruuden perusteella. Nykyisin yleisessä käytössä olevien puolijohdemateriaalien väiden välinen energia on tyypillisesti alle 2 eV. [21]

Luontaisessa puolijohdeessa suurin osa vapaista varauksenkuljettajista on peräisin puolijohdemateriaalista itsestään, ja siirtyessään johtavuusvyölle ulkoisen sähkökentän, valon tai lämpöenergian vaikutuksesta jää valenssivyölle aukko. Tällaisen puolijohdeiden vapaiden varauksenkuljettajien määrä kuutiokeskimetrimetrissä, eli varauksenkuljettajien tiheys, noudattaa kaavaa

$$n_i^2 = BT^3 e^{-\frac{E_g}{k_B T}} \quad , \quad (3)$$

jossa B on puolijohdeiden materiaali parametri (piille $5,4 \cdot 10^{31}$), E_g on kielletyn energiavälin suuruus ja k_B on Boltzmannin vakio. T on absoluuttinen lämpötila Kelvineinä. Kaavasta nähdään, että vapaiden varauksenkuljettajien määrä riippuu vahvasti lämpötilasta kasvaen lämpötilan noustessa. [21, s. 30][22]

Seospuolijohdeessa materiaaliin on seostettu epäpuhtauksia, joka luo uusia vöitä joko valenssivyön (p-tyypin puolijohde) tai johtavuusvyön (n-tyypin puolijohde) läheisyyteen. Nämä ovat yleensä muutaman meV:n päässä vyöstä, joten huoneenlämmössä käytännössä kaikki epäpuhtausatomit luovuttavat elektronin tai aukon puolijohdeeseen. Seostetussa puolijohdeessa tapahtuu matalassa lämpötilassa ”jäätymisen”, eli varauksenkuljettajatiheys putoaa nolnaan, ja kuumassa puolijohdemateriaalin varauksenkuljettajamäärä ylittää runsaasti epäpuhtauksista johtuvan varauksenkuljettajamäärän. [21, s. 35–37]

Varauksenkuljettajien liikkuvuudelle pätee

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_I} + \frac{1}{\mu_{fon}} \quad , \quad (4)$$

jossa μ_{fon} on fononisironnan rajoittama liikkuvuus ja μ_I on epäpuhtaussironnan rajoittama liikkuvuus. Nämä ovat

$$\mu_{fon} = \frac{q\tau_{fon}}{m^*} \sim (m^*)^{-5/2} T^{-3/2} \quad (5)$$

$$\mu_I = \frac{q\tau}{m^*} \sim \frac{T^{3/2}}{\sqrt{m^* N_i}} \quad , \quad (6)$$

joissa N_i on sirottajien tiheys, m^* varauksenkuljettajan efektiivinen massa (piissä elektronin m^* on $0,26m_e$) ja τ ja τ_{fon} relaksaatioajat. Kaavoista nähdään, että matalissa lämpötiloissa liikkuvuus on epäpuhtaussironnan rajoittamaa ja lämpötilan noustessa liikkuvuus kasvaa. Kuitenkin lämpötilan kohotessa fononisironna voimistuu ja alkaa rajoittaa liikkuvuutta. Liikkuvuuden maksimi saavutetaan yleensä 70...100 K lämpötilassa. [21, s. 55][23, s. 140–142]

Elektronien ja aukkojen liikkuvuuksista μ_n ja μ_p saadaan elektronien diffuusionopeus v_d ja johtavuus σ kaavoilla

$$v_d = \mu_n E \quad (7)$$

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad , \quad (8)$$

joissa E on sähkökenttä, n elektronien tiheys, p aukkojen tiheys ja q alkeisvaraus [21, s. 56]. Koska diffuusionopeus ja johtavuus riippuvat suoraan liikkuvuuksista, käyttäytyvät ne lämpötilan suhteen samoin kuin liikkuvuus: pienenevät sekä matalissa että korkeissa lämpötiloissa. Tämä johtaa puolijohdeiden toiminnan hidastumiseen varsinkin korkeissa lämpötiloissa.

Lämpölaajeneminen aiheuttaa puolijohdemateriaalissa atomien etäisyyksien kasvamista, mikä puolestaan pienentää kiellettyä energiaväliä E_g . Energiavälin pieneneminen aiheuttaa varauksenkuljettajatiheyden kasvamista, mikä puolestaan lisää esimerkiksi vuotovirtoja ja kohinaa puolijohdekomponenteissa.

3.2.1 Puolijohdemateriaalit

Puolijohdekomponenttien valmistusmateriaaleilla on huomattava merkitys siinä, kuinka korkeaan lämpötilaan komponentit soveltuvat. Eräs puolijohdekomponenttien toimintaa rajoittava tekijä on vuotovirtojen, eli esimerkiksi diodin estosuuntaan kulkevan virran, kasvaminen lämpötilan noustessa. Yksi tapa arvioida materiaalin toimintalämpötilan ylärajaa onkin vertailla esimerkiksi puolijohdediodin vuotovirtaa, joka riippuu varauksenkuljettajatiheydestä. Taulukkoon 5 on kerätty yleisimpien puolijohdemateriaalien lämpötila-alueet, jotka on saatu vertaamalla materiaalien varauksenkuljettajatiheyttä (kaava 3) germaniumin varauksenkuljettajatiheyteen 100 °C lämpötilassa, jonka on havaittu olevan hyvä yläraja germaniumpuolijohdeiden käytölle. [24].

Korkeamman kielletyn energiavälin materiaaleilla on korkeamman toimintalämpötilan lisäksi myös parempi jännitteenkesto, ja osalla materiaaleista myös parempi lämmönjohtokyky. Lisäksi suuremman kielletyn energiavälin omaavista materiaaleista saadaan valmistettua komponentteja, joissa syntyvät häviöt ovat huomattavasti piikomponenttia pienempiä. Kuitenkin näistä materiaaleista valmistettujen puolijohdeiden saatavuus on toistaiseksi heikkoa ja hinta korkea piipohjaisiin puolijohdeisiin verrattuna. Korkean kielletyn energiavälin komponentit soveltuvatkin tällä hetkellä paremmin tehoelektroniikan soveluksiin. [25] [26]

Taulukko 5: Eri puolijohdemateriaalien kielletyn energiavälin energiat ja niiden korkeimmat toimintalämpötila-alueet. ⁽¹⁾ viittaa lähteeseen [24] ja ⁽²⁾ lähteeseen [26]

Materiaali	Kielletty energiaväli [eV]	Lämpötilaraja [°C]
Ge ⁽¹⁾	0,7	100
Si	1,12	250 ⁽¹⁾ / 150 ⁽²⁾
InP ⁽¹⁾	1,25	400
SOI ⁽²⁾	1,12	300
GaAs	1,35	450 ⁽¹⁾ / 250 ⁽²⁾
6H-SiC ⁽²⁾	3,03	700
4H-SiC ⁽²⁾	3,26	750
GaN ⁽²⁾	3,45	> 700
Timantti ⁽²⁾	5,45	1100

Paitsi korkeamman kielletyn energiavälin omaavien puolijohdemateriaalien käyttö, myös eristemateriaalien lisääminen edesauttaa komponenttien toimintaa korkeassa lämpötilassa. Koska usein toiminnan yläraja määrittyy vuotovirran suuruudesta, voidaan eristekerrokseen upotettujen puolijohderakenteiden (SOI, engl. *Silicon On Insulator*) avulla estää vuotovirtojen kulkeminen substraatin kautta. Tällöin esimerkiksi usean transistorin ketjussa vähiten vuotava transistori määrittää koko ketjun vuotovirran. Lisäksi myös hajakapasitanssit ja kohina pienenevät. Toistaiseksi SOI-komponentit ovat kuitenkin kalliimpia kuin tavalliset piipohjaiset komponentit.

Koska korkeammassa lämpötilassa toimivien puolijohdemateriaalien hinta ja saatavuus on vielä heikompaa kuin piipohjaisten, ja tämän työn kohteena olevan piirikortin toimintalämpötila-alueen tavoite on alle piikomponenttien toimintalämpötilan ylärajan, voidaan piikomponentteja käyttää, kunhan vuotovirtojen kasvu ja muut lämpötilan aiheuttamat muutokset otetaan suunnittelussa huomioon.

3.2.2 Diodit

Diodit koostuvat joko PN-tyyppisestä puolijohdeliitoksesta tai metalli–puolijohde-liitoksesta, jolloin diodia kutsutaan schottky-diodiksi. Ideaalinen diodi päästää virtaa läpi äärettömästi jännitteen ollessa positiivinen, mutta negatiivisella jännitteellä ei ollenkaan. Todellisuudessa diodit ovat epäideaalisia omaten kynnysjännitteen ja negatiivisen vuotovirran. Lämpötila vaikuttaa PN-liitosdiodeihin ja schottky-diodeihin hyvin samantapaisesti.

Diodin läpi olevaa virtaa voidaan approksimoida kaavalla

$$I = I_s(e^{\frac{v}{V_T}} - 1) \quad , \quad (9)$$

jossa n_d on diodin rakenteesta ja materiaaleista riippuva vakio, yleensä välillä 1 . . . 2, ja V_T on termien jännite $V_T = \frac{k_B T}{q}$, jossa q on alkeisvarauksen suuruus. I_s on saturaatiovirta,

$$I_s = Aq n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_n} + \frac{D_n}{L_n N_p} \right) \quad , \quad (10)$$

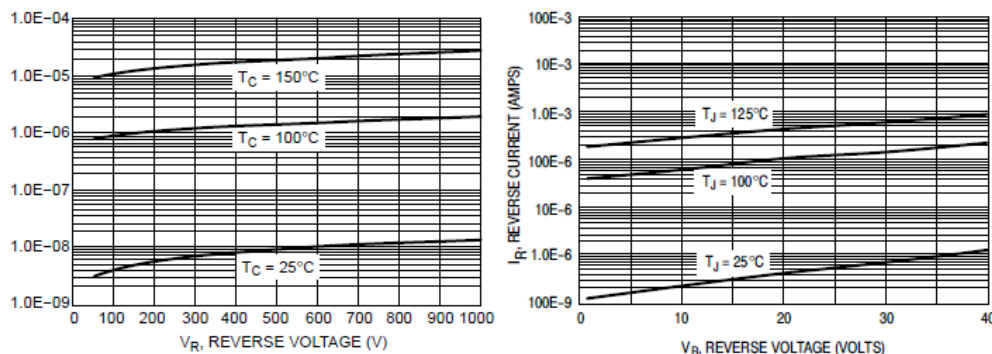
jossa A on liitoksen pinta-ala, L_n ja L_p elektronien ja aukkojen diffuusiosyvyydet, N_p ja N_n p- ja n-tyypin puolijohdeiden seostustiheys ja D_n ja D_p elektronien ja aukkojen diffuusiokertoimet. Koska ainoastaan n_i^2 ei ole diodiyksilölle vakio, on saturaatiovirta suoraan riippuvainen vapaiden varaustenkuljettajien määrästä, eli se on vahvasti lämpötilariippuvainen. Tyypillisesti I_s kaksinkertaistuu lämpötilan noustessa 5 °C. [22]

Koska lämpötilan noustessa V_T ja n_i^2 ja siten I_s kasvavat, kasvaa diodin virta lämpötilan noustessa vaikka diodin yli oleva jännite pidettäisiin vakiona. V_T :n kasvusta seuraa myös diodin kynnysjännitteen pieneneminen, eli diodi alkaa johtaa pienemmällä jännitteen arvoilla.

Diodin jännitteen ollessa negatiivinen, kaavan 9 mukaan virta diodin läpi on noin $-I_s$. Todellisuudessa kuitenkin estosuuntainen virta on huomattavasti I_s :ää suurempi. Esimerkiksi I_s :n ollessa 1 fA, voi vuotovirta olla suuruusluokaltaan 1 nA. Suurin osa estosuuntaisesta virrasta aiheutuu vuotovirroista, ja hyvä approksimaatio on, että negatiivinen virta kaksinkertaistuu aina lämpötilan noustessa 10 °C. Jos vuotovirta huoneenlämmössä on noin 1 nA, on esimerkiksi 125 °C lämpötilassa vuotovirta noin 1 μA. [22, s. 136]

Schottky-diodi on muuten hyvin samanlainen kuin PN-diodi, mutta sen toiminnassa on kaksi tärkeää eroa. Schottky-diodissa virtaa kuljettaa enemmistövarauksenkuljettajat (elektronit), minkä vuoksi diodia voidaan kytkeä päälle ja pois paljon nopeammin. Toiseksi schottky-diodin kynnysjännite on huomattavasti PN-diodin kynnysjännitettä pienempi. Matala kynnysjännite aiheuttaa myös huomattavasti PN-diodia suuremman estosuuntaisen vuotovirran, mikä voi rajoittaa schottky-diodin käyttökohteita. Kuvassa 6 on vertailtu tyypillistä estosuuntaista virtaa PN- ja schottky-diodeissa.

Diodissa syntyvä häviöteho lasketaan kertomalla diodin kynnysjännite sen läpi kulkevalla virralla, joten johtavassa tilassa $P_c = V_f I$ tai estävässä tilassa $P_b = V_r I_r$. Huomattavaa



Kuva 6: Tyypillinen estosuuntainen virta PN-diodissa (vasemmalla) ja schottky-diodissa (oikealla). Huomattavaa on schottky-diodin virran olevan noin satakertainen pienillä jännitteillä.

on, että kynnysjännite laskee lämpötilan noustessa ja diodin kuumentuessa siinä aiheutuva johtavuushäviö pienenee. Lämpötilan noustessa myös vuotovirta kasvaa, joten estosuuntaiset häviöt suurenevät. Lisäksi todellisilla diodeilla kestää hetki sammua virran kääntymisen jälkeen, mikä aiheuttaa pienen takavirran ja tehohäviön. Pienitehoisilla diodeilla tämä voidaan kuitenkin jättää huomiotta.

3.2.3 Loistediodit

Loistediodi (LED, engl. *Light-Emitting Diode*) on rakenteeltaan puolijohdediodin kaltainen, mutta LED:n kielletyn energiavälin energia on materiaalivalinnoilla ja seostuksella valittu siten, että rekombinoituvat aukko–elektroni-parit synnyttävät halutun aallonpituuden omaavia fotoneita. Monesti LED:ssä käytetään myös erilaisia fosforipäällysteitä muuttamaan syntyvän valon aallonpituutta. Loistediodia kutsutaan arkikielessä usein valodiodiksi, jolla perinteisesti tarkoitetaan valoherkkää diodia eikä valoa säteilevää diodia.

LED:n lämpötilan noustessa todennäköisyys fotoneja synnyttävään rekombinaatioon pienenee ja fononisironnan todennäköisyyden kasvun myötä useampi foton muuttuu LED:ssä lämmöksi. Nämä ilmiöt yhdessä pienentävät LED:n optista tehoa [27] [23]. Lyhytaikainen korkean kuumuuden aiheuttama valotehon pieneneminen palautuu kun LED:n lämpötila palaa normaaliksi, mutta pidempiaikainen korkea lämpötila nopeuttaa LED:n puolijohdemateriaalin ja osassa LED:ejä olevan fosforikerroksen hajoamista. Myös epäpuhtauksien kasaantuminen LED:n koteloon aiheuttaa valotehon pienenemistä. [28]

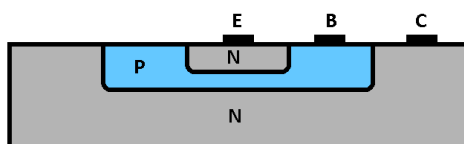
LED:stä emittoituvan valon taajuus riippuu materiaalin elektronivöiden etäisyydestä ja kaistanleveys muun muassa varauksenkuljettajien varausjakaumasta, sekä materiaalin seostuksesta. Lämpötilan noustessa emittoituvan valon taajuus laskee, eli valon aallonpituus pitenee, sillä käytettyjen puolijohdemateriaalien elektronivöiden etäisyys pienenee

lämpötilan noustessa. [27]

3.2.4 Bipolaaritransistorit

Bipolaaritransistoreita (BJT, engl. *Bipolar Junction Transistor*) on sekä PNP- että NPN-tyyppisiä. Tässä tarkastellaan vain NPN-tyyppisiä, joskin samankaltainen analyysi on johdettavissa myös PNP-bipolaaritransistoreille.

NPN-tyyppisessä bipolaaritransistorissa on seostettu vierekkäin n-tyyppistä, p-tyyppistä ja jälleen n-tyyppistä puolijohdetta (kuva 7). N-tyyppinen emitteri on seostettu vahvemmin kuin kollektori, jolloin p-tyyppisen kannan ja emitterin välille tuotu positiivinen jännite aikaansaa sekä pienen sähkövirran kannalta emitterille, että suuren virran kollektorilta emitterille.



Kuva 7: Bipolaaritransistorin periaatteellinen rakennekuva. E, B ja C ovat emitteri, kanta ja kollektori, P ja N viittaavat p-tyyppiseen ja n-tyyppiseen puolijohdteeseen. Kuva lähteen [22] mukaan.

NPN-bipolaaritransistorin kollektorivirta saadaan kaavasta

$$I_C = I_s e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}, \quad (11)$$

jossa I_s on saturaatiovirta, joka on bipolaaritransistorille

$$I_s = \frac{A_E q D_n n_i^2}{N_p W_B}, \quad (12)$$

jossa A_E on kanta-emitteriliitoksen pinta-ala, W_B kannan efektiivinen leveys ja V_{BE} kanta-emitteri-jännite. Koska ainoastaan varauksenkuljettajatiheys n_i^2 on lämpötilasta riippuva, kasvaa kantavirta lämpötilan noustessa vaikka kanta-emitteri-jännite pysyisi vakiona. [22]

Virralla ilmaistuna yhtälöiksi saadaan

$$I_C = \beta I_B, \quad (13)$$

jossa β on transistorin rakenteesta riippuva virtavahvistuskertoimen, I_C kollektorivirta ja I_B kantavirta, joka puolestaan on

$$I_B = \frac{I_s e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}}{\beta}, \quad (14)$$

jossa I_s on kaavan 12 mukainen. [22]

Kun BJT:tä käytetään piensignaalin vahvistimena, on se ensin biasoitu tiettyyn pisteeseen. Tällöin transistorin piensignaalin vahvistus jännitteelle, eli h_{fe} , kasvaa lämpötilan vaikutuksesta. [22]

BJT:n kollektorivirta nousee jyrkästi kantajännitteen ylittäessä transistorin kynnysjännitteen, joka on $V_{th} = e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$. Koska V_T on lämpötilariippuva, lämpötilan noustessa transistorin kynnysjännite laskee noin 2 mV jokaista 1 °C lämpötilan nousua kohti vaikka emitterivirta pysyisi vakiona. [22]

Bipolaaritransistorin kollektori–kanta-vuotovirta on huoneenlämmössä noin 1 nA ja se kaksinkertaistuu aina lämpötilan noustessa 10°C. Tällöin 125 °C lämpötilassa vuotovirran suuruus on noin 1 μA. [22]

Bipolaaritransistorin häviöteho koostuu vahvistimena käytettäessä pelkästään johtavuushäviöstä, sillä transistori on aina aktiivtilassa, jolloin siinä tapahtuu jännitehäviö. Kytkimenä käytettäessä jännitehäviö transistorin yli on pieni, mutta transistorin tilanvaihdosta aiheutuu häviöitä, jolloin kokonaishäviöteho on summa johtavuushäviöistä, kytkentähäviöistä sekä transistorin vuotovirroista aiheutuvista häviöistä. Johtavuushäviö P_c lasketaan kaavalla

$$P_c = V_{CE}I_C + V_{BE}I_B \quad , \quad (15)$$

jossa V_{CE} on transistorin kollektori–emitteri-jännite, joka riippuu kanta- ja kollektorivirroista.

Kytkimenä käytettäessä BJT:n kytkentähäviöteho P_{sw} lasketaan approksimoimalla jännitteen ja virran nousua ja laskua suorilla, joiden väliin jäävä alue vastaa syntyvää häviötehoa, jolloin keskimääräiseksi häviötehoksi saadaan

$$P_{sw} = \frac{1}{2}V_{BE}I_C f_{sw}(t_{on} + t_{off}) \quad , \quad (16)$$

jossa t_{on} ja t_{off} ovat päälle- ja pois kytkentäaikat ja f_{sw} kytkentätaajuus. [29]

Transistorin ollessa pois päältä aiheutuu vuotovirroista häviöteho

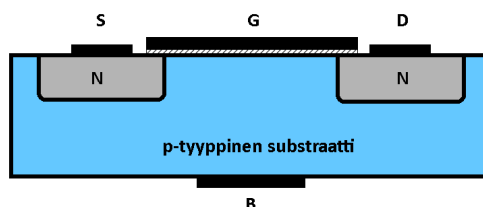
$$P_b = I_{CB}V_{CB} \quad , \quad (17)$$

jossa I_{CB} on vuotovirta kollektorista kannalle ja V_{CB} jännite kollektorin ja kannan välillä. Koska vuotovirta korkeissakin lämpötiloissa on usein vain mikroampeereja, on vuotovirroista aiheutuvien häviöiden osuus yleensä hyvin pieni muihin häviöihin verrattuna.

3.2.5 MOSFET

MOSFET (engl. *Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor*) voi olla rakenteeltaan joko N- tai P-tyyppinen. Tässä tarkastellaan vain N-tyyppistä MOSFET:a (kuva 8),

jossa nielu ja lähde koostuvat n-tyyppiseksi seostetusta puolijohdesta ja substraatti p-tyypistä. Hila, joka aiemmin oli metallia ja nykyisin usein polypitiä, on eristetty substraattista ohuella oksidikerroksella. Hilalle johdettu positiivinen jännite synnyttää eriste-kerroksen alle nielun ja lähteen yhdistävän kanavan, jolloin virta alkaa kulkea nielun ja lähteen välillä.



Kuva 8: N-tyyppisen MOSFET:n periaatteellinen rakennekuva. S, G, D ja B ovat lähde-, hila-, nielu- ja substraattiliitokset, kannan alla on ohut oksidikerros. N ja P viittaavat n- ja p-tyyppisiin puolijohteisiin. Kuva lähteen [22] mukaan.

N-tyyppiin MOSFET:n nieluvirran yhtälö on transistorin ollessa saturaatiossa

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W_C}{L_C} (V_{GS} - V_{th})^2 (1 + \lambda V_{DS}) \quad , \quad (18)$$

jossa I_D on nieluvirta, μ_n elektronien liikkuvuus, C_{ox} hilan ja kanavan välisen oksidikerroksen kapasitanssi, W_C ja L_C kanavan leveys ja pituus, V_{GS} kanta-lähde-jännite, V_{th} kynnysjännite, joka riippuu MOSFET:n rakenteesta, ja λ Early-jännite. [22, s. 371]

Hila-lähde-kynnysjännite riippuu lämpötilasta siten, että lämpötilan nousu pienentää kynnysjännitettä noin 2 mV jokaista 1 °C lämpötilan nousua kohti. [22]

MOSFET:lla tavanomaisesti pienillä hila-lähde-jännitteillä lämpötilan nousu johtaa ulostulovirran kasvuun, kun taas suuremmilla jännitteillä lämpötilan nousu pienentää ulostulovirtaa. Positiivinen lämpötilakerroin johtuu siitä, että pienellä hilajännitteellä V_{th} :n negatiivinen lämpötilakerroin dominoi aiheuttaen nieluvirran kasvamisen lämpötilan noustessa kun taas suurella hilajännitteellä elektronien liikkuvuuden pieneneminen aiheuttaa virran pienenemisen. Piste, jossa virran muutossuunta vaihtuu, kutsutaan tasapainopisteeksi ja se riippuu huomattavasti transistorin rakenteesta. [22][30]

$R_{DS,on}$:ia, eli nielu-lähde-resistanssia transistorin ollessa täysin kytkeytyneenä voidaan approksimoida kaavalla

$$R_{DS,on} = \frac{1}{\lambda \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W_C}{L_C} (V_{GS} - V_{th})^2} \quad , \quad (19)$$

joka yksinkertaistuu muotoon

$$R_{DS,on} = \frac{1}{\lambda I_D} \quad , \quad (20)$$

Koska I_D (kaava 18) pienenee lämpötilan noustessa, johtaa se MOSFET:n sarjaresistanssin kasvuun lämpötilan noustessa. [22, s. 372] [30]

Kun MOSFET:a käytetään kytkimenä, muodostuvat sen häviöt johtavuushäviöistä P_c , kytkentähäviöistä P_{sw} sekä estosuuntaisista häviöistä P_b , jotka usein ovat niin pieniä, että ne voidaan jättää huomiotta. Kokonaishäviö on siis $P = P_c + P_{sw} + P_b \approx P_c + P_{sw}$.

Johtavuushäviötä approksimoidaan MOSFET:n johtavan tilan nielu-lähde-resistanssilla $R_{DS,on}$

$$P_c = R_{DS,on} I_D^2 \quad . \quad (21)$$

Kytkentähäviöteho voidaan laskea samalla kaavalla 16 kuin bipolaaritransistorille, tosin korvaamalla V_{BE} MOSFET:n V_{DS} :llä ja I_C MOSFET:n I_D :llä.

Vuotovirran suuruutta voidaan arvioida kaavalla

$$I_{off} = 100 \frac{W_C}{L_C} 10^{\frac{-V_{th}}{(1 + \frac{C_{dep}}{C_{ox}})^{60} \frac{T}{300}}} \quad , \quad (22)$$

jossa C_{dep} tyhjennysalueen kapasitanssi. Vuotovirran suuruus huoneenlämmössä on yleensä nanoampeerin suuruusluokkaa ja 125 °C lämpötilassa kymmeniä nanoampeereita. [31]

Vuotovirrasta aiheutuva häviöteho saadaan kaavalla

$$P_b = I_{off} V_{DS} \quad . \quad (23)$$

Koska I_{off} on hyvin pieni myös korkeissa lämpötiloissa, ei vuotovirtahäviö ole käytännössä merkittävä.

3.2.6 Optoerottimet

Tyypillinen optoerotin muodostuu samaan koteloon sijoitetusta loistediodista sekä valotransistorista. Valotransistorissa kanta on yleensä jätetty kytkemättä ja valodiodin säteily ohjataan siihen. Tällöin valo saa aikaan transistorin kannalla rekombinaatiota, joka kollektori-emitteri-sähkökentän vuoksi saa aikaan kantavirran ja transistori alkaa johtaa.

Optoerottimen loistediodi toimii samoin kuin tavallinen loistediodi, eli sen lämpötilakäyttäytyminen on kuvattu luvussa 3.2.3. Koska loistediodien kirkkaus laskee lämpötilan noustessa, vaikuttaa se optoerottimen kytkeytymiseen. Optoerottimen virtavahvistus laskee lämpötilan noustessa ja loistediodien elinikä lyhenee nopeasti korkeissa lämpötiloissa, mikä johtaa lopulta optoerottimen toiminnan loppumiseen.

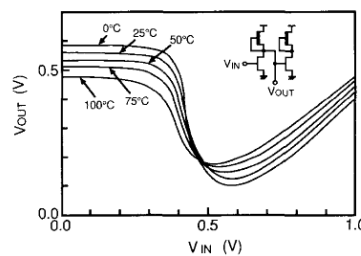
Valotransistorin ollessa pois päältä sen kollektorin ja emitterin välillä kulkee pieni vuotovirta, joka kasvaa lämpötilan noustessa. Lämpötilan aikaansaama vuotovirta kannalta emitteriin vahvistuu transistorin virtavahvistuskertoimella β , jonka vuoksi transistorin vuotovirta pimeässä voi olla suuruusluokaltaan jopa mikroampeereita.

3.2.7 Integroidut piirit

Integroiduilla piireillä (IC, engl. *Integrated Circuit*) tarkoitetaan sellaisia elektroniikan komponentteja, joihin on integroitu useita aktiivi- ja passiivikomponentteja. IC-piirejä ovat muun muassa vahvistimet, muistipiirit, logiikkapiirit, suorittimet ja lukuisat muut, hyvinkin monimutkaisia toimintoja suorittavat komponentit.

Aikaisemmissa luvuissa on käsitelty yksittäisen puolijohde- tai passiivikomponentin toimintaa lämpötilan suhteen, mutta IC-piireillä eri komponenttien yhteistoiminnan vuoksi analyysi on huomattavasti vaikeampaa. Yhteisiä ominaisuuksia on kuitenkin transistorien toiminnan hidastuminen lämpötilan noustessa, vuotovirtojen kasvaminen ja passiivikomponenttien parametrien muutokset.

Käytännössä lämpötilan nousu aiheuttaa useimmissa IC-piireissä kynnysjännitteiden laskua, jolloin pienemmät jännitteet tulkitaan ykköstilaksi. Lisäksi vuotovirrat aiheuttavat piirin sisäisten kondensaattorien purkautumisen nopeammin korkeammassa lämpötiloissa. Varsinkin DRAM-muistipiireillä (engl. *Dynamic Random Access Memory*) virkistysväli (muistisolun kondensaattorin uudelleenlataaminen) lyhenee, ja tietyn rajan yläpuolella kondensaattoria ei enää ehditä ladata ajoissa. Invertoivilla transistorikytkennöillä vuotovirta aiheuttaa lähdön ykkös- ja noltilojen lähenemisen, kuten kuvassa 9. [32]



Kuva 9: Esimerkki invertteripiirin tulo- ja lähtöjännitteistä lämpötilan funktiona. Vuotovirrat aiheuttavat lähtöjännitteen ykkös- ja noltilojen (0,5 V ja 0 V) lähentymisen. [32]

Puolijohdeiden toiminnan hidastuminen lämpötilan noustessa aiheuttaa signaalin etenemisviiveiden kasvua. Viiveiden suureneminen voi herkimmissä piireissä aiheuttaa piiriin sisäisten ajoitusten sekoittumisen, minkä seurauksena piiri ei enää toimi oikein. Myös komponenttiketjut, joissa on useita piirejä peräkkäin, voivat aiheuttaa signaaleihin niin suuren viiveen, että signaaleja vastaanottava piiri ei enää tulkitse niitä oikein.

Komponenttivalmistajat ilmoittavat komponenttien datalehdissä kullekin komponentille hyväksytyt käyttölämpötila-alueen, sekä tärkeimpien parametrien tyypilliset arvot sekä vaihteluvälin. Usein valmistajat myös antavat kuvaajan tärkeimpien parametrien tyypillisistä muutoksista lämpötilan suhteen. Suunnittelijan tehtävänä on päätellä annettujen arvojen perusteella, soveltuuko komponentti käyttötarkoitukseen ja miten ympäröivä piiri pitäisi suunnitella, jotta parametrien muutokset eivät vaikuttaisi toimintaan.

3.3 Muovit

Muoveja käytetään elektronisissa komponenteissa usein eristeenä esimerkiksi liittimien rungoissa. Tällöin on tärkeää, että muovi kestää liittimen nastojen välillä olevan jännitteen, ja että vuotovirta eristeessä on pieni. Lisäksi liittimeltä vaaditaan kestävyyttä ja jäykkyyttä, jotta liitin pysyy kiinni esimerkiksi värinässä ja iskuissa. Muita muovien käyttökohteita ovat kondensaattoreiden eristemateriaalit, joita on käsitelty aiemmin luvussa 3.1.2 sekä valo-ohjaimet merkkivaloille ja optiset kuidut tiedonsiirtoon.

Liittimissä käytetään usein materiaalina nylonia (usein PA 6,6 -tyyppistä) tai polymeerejä, kuten LCP:tä (engl. *Liquid Crystal Polymer*). Näistä kahdesta materiaalista nylon kestää huomattavasti korkeita lämpötiloja, minkä vuoksi LCP-eristeisten liittimien käyttö on suositeltavampaa.

Useimmiten muoviset valokuidut valmistetaan polymetyylimetakrylaatista (PMMA), polystyreenistä (PS) tai polykarbonaatista (PC). Kullakin materiaalilla on ominainen suurimman läpäisyn omaava aallonpituus, ja myös vaimennuksen määrä riippuu käytetystä muovista. Korkeimman toimintalämpötilan suhteen eräs kriittinen parametri on lasisiirtymän lämpötila, jossa amorfinen materiaali muuttuu kiinteästä pehmeäksi [27]. Muovisilla valokuiduilla lämpölaajenemiskerroin on suuri lasiin verrattuna, jolloin varsinkin lämpögradientit vaikuttavat huomattavasti kuidun ominaisuuksiin. Lisäksi muovisten kuitujen taitekeroin muuttuu lämpötilan suhteen enemmän kuin lasisten. Taulukkoon 6 on koottu yleisten valokuitumateriaalien ominaisia parametreja.

Taulukko 6: Muovisten valokuitumateriaalien parametreja [33]

Materiaali	Käyttölämpötila-alue [°C]	Lasisiirtymän lämpötila [°C]	Lämpölaajenemiskerroin [ppm/°C]	Taitekertoimen muutos [$10^{-5}/^{\circ}\text{C}$]
PMMA	-40 ... 92	105	67,4	-8,5
PS	-10 ... 82	100	60 ... 80	-12
PC	-100 ... 124	150	66 ... 70	-11,8 ... -14,3
Lasi (BK 7)	... 350	715	7,1	0,3

Muovisista valokuiduista polykarbonaatti soveltuu parhaiten laajalle lämpötila-alueelle. Sen vaimennus on kuitenkin muita muovimateriaaleja suurempi, mikä tulee ottaa huomioon suunnittelussa. Lasisten valokuitujen lämpötilankesto on paljon muovisia parempi, joten niiden käyttö on suositeltavaa, joskin ne ovat selkeästi muovisia kalliimpia.

4 Vioittuvuus

Vioittuvuus tarkoittaa laitteen virheellistä toimintaa tai toimimattomuutta, joka ei palaudu olosuhteiden normalisoituessa. Vioittuminen voi johtua joko pitkäaikaisen rasituksen aiheuttamasta komponenttiarvojen hitaasta muuttumisesta tai hetkellisestä suuresta rasituksesta, joka rikkoo jonkin komponentin tai liitoksen.

Vioittuvuuden yksi mekanismi on komponenttien ikääntyminen ja siitä johtuva parametrien pysyvä muutos. Esimerkiksi elektrolyyttikondensaattorin kuivuminen johtaa kapasitanssin ja sarjaresistanssin pysyvään muutokseen, joka voi lopulta estää laitteen toiminnan. Samoin optoerottimien loistediodin himmeneminen laitteen ikääntyessä aiheuttaa lopulta signaalitien katkeamisen ja laitteen virheellisen toiminnan. Parametrien muutokset ovat tyypillisesti hitaita ja ne voivat aiheuttaa aluksi satunnaisia virheitä, kunnes arvot ovat ajautuneet selvästi toimintarajan ulkopuolelle ja laitteen toiminta estyy.

Toinen, nopeampi mekanismi on ylikuumentumisen aiheuttama rikkoontuminen, esimerkiksi johtimen palaminen poikki, jos komponentissa aiheutuu liian suuri tehohäviö korkeassa lämpötilassa. Ylikuumentumisvaurio voi syntyä jo ensimmäisestä liian suuresta rasituksesta.

Kolmas mekanismi on lämpötilan muutosten, värinän ja iskujen aiheuttamat rasitukset. Rasituksia on esimerkiksi komponenttien ja piirilevyn erilaisista lämpölaajenemiskertomista komponentteihin aiheutuvat veto-, puristus- ja leikkausjännitykset. Jännitysten aiheuttama rasituskertymä voi lopulta muodostaa komponentteihin säröjä, jotka estävät niiden toiminnan.

Eräs elektronisten komponenttien luotettavuuslaskennan perusteoksista on MIL-HDBK-217 -standardi. Se on alun perin Yhdysvaltain puolustusministeriön tuottama kirja malleja, joilla kuvataan elektronisten komponenttien vikatiheyttä (FIT, engl. *Failures In Time*). Standardi sisältää taulukoituja luotettavuusarvoja suhteessa komponentin eri parametreihin, kuten lämpötilaan, jännitteeseen, materiaaleihin tai transistorimäärään. Standardi olettaa vikatiheyden olevan ajan suhteen vakio, mikä johtaa vikaantumismäärän eksponentiaaliseen kasvuun komponentin vanhetessa. MIL-HDBK-217:n käyttöä taajuusmuuttajan luotettavuusanalyysiin on käsitelty diplomityössä [34] ja osittain myös työssä [35].

MIL-HDBK-217 esittää lämpötilan vaikutuksen komponenttien vikaantumisaikaan seuraavan Arrheniuksen yhtälöä (kaava 24 luvussa 4.1). Aktivaatioenergiat on selvitetty empiirisesti eri komponenttityypeille, ja lämpötilan vaikutus on muista parametreista riippumaton. Standardin mukaan lämpötilan nousu kiihdyttää vikaantumista ja lasku puolestaan hidastaa sitä. Lisäksi käyttölämpötilan ylittyessä vikatiheys kasvaa huomattavasti.

Standardi on saanut osakseen kritiikkiä muun muassa eksponentiaalisesta vikataajuuden jakaumasta; monien mielestä esimerkiksi Weibull-jakauma voisi olla todellisuutta parem-

min vastaava. Standardia on myös arvosteltu paikkaansapitämättömäksi, kun tieto varsinkin puolijohdekomponenttien vikamekanismeista on lisääntynyt. Useat mekanismit vaativat tietyt olosuhteet käynnistyäkseen, ja vasta tämän jälkeen lämpötila kiihdyttää reaktiota. MIL-HDBK-217:n mukaan lämpötila kiihdyttää aina vikaantumista. Kolmas epäkohta on informaation vanhuus. Uusin standardi, MIL-HDBK-217F Notice 2, on päivätty 28. helmikuuta 1995. Vanhentunut tieto johtaa helposti pessimistisiin vikaantumisnopeuksiin, sillä standardin julkaisun jälkeen valmistusmenetelmät ovat parantuneet huomattavasti. *The reliability information analysis center (RIAC)* on vuonna 2006 julkaissut standardista päivitetyn version *Handbook of 217Plus*, sekä luotettavuusanalyysiä avustavan ohjelmiston *217Plus*.

MIL-HDBK-217F:n puutteita korjaamaan ja malleja parantamaan standardointijärjestö ANSI (engl. *American National Standards Institute*) on julkaissut vuonna 2008 standardin ANSI/VITA 51.0-2008. Standardi pyrkii antamaan mallit, joiden avulla voidaan arvioida keskimääräistä aikaa virheiden välillä (MTBF, engl. *Mean Time Between Failures*). Tämän lisäksi on julkaistu lisästandardit ANSI/VITA 51.1-2008 (R2010), joka antaa MIL-HDBK-217F:n malleihin tarvittavat muutokset, jotta niiden tulokset olisivat yhteneviä, ja ANSI/VITA 51.3-2010, joka sisältää ohjeita luotettavuusanalyysiä tukevasta laatuselonnasta. Lisäksi työryhmä valmistelee standardia VITA 51.2, joka sisältäisi prosesseja, ohjeita ja parametreja fysikaalisten vikamallien käyttöön luotettavuusanalyysissä.

Puolijohdekomponenttien luotettavuuden arviointia varten JEDEC julkaisee JEP122-julkaisua, jossa on kerätty yhteen vauriomekanismeja ja -malleja. Julkaisun uusin versio on JEP122F, joka on julkaistu marraskuussa 2010. JEP122:n vauriomallit ovat yleisesti hyväksytyjä, niistä löytyy tutkittua tietoa useista eri julkaisuista ja mallit ovat asiantuntijaraadin varmistamia. Julkaisu sisältää vain vauriomekanismit, joista on tällä hetkellä hyvä ymmärrys. Yhteistä suurimmalle osalle malleista on se, että mekanismin käynnistyttyä lämpötilan nostaminen kiihdyttää vikaantumista.

Seuraavissa luvuissa on esitetty eräitä tyypillisiä lämpötilasta riippuvien vikamekanismien malleja.

4.1 Arrheniuksen yhtälö

Arrheniuksen yhtälöllä kuvataan kemiallisten reaktioiden nopeuden riippuvuutta lämpötilasta. Yhtälössä reaktion nopeus riippuu aktivaatioenergiasta, lämpötilasta sekä kiihtyvyyserkertoimesta. Arrheniuksen yhtälö on

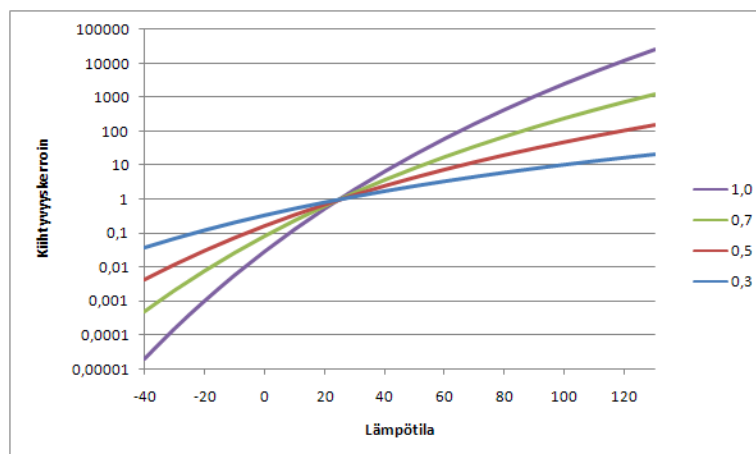
$$R = \alpha e^{-\frac{E_a}{k_B T}}, \quad (24)$$

jossa R on reaktionopeus, α prosessista riippuva kerroin, E_a prosessin aktivaatioenergia, k_B Boltzmannin vakio ja T lämpötila kelvineissä.

Arrheniuksen yhtälö voidaan muokata kaavan 25 muotoon, jolloin saadaan laskettua reaktion kiihtyvyyskerroin A_r kahden eri lämpötilan välillä.

$$A_r = e^{\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)}, \quad (25)$$

jossa T_{ref} on referenssilämpötila ja T on toimintalämpötila. Kuten muidenkin vikamekanismien malleissa, prosessista riippuva kerroin α supistuu pois, kun lasketaan kiihtyvyyskerrointa. Kuvassa 10 on kiihtyvyyskerroimet lämpötilan funktiona eri aktivaatioenergioille huoneenlämpötilan 25 °C suhteen.



Kuva 10: Lämpötilan vaikutus vikamekanismin nopeuteen (kiihtyvyyskerroin) lämpötilan ja aktivaatioenergian suhteen.

Arrheniuksen yhtälöllä voidaan kuvata suoraan joidenkin kemiallisista reaktioista johtuvien vikamekanismien aiheuttamaa vaurioitumisen nopeutumista. Tällaisia reaktioita ovat esimerkiksi metallien seostuminen toisiinsa diffuusion vuoksi, eli välimetallikerroksen kasvu (engl. *intermetallic growth*) ja metallijohtimien hapettuminen. Vaikka nämä reaktiot aktivoituvat lämpötilan vaikutuksesta, on jokaisella mekanismilla sille ominainen aktivaatioenergia.

Elektrolyyttikondensaattoreiden eliniän määrittämiseen käytetään usein Arrheniuksen yhtälöä 24, jolla kuvataan lämpötilan vaikutusta elektrolyytin kuivumiseen. Yleisesti käytetyssä mallissa kondensaattorin elinikä puolittuu aina 10 °C lämpötilan nousua kohti. [6]

Useissa vikamekanismeissa lämpötila ei kuitenkaan suoraan ole aktivoiva tekijä, vaan vaurion syntymiseen tarvitaan muuten sopivat olosuhteet. Monesti lämpötilalla on kuitenkin vikamekanismia kiihdyttävä vaikutus, jolloin kiihtymisen mallintamiseen voidaan käyttää Arrheniuksen yhtälöä. Myös näissä tapauksissa jokaisella vikamekanismeilla on oma aktivaatioenergia, joka määrittää lämpötilan vaikutuksen vikamekanismin kiihtymiseen [36, s. 59]. Usein kuitenkin erilaisia vikamekanismeja ei erotella, vaan komponentille pyritään löytämään yksi aktivaatioenergia, joka riittävän tarkasti kuvaa lämpötilan vai-

kutusta komponentin vikaantumiseen. Tällä tavalla saatuja aktivaatioenergioita on listattu taulukossa 7.

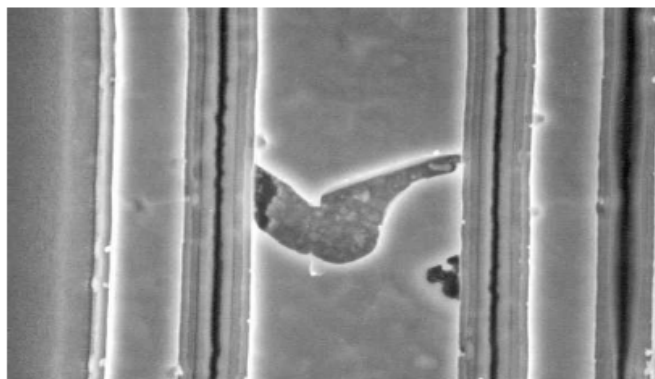
Arrheniuksen yhtälön käytössä on huomattava, että se kertoo vauriomekanismin kiihtymiskertoimet, ei absoluuttista vikatiheyttä. Jotta komponenttien todellista elinikää voitaisiin vertailla, tulee myös komponentin vikatiheys referenssilämpötilassa tuntea.

Taulukko 7: Eri komponenttityypeille ominaisia aktivaatioenergioita. Arvot eivät ota kantaa vikamekanismiin vikaantumisen taustalla, joten lukuja voi käyttää vain karkeina arvioina todellisesta tilanteesta. ⁽¹⁾ viittaa lähteeseen [37] ja ⁽²⁾ lähteeseen [38].

Komponenttiluokka	Aktivaatioenergia [eV]
Bipolaariset logiikkapiirit	0,35 ⁽¹⁾
NMOS-logiikkapiirit	0,45 ⁽¹⁾
CMOS-logiikkapiirit	
Analogiapiirit	0,56 ⁽¹⁾
Bipolaariset muistipiirit	0,35 ... 0,40 ⁽¹⁾ , 0,5 ⁽²⁾
NMOS-muistipiirit	0,45 ... 0,56 ⁽¹⁾
CMOS-muistipiirit	
Optoerottimet	0,70 ⁽¹⁾ , 0,24 ⁽²⁾
Valodiodit	
Valotransistorit	
Kuitulähettimet	0,40 ... 0,70 ⁽¹⁾ , 0,40 ⁽²⁾
Kuituvastaanottimet	
Transistorit	0,22 ⁽¹⁾ , 0,18 ⁽²⁾
Piiodit	0,22 ⁽¹⁾ , 0,27 ⁽²⁾
Germaniumdiodit	0,45 ⁽¹⁾
Zener-diodit	0,15 ⁽¹⁾ , 0,17 ⁽²⁾
Tantaalikondensaattorit	0,15 ⁽¹⁾
Alumiinielektrolyyttikondensaattorit	0,40 ⁽¹⁾
Keraamiset kondensaattorit	0,05 ⁽¹⁾
Paperikondensaattorit	0,10 ... 0,15 ⁽¹⁾
Filmikondensaattorit	
Mica-paperikondensaattorit	0,40 ⁽¹⁾
Lasikondensaattorit	
Tyristorit	0,22 ⁽¹⁾ , 0,27 ⁽²⁾
Muuntajat	0,15 ⁽¹⁾
Kelat	
Liittimet	0,40 ⁽¹⁾
Kytkimet	
Releet	0,15 ⁽¹⁾

4.2 Elektromigraatio

Elektromigraatio (engl. *electromigration*) tarkoittaa johdinmateriaalin kiteiden liikkumista varauksenkuljettajien liikemäärän seurauksena. Johdinmateriaalin siirtyminen aiheuttaa johtimen kapenemista, mikä kasvattaa virrantiheyttä ja elektromigraatiota entisestään. Lopulta elektromigraatio johtaa johtimen katkeamiseen, mistä on esimerkki kuvassa 11. Siirtynyt johdinmateriaali voi myös aiheuttaa johtimen kulkeutumista eristeeseen, jolloin muodostuva ”viiksi” voi aiheuttaa oikosulun viereiseen johtimeen. [36]



Kuva 11: Elektromigraation aiheuttama katkos alumiinisessa johtimessa. [36]

Elektromigraation merkittävyys kasvaa elektronisten komponenttien johdinkoon pienentyessä. Kun johdinkoko pienenee, mutta samalla kokonaisvirran määrä johtimessa pysyy entisellä tasollaan, kasvaa virrantiheys johtimessa huomattavan suureksi jo pienillä kokonaisvirran arvoilla.

Elektromigraatiota mallinnetaan kaavalla

$$TTF = \alpha(J - J_{crit})^{-n_e} e^{\frac{E_a}{k_B T}}, \quad (26)$$

jossa J on johtimen virrantiheys, J_{crit} on virrantiheys, jonka yläpuolella elektromigraatiota alkaa tapahtumaan ja n_e virrantiheyden eksponentti. [36, s. 38]

Mallin mukaan virrantiheyden J tulee olla suurempi kuin J_{crit} , jotta elektromigraatiota tapahtuisi. Lisäksi johtimen pituuden täytyy ylittää Blechin pituus L_b . Blechin pituus määräytyy elektronien liikkeen johtimessa aiheuttamasta rasituksesta, ja tulo $L_b J_{crit}$ on vakio eri materiaaleille. Kriittinen arvo alumiiniseoksille on 3000 . . . 7000 A/cm ja kuparille noin 3000 A/cm. Aktivaatioenergia vaihtelee välillä 0,5 . . . 0,9 eV riippuen metallin koostumuksesta. [36, s. 38–41][39, s. 258–259]

Mallista saadaan laskettua vikaantumisaajan kasvamiskerroin

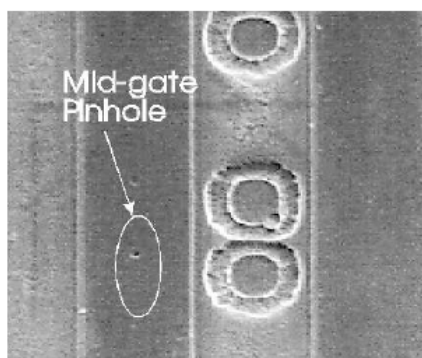
$$A_f = \left(\frac{J}{J_{ref}}\right)^{-n_e} e^{\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)}, \quad (27)$$

jossa J_{ref} on referenssilämpötilassa T_{ref} mitatun vikaantumisaajan virrantiheys. Kerroin kertoo, kuinka paljon vikaantumisaika muuttuu kun ympäristöolosuhteet muuttuvat. Esimerkiksi jos $A_f = 2$, tarkoittaa se vikaantumisaajan eli eliniän kaksinkertaistumista. [36]

Koska elektromigraatio on usein komponenttien sisäinen vauriomekanismi, voidaan siihen vaikuttaa vain kiihdyttäviä tekijöitä pienentämällä. Lämpötilan lasku hidastaa elektromigraation etenemistä, samoin kuin virrantiheyden pienentäminen. Käytännössä virrantiheyttä voidaan pienentää vain rajoittamalla komponentin läpi kulkevaa kokonaisvirtaa. Monesti virran suuruus määräytyy ulkoisista tekijöistä eikä sitä voida käytännön syistä pienentää, jolloin on mahdollista käyttää suuremmalle virralle suunniteltua komponenttia, jolloin suurempien sisäisten johtimien ansiosta virrantiheys jää pieneksi.

4.3 Ajasta riippuva dielektrinen hajoaminen

Ajasta riippuva dielektrinen hajoaminen (TDDB, engl. *Time-Dependent Dielectric Breakdown*) on erityisesti aktiivikomponenttien sisäisten kondensaattorien vauriomekanismi. TDDB aiheutuu kondensaattorin eristeeseen kasvavista johdinviiksistä, jotka lopulta oikosulkevat kondensaattorin elektrodit toisiinsa [39, s. 258–259]. TDDB kohdistuu paitsi kondensaattorin eristeeseen, myös esimerkiksi puolijohteissa oleviin eristekerroksiin, kuten MOSFET:n kannan oksidikerrokseen. Kuvassa 12 on esimerkki transistorin kannan eristekerroksen rikkoutumisesta TDDB:n seurauksena. [36]



Kuva 12: TDDB:n aiheuttama transistorin kannan oksidikerroksen rikkoutuminen. [36]

TDDB:tä kuvaa ainakin neljä erilaista mallia, joista kahdessa lämpötilariippuvuus on Arrheniuksen yhtälön 24 mukainen, yhdessä voidaan tietyin varauksin soveltaa Arrheniuksen yhtälöä ja neljännessä lämpötilariippuvuus tulee sovittaa havaittuun dataan. Mallit ovat

$$TTF = \alpha e^{-\gamma E_{ox}} e^{\frac{E_a}{k_B T}} \quad (28)$$

$$TTF = \alpha e^{-\beta d v} e^{\frac{E_a}{k_B T}} \quad (29)$$

$$TTF = t_0 v^{-n} \quad (30)$$

$$TTF = t_0 e^{\frac{E_a}{k_B T}} \quad (31)$$

$$TTF = \tau_0(T) e^{\frac{G(T)}{E_{ox}}} , \quad (32)$$

joista kaava 28 on vakiosähkökentän malli (E-malli), joka soveltuu kohteisiin, joissa oksidikerroksen paksuus on suurempi kuin 4 nm ja sähkökentän suuruus pieni (alle 10 MV/cm). E-mallissa γ on kentän kiihdytysparametri (noin 2,3), jolla on $\frac{1}{T}$ lämpötilariippuvuus ja E_{ox} sähkökenttä dielektrisen materiaalin yli.

V-mallissa (kaava 29) vikatiheys kasvaa eksponentiaalisesti jännitteen mukana ja se soveltuu alle 4 nm oksidikerroksille. V-mallissa β on jännitteen kiihdytysparametri ja V jännite oksidikerroksen yli.

Kaava 30 on potenssimalli, joka kuvaa vedyn vapautumista anodista ja se soveltuu pääasiassa alle 2 nm oksidikerroksille, mutta sitä voidaan soveltaa jopa 10 nm oksidikerroksille joiden yli on jopa 12 V jännite. Potenssimallin lämpötilariippuvuus on monimutkainen, mutta rajoitetuille lämpötila-alueille voidaan soveltaa Arrheniuksen yhtälöä, josta on esimerkki kaavassa 31. Potenssimallissa t_0 on referenssielinikä jossakin referenssilämpötilassa.

1/E-malli on kaavan 32 mukainen ja mallintaa eristeen läpi kulkevan virran aiheuttamaa ionisaatiota. Mallissa $\tau_0(T)$ on lämpötilasta riippuva kerroin, $G(T)$ sähkökentän kiihdytysparametri (noin 350 MV/cm heikolla lämpötilariippuvuudella) ja E_{ox} sähkökenttä oksidikerroksen yli. [36, s. 10–13]

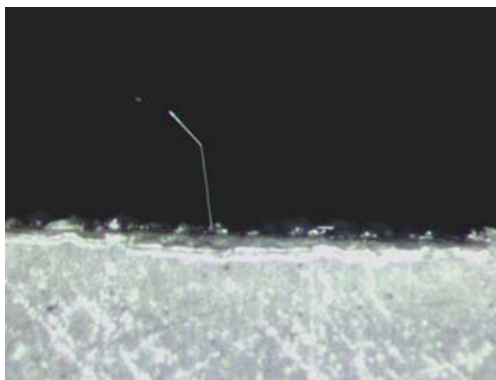
Kaikki mallit perustuvat fysikaalisiin ilmiöihin, ja varsinkin E-mallin hyvä vastaavuus TDDB:stä havaittuun dataan viittaa siihen, että vauriomekanismin nopeus riippuu vahvasti oksidikerroksen yli olevan sähkökentän suuruudesta. Lämpötilaan liittyvän aktivaatioenergian suuruus on ohuille oksidikerroksille (yli 4 nm) suuruusluokassa 0,7 eV ja paksuille (yli 25 nm) oksidikerroksille 0,3 eV [36]. Vaikka mallit ovatkin tarkoitettu pääasiassa puolijohteille, ovat samankaltaiset vaikutusmekanismit voimassa myös kondensaattoreilla, joissa elektrodien välissä on ohut eristekalvo.

TDDB:n malleista osassa on yksinkertainen lämpötilariippuvuus, jonka perusteella lämpötilan pienentäminen hidastaa dielektristä hajoamista. Toisena kiihdyttävänä parametrina on jännite tai sähkökenttä, joten vaurioitumista voidaan hidastaa näitä pienentämällä. Käytännössä tämä tarkoittaa pienemmän jännitteen käyttämistä piirissä. Joissain tapauksissa sähkökentän voimakkuutta voidaan pienentää myös valitsemalla käyttöön suuremman jännitekeston omaava komponentti, jossa eristekerroksien paksuudet on suurempia.

4.4 Tinaviikset

Tinaviikset (engl. *tin whiskers*) ovat ilmiö, joka on yleistynyt lyijyttömien juotteiden korvattua lyijylliset muun muassa RoHS-direktiivin (engl. *Restriction of Hazardous Substances*, haitallisten aineiden käyttöä sähkölaitteissa rajoittava EU-direktiivi) vaatimukses-

ta. Tinaviiksissä tinapinnoitteisesta metallista, esimerkiksi juotosliitoksesta tai liittimen pinnasta, kasvaa tinakarva, joka pahimmillaan aiheuttaa oikosulun kahden johtimen välille. Esimerkki kasvavasta tinaviiksestä on kuvassa 13.



Kuva 13: Tinaviiksi kasvaa tinapäälysteisestä kuparipinnasta [36]

Tinaviiksen ydintymisaikaa, eli kasvamisen alkamiseen kuluvaa aikaa, voidaan mallintaa kaavalla

$$TTWN = \alpha e^{\frac{E_a}{k_B T}} e^{C_R RH} , \quad (33)$$

jossa $TTWN$ on tinaviiksen ydintymiseen kuluva aika, C_R kosteuskerroin ja RH suhteellinen kosteus. [36]

Kiihtymiskerroin on

$$A_f = e^{\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} e^{-C_R (RH - RH_{ref})} , \quad (34)$$

jossa RH_{ref} on suhteellinen ilmankosteus referenssimittauksessa. Tinaviiksien aktivaatioenergia on noin 0,28 . . . 0,41 eV ja kosteuskerroin noin 0,012 . . . 0,031. [36]

Mallin parametreihin vaikuttavat muun muassa korrosoivat olosuhteet ja tinakerroksen paksuus. Mallin perusteella lämpötilan ja kosteuden pienentäminen auttaa hidastamaan tinaviiksien kasvua muiden olosuhteiden pysyessä vakiona.

4.5 Korroosio

Korroosiolla tarkoitetaan yksinkertaisimmillaan materiaalin, kuten metallin, tuhoutumista. Elektroniikassa vaikuttaa usein sähkökemiallinen korroosio, jonka aikaansaa anodin ja katodin välillä oleva elektrolyytti ja sen läpi kulkeva sähkövirta. Elektroniikkalaitteissa korroosiota tapahtuu varsinkin suojaamattomissa metallipinnoissa ilmankosteuden ja epäpuhtauksien vaikutuksesta. Esimerkiksi liittimet ja suojaamattomat juotosliitokset ovat herkkiä korroosiolle. Näissä kohteissa korroosio aiheuttaa kontaktiresistanssien kasvamista ja vuotovirtoja tai oikosulkuja.

Korroosiota tapahtuu jo matalissa 0 . . . 40 °C lämpötiloissa, pakkasella korroosio on hyvin hidasta. Lämpötilan nostaminen kiihdyttää korroosioreaktioita, samoin kuin kosteuden lisääntyminen reaktiopinnalla. [40]

Korroosiomalleja on kaksi erilaista, sillä suhteellisen kosteuden merkityksestä korroosion nopeudelle ei ole täyttä varmuutta. Mallit ovat

$$TTF = \alpha e^{\frac{C_R}{RH}} e^{\frac{E_a}{k_B T}} \quad (35)$$

$$TTF = \alpha RH^{-n_p} e^{\frac{E_a}{k_B T}} \quad , \quad (36)$$

joissa C_R on kosteuden kiihdytysparametri, RH ilman suhteellinen kosteus reaktiopinnalla ja n_p Peckin eksponentti, esimerkiksi alumiinin korroosiolle 2,7. Aktivaatioenergian suuruus malleissa on 0,3 eV jos ympäristössä on fosforihappoa ja noin 0,75 eV klorideille. [36]

Korroosiota voidaan hidastaa laskemalla elektroniikan lämpötilaa, mutta pelkästään elektroniikkasuunnittelulla sitä ei voida kokonaan poistaa. Käytännössä korroosiota voidaan estää suojaamalla elektroniikka ympäristövaikutuksilta muun muassa käyttämällä suoja-lakkoja sekä jalousasteeltaan yhteneviä metalleja. Näiden lisäksi koteloinnilla on suuri merkitys, sillä kotelo määrittää pääseekö vesi, ilmankosteus tai epäpuhtaudet yhteyteen elektroniikan kanssa. [40]

4.6 Piirilevyt

Piirilevy on tärkeä rakenteellinen ja sähköinen osa elektronista laitetta. Sen päätarkoituksena on yhdistää komponentit sähköisesti toisiinsa ja toimia komponenttien kiinnitysalustana. Lisäksi se johtaa lämpöä pois komponenteista. Laajalla lämpötila-alueella toimittaessa piirilevymateriaali vaikuttaa tuotteen toimintaan ja elinikään muun muassa seuraavilla tavoilla: piirilevyn lämpölaajeneminen vaikuttaa liitosten kestävyys (ks. luku 4.7), piirilevyn eristysvakio muuttuu lämpötilan mukana ja korkeissa lämpötiloissa piirilevymateriaali pehmenee ja lopulta hajoaa.

Piirilevymateriaalin soveltumista korkeaan lämpötilaan kuvataan usein sen lasisiirtymän lämpötilalla T_g . Korkeampi T_g tarkoittaa piirilevyn soveltumista korkeampaan lämpötilaan, sillä lasisiirtymän lämpötilassa materiaali alkaa pehmetä, eikä enää sovellu komponenttien kiinnitysalustaksi.

T_g :n lisäksi lämpölaajenemiskerroin vaikuttaa komponenttien juotosliitosten kestävyys lämpösyklauksessa. Pinnan suuntainen laajeneminen vaikuttaa pintaliitoskomponentteihin, ja paksuuden suuntainen muutos läpiladottaviin komponentteihin ja kuparoi-tuihin reikiin luvun 4.7 mukaisesti.

Lähteessä [41] tutkittiin kolmen eri piirilevymateriaalin, FR4:n, korkean T_g :n FR4:n sekä Polyimidin (PI), lämpökäyttäytymistä. Materiaaleista selvitettiin niiden lämpölaajenemis-

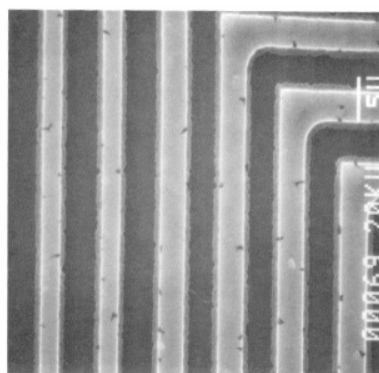
kerroin (CTE, engl. *Coefficient of Thermal Expansion*) ja elastinen modulus, joita käytettiin rasiussimulaatiossa. Simulaatiolla selvitettiin piirilevyn juotosliitosten kestävyyttä.

Tutkimuksen lämpösyklaussimulaation perusteella PI vaikuttaa soveltuvimmalta materiaalilta lämpötilavaihteluiden kannalta, sillä sen CTE on lähempänä komponenttien CTE:tä. Seuraavana oli korkean T_g :n FR4 ja huonoiten soveltui tavallinen FR4-materiaali. Tärinäsimulaation mukaan juotosliitosten luotettavuus on yleensä hieman suurempi PI:llä kuin FR4:lla johtuen mahdollisesti levyjen jäykkyyseroista. Palavastuksien juotosliitokset tosin kestivät PI:llä huonommin kuin FR4:lla [41]. Lähteen [42] mukaan piirilevyn lakkaaminen suojaa komponentteja lämpösyklauksen ja tärinän aiheuttamilta vaurioilta.

4.7 Lämpösyklus

Lämpötilan vaihtelua kylmän ja kuumen välillä kutsutaan lämpösyklaukseksi, ja se aiheutuu sekä ympäristölämpötilan muutoksista että piirissä syntyvän häviötehon muutoksista. Ympäristölämpötilan muutokset ovat usein hitaita, esimerkiksi vuodenajan vaihtuminen tai lämpötilaero yöllä ja päivällä. Piirissä kuluvan tehon muutokset voivat puolestaan olla hyvinkin nopeita, jos huipputehoa tarvitaan vain hetkellisesti. Tällöin komponentit voivat lyhyen aikaa toimia hyvin kuumina ja palautua sitten takaisin ympäristölämpötilaan.

Lämpölaajeneminen aiheuttaa metalliin jännitysgradientteja, jotka saavat metallin atomit liikkumaan. Metalliatomien liikkuminen synnyttää johtimiin hitaasti katkoksia, jotka lisäävät paikallisesti virrantiheyttä ja resistanssia tai saavat aikaan johtimen katkeamisen. Ilmiötä kutsutaan rasiusliikkumiseksi (engl. *stress migration*) ja sen vaikutuksesta on esimerkki kuvassa 14. Pitkät ja kapeat alumiinijohtimet ovat herkkiä rasiusliikkumisen synnyttämille vaurioille, samoin kuin kuparijohtimet suuren kuparialueen läheisyydessä. Rasiusliikkuminen on lähinnä komponenttien sisäinen ilmiö, sillä niissä johtimet ovat kapeita ja etäisyydet niiden välillä lyhyitä. [36]



Kuva 14: Lämpölaajenemisesta aiheutuneiden rasiusgradienttien aikaansaaman metalliatomien liikkumisen synnyttämiä aukkoja alumiinijohtimessa. [36]

Rasitusliikkumisen mallintamiseen käytetään kaavaa

$$TTF = \alpha(T_0 - T)^{-N} e^{\frac{E_a}{k_B T}} \quad , \quad (37)$$

jossa T_0 metallin rasitusvapaa lämpötila, N eksponentti, jonka arvo on noin 2...3, E_a aktivaatioenergia, alumiinin raerajalla tapahtuvalle diffuusiolle suuruusluokkaa 0,5...0,7 eV, rakeiden sisäiselle diffuusiolle 1,2...1,4 eV ja kuparille noin 0,9 eV. [36]

Eliniän kasvamiskerroin on

$$A_f = \left(\frac{T_0 - T}{T_0 - T_{ref}} \right)^{-N} e^{\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \quad . \quad (38)$$

Lämpölaajenemiskertoimien erot elektronisten piirien materiaaleilla aiheuttavat lämpötilan muuttuessa eri materiaaleissa eri suuruisen koon muutoksen, jolloin materiaalien liitospintaan muodostuu jännitystä. Jännityksen suuruus riippuu materiaalien lämpölaajenemiskertoimien erosta, liitoksen etäisyydestä komponentin keskipisteeseen (jonka suhteen komponentti laajenee), sekä monesta muusta asiasta. Lämpölaajenemiskertoimien eroista aiheutuvien jännitysten synnyttämiä vaurioita on muun muassa eristeiden ja ohutkalvojen murtuminen, sidoslankojen irtoaminen tai rikkoutuminen, juotosliitosten väsyminen ja delaminaatio. [36]

Jalallisilla komponenteilla kotelon koon muutos suhteessa piirilevyyn aiheuttaa jalkaan vääntävää voimaa. Jos jalka on joustavaa materiaalia, vähentää se piirilevynpuoleiseen liitokseen kohdistuvaa voimaa, kun taas jäykkä materiaali pyrkii irtoamaan liitoksesta. Jalan muodolla ja materiaalilla voidaan vaikuttaa siihen, miten hyvin liitos kestää lämpösyklauksen aiheuttamaa rasitusta. Esimerkiksi jalka, jossa on mutka, taipuu helpommin kuin suora jalka ja täten vähentää liitokseen kohdistuvaa rasitusta.

Materiaalien lämpösyklauksesta johtuvan väsymisen ennustamiseen käytetään yleisesti Coffin–Manson-yhtälöä

$$N_f = \frac{C'}{\Delta e_p^{B'}} \quad , \quad (39)$$

jossa N_f on jaksojen määrä liitoksen pettämiseen, C' on materiaalista riippuva vakio, B' empiirisesti havaittu vakio ja Δe_p on plastisen rasituksen vaihteluväli jaksoa kohti. [36, s. 52]

Lämpösyklauksesta aiheutuva rasitus ei yleensä kuitenkaan kokonaan osu materiaalin plastiselle alueelle, vaan vain osa siitä on elastista (kuva 15). Tällöin kaava 39 voidaan muokata muotoon

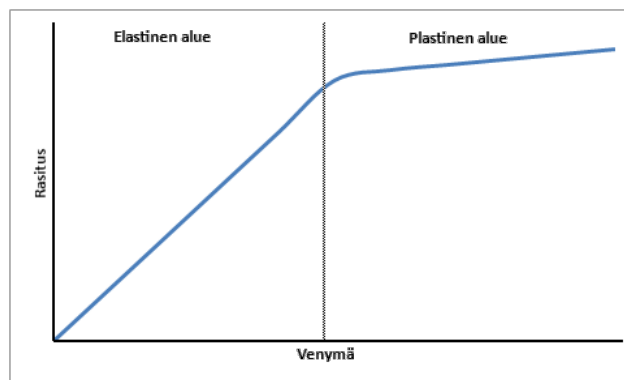
$$N_f = \frac{C'}{(\Delta T - \Delta T_o)^{B'}} \quad , \quad (40)$$

jossa ΔT lämpötilan vaihtelualue ja ΔT_o materiaalissa elastista rasitusta aiheuttava lämpötila-alue. B' :n arvo on pehmeille metalleille, kuten juotteelle, 1...3, koville metalliyhdisteille 3...5 ja hauraille murtumille 6...9. [36, s. 53]

Lämpösyklauksen kiihtymiskertoimeksi saadaan

$$A_f = \left(\frac{\Delta T - \Delta T_o}{\Delta T_{ref} - \Delta T_o} \right)^{B'} , \quad (41)$$

joka kertoo vikaantumiseen tarvittavan lämpötilavaihtelun ΔT toistomäärän muutoksen suhteessa referenssimittauksen lämpötilavaihteluväliin ΔT_{ref} . [36]



Kuva 15: Materiaalin elastisen ja plastisen muodonmuutoksen alueet. Elastisella alueella rasituksen aiheuttama venymä palautuu rasituksen poistuessa, mutta plastisella alueella osa venymästä jää pysyväksi.

Piirilevymateriaalin vaikutus pintaliitoskomponentin juotosliitoksen kestävyyyteen aiheutuu suurimmaksi osaksi piirilevyn tason suuntaisen lämpölaajenemiskertoimen ja komponentin lämpölaajenemiskertoimen erosta. Taulukossa 8 on listattu eri piirilevymateriaaleille ominaisia lämpölaajenemiskertoimia. Piin lämpölaajenemiskerroin on noin 2,8 ppm/°C ja muovisten komponenttien kotelomateriaalin noin 14 ppm/°C [43]. Kuparin, jota usein käytetään piirilevyllä johtimina, lämpölaajenemiskerroin on 16,7 ppm/°C. Lämpölaajenemiskertoimen eron lisäksi liitokseen kohdistuvaan voimaan vaikuttaa komponentin juotosliitosten muoto ja paikka.

Kolmen eri piirilevymateriaalin vertailussa [41] paras eri kotelotyyppien juotosliitosten kestävyys lämpösyklauksessa saavutettiin käyttämällä piirilevymateriaalina polyimidiä (CTE-XY 12,6), seuraavaksi paras korkean T_g :n omaavalla FR4-levyllä (CTE-XY 14,0) ja huonoin tavallisella FR4-levyllä (CTE-XY 14,8).

Tutkimuksen [42] mukaan lämpösyklauksen kestävyys eri kotelotyyppien välillä on seuraava, kestävimmästä huonoiten kestävä: LQFP, 1210, PBGA, 2512, LCCC. Keraamisen LCCC-kotelon juotosliitokset kestivät huonoiten myös lähteessä [41]. 0603- ja 1206-kokoisilla vastuksilla ei havaittu eroa syklauksen kestävyudessa. Jalalliset komponentit ja pienet palakomponentit kestivät lämpösyklaukselta parhaiten, huonoiten kesti keraaminen kotelo, jonka lämpölaajenemiskerroin eroaa eniten piirilevymateriaalin kertoimesta.

Luotettavuuskatsauksessa [45] todettiin perinteisten jalallisten SMD-komponenttien juotosliitosten kestävä lämpösyklaukselta paremmin kuin jalattomien. PBGA-kotelon kestä-

Taulukko 8: Eri piirilevymateriaaleille ominaisia lämpölaajenemiskertoimia. CTE-Z tarkoittaa piirilevyn paksuuden lämpölaajenemiskerrointa ja CTE-XY piirilevyn tason suuntaista lämpölaajenemiskerrointa. Kertoimien yksikkö on ppm/°C. [44]

Materiaali	CTE-Z	CTE-XY
FR4 Tetrafunctional	60	12 ... 16
FR4 Tetra II # 370	58	10 ... 14
FR4 Tetra II Plus # 370-G	45	14
Getek	45	13
B-T (Bismaleimide-Triazine)	50	10 ... 14
Thermount 85NT	86	8,5
Polyimide Blend	70	9 ... 13
Cyanate Ester E-Glass	55	11 ... 13
Cyanate Ester S-Glass	50	9
Polyimide 85NT	100	6 ... 9
Polyimide E-Glass	70	13
Polyimide	50	14 ... 16

vyys on kuitenkin samaa luokkaa kuin saman I/O-määrän omaavan PQFP-kotelon. Samoin verrattaessa PQFP- ja PLCC-koteloisten komponenttien juotosliitosten kestävyyttä lämpösyklauksessa PBGA-koteloisiin, kestävät jalalliset paremmin. Jalallisilla komponenteilla tosin hajonta on suurempaa johtuen muun muassa juotteen määrän suuremmasta vaihtelusta liitoksessa.

BGA-koteloiden juotosliitosten kestävyys paranee, jos komponentin piisirun kokoa pienennetään, juotepallon kokoa kasvatetaan ja jos juotospastaa on ohut kerros juotepallon ja piirilevyn juotetäplän välissä. Myös piirilevyn substraatin paksuuden kasvattaminen, BGA:n juotostäplän koon kasvattaminen ja juotepallojen siirtäminen pois piisirun alta parantavat liitosten kestävyyttä [45]. Lähteen [46] mukaan BGA:n juotetäplän koon tulisi olla sama kuin piirilevyn puoleisen täplän koko.

Piirilevyn paksuuden lämpölaajenemiskerroin vaikuttaa läpikäsitettävien komponenttien liitosten ja läpikäsitettävien reikien kestävyys. Erityisesti hyvin pienet läpiviennit, joiden halkaisija on noin 0,3 mm hajoavat nopeasti lämpösyklauksessa. Syyksi epäiltiin liijyttömän juotosprosessin synnyttävien piileviä heikkouksia läpiviennin kuparointiin. Kuparin lämpölaajenemiskerroin on pieni suhteessa kaikkien taulukon 8 piirilevymateriaalien paksuuden kertoimiin, minkä aiheuttama rasitus saattaa selittää läpivientien nopeaa hajoamista. [42]

4.8 Tärinä

Usein rankoissa olosuhteissa, missä toimintalämpötila on korkea ja lämpösyklit suuria, joutuu elektroniikka alttiiksi myös tärinälle. Tämän vuoksi tässä työssä käsitellään lyhyesti oleellisia tärinän vaikutuksia elektroniikan kestävyYTEEN.

Tärinä aiheuttaa piirilevyyden taipumia, jolloin piirilevyyden kiinnitettyihin komponentteihin kohdistuu lämpösyklauksen tapaan veto-, puristus- ja leikkausjännityksiä. Tärinän aiheuttamat muutokset tosin ovat usein huomattavasti nopeampia kuin lämpötilan aiheuttamat, jolloin rasituskertymä kasvaa lyhyessä ajassa suureksi ja aiheuttaa rikkoutumisen. Lisäksi tärinäjaksot ovat usein juotteen myötämisaikaan nähden lyhyitä, jolloin juote ei ehdi absorboida muutosta.

Tärinä aiheuttaa usein komponenttien ja niiden jalkojen sekä juotosliitosten murtumista ja piirilevyyden johtimien katkeamista. Komponentteihin kohdistuvaan rasitukseen vaikuttaa suuresti niiden sekä piirikortin resonanssitaajuudet, joilla tapahtuva värähtely aiheuttaa suuren rasituksen. Komponenttien koko, paino ja jäykkyys vaikuttavat resonanssitaajuuteen, ja tärinärasitukseen vaikuttaa muun muassa komponenttien sijainti ja kiinnitystapa.

Tärinän vaikutuksia voidaan poistaa erilaisilla koteloratekaisuilla, kuten vaimentimilla. Elektroniikkasuunnittelun näkökulmasta tärinään voidaan vaikuttaa käyttämällä paksumpaa piirilevyä tai sijoittamalla komponentit ja kiinnikkeet siten, että ne jäykistyvät piirikorttia. Tällöin resonanssitaajuutta saadaan nostettua ja ympäristöstä tuleva matalam-pitaajuinen tärinä ei välity korttiin voimakkaasti. Komponenteista jalalliset kotelotyypit joustavat paremmin piirilevyyden taipuessa, ja vähentävät täten liitoksiin kohdistuvaa rasitusta. Samoin juotteen suurempi määrä vähentää murtumisherkkyyttä, joten aaltojuotoksen käyttäminen voi olla perusteltua. [47]

Muita huomioita tärinävikaantumisesta on muun muassa BGA-koteloisten komponenttien vikaantuminen kulmista tärinässä [48]. Vikaantumistodennäköisyyttä voidaan jonkin verran pienentää kulmissa olevan juotostäplän muotoa muuttamalla elliptiseksi siten, että täplän pitkä akseli on kohtisuorassa komponentin diagonaalisen akselin suhteen. [46]

Lähteen [41] kolmen eri piirilevymateriaalin tärinäsimulaatiossa havaittiin komponenttien tärinäsiedolle seuraava järjestys, parhaiten kestävästä huonoimpaan: 1210, 2512, LQFP, LCCC, PBGA. Piirilevymateriaalilla ei ollut suurta vaikutusta tärinänkestoon. Lämpösyklauksen tapaan pienet sekä jalalliset komponentit kestivät paremmin kuin suuret tai jalattomat.

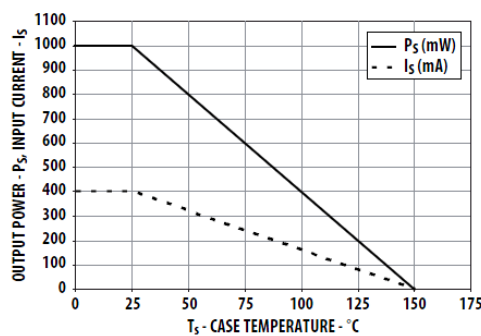
4.9 Tehokäyrä

Tehokäyrällä tarkoitetaan kuvaajaa, jossa vaaka-akselilla on komponentin toimintalämpötila (yleensä ympäristön lämpötila) ja pystyakselilla komponentin suurin sallittu häviöteho. Käyrän avulla voidaan arvioida rajaa, jossa komponentin sisäinen lämpötila ylittää

sen suurimman sallitun arvon. Tehokäyrä määritetään yleensä selvittämällä komponentin lämpöresistanssi θ_{JA} JEDEC:n standardin JESD51 ja sen liitteiden mukaisilla testilevyillä (muun muassa JESD51-3 jalallisille puolijohdekomponenteille, JESD51-5 piireille, joihin voidaan suoraan liittää jäähdytyslaitteita ja JESD51-10 läpiladottaville DIP- ja SIL-koteloisille komponenteille). Lämpöresistanssilla tarkoitetaan komponentin lämmönjohtavuutta ulkoilmaan, jolloin komponentin sisäinen lämpötila saadaan kaavalla

$$T_J = T + \theta_{JA}P \quad (42)$$

jossa T_J on puolijohteen sisäinen liitoslämpötila, T ympäristön lämpötila, θ_{JA} komponentin lämpöresistanssi ja P komponentin häviöteho. Kun komponentille on määritelty suurin sallittu liitoslämpötila, saadaan kaavasta 42 johdettua käyrä, joka kuvaa sallittua tehohäviötä ympäristölämpötilan funktiona. Esimerkki tehokäyrästä on kuvassa 16.



Kuva 16: Esimerkki tehokäyrästä lämpötilan funktiona

On huomattava, että lämpöresistanssi pätee vain kyseiselle testipiirilevyille ja piirilevyn muuttuessa myös lämpöresistanssi muuttuu. Esimerkiksi kuparin lisääminen piirilevyille parantaa lämmön johtumista komponentista pois, jolloin lämpöresistanssi on pienempi kuin testilevyillä. θ_{JA} onkin siis komponentin ja testipiirilevyn yhdessä muodostaman kokonaisuuden lämpöresistanssi. Koska myös ympäröivät komponentit vaikuttavat komponentin lämpenemään ja lämmön virtaussuunnasta ei voi olla varma, pelkästään lämpöresistanssin avulla ei voi määrittää komponentin sisäistä lämpötilaa. Tehokäyrää ja lämpöresistanssia voidaan käyttää arvioitaessa eri komponenttien, joiden testausolosuhteet ovat samat, soveltuvuutta ja lämpenemistä tietyissä olosuhteissa. Pienemmän lämpöresistanssin ja täten myös suuremman sallitun häviötehon omaava komponentti oletettavasti toimii jonkin verran viileämpänä myös todellisessa toimintaympäristössään.

4.10 Ylimitoittaminen

Komponenttien ylimitoittamisella (engl. *derating*) tarkoitetaan sellaisten komponenttien valintaa, joilla esimerkiksi jännitteen- tai virrankesto on huomattavasti oletettua toimintatarajaa suurempi. Kuten aikaisemmissa luvuissa huomattiin, useat vioittavuuteen vaikut-

tavat mekanismit kiihtyvät jännitteen tai virrantiheyden kasvaessa. Tämän vuoksi suuremmalle rasitukselle suunnitelluilla komponenteilla saatetaan saavuttaa huomattavasti pidempi elinikä vikamekanismien hidastuessa. Lisäksi komponenttien lämpenemä jää pienemmäksi, sillä suuremmalle nimellisteholle suunnitelluissa komponenteissa on usein pienemmät lämpö- ja sähköiset resistanssit.

Ylimoittamisen suhde komponentin elinikään riippuu suuresti komponenttityypistä ja sen virhemekanismeista. Esimerkiksi elektrolyyttikondensaattoreiden käyttöjännitteen pudottaminen kasvattaa elinikää, sillä ohuen oksidikerroksen yli oleva sähkökenttä jää pienemmäksi ja hidastaa dielektristä hajoamista. Toisaalta keraamisten kondensaattoreiden eristekerros on huomattavasti paksumpi, jolloin sähkökentän aiheuttamat vikamekanismit eivät dominoi, eikä jännitteen vähentämisestä ole samanlaista hyötyä. Puolijohdeiden ja varsinkin mikropiirien kohdalla komponentin lämpenemää voidaan minimoida sähköisellä mitoituksella, kuten lähtövirran rajoittamisella, ja kotelovalinnoilla.

Suurempi nimellisteho tai pienempi lämpöresistanssi saavutetaan yleensä kasvattamalla komponentin kotelon fyysistä kokoa. Tällöin sähköisestä rasituksesta ja korkeasta lämpötilasta aiheutuvia vikamekanismeja voidaan hidastaa, mutta toisaalta lämpösyklauksen ja värinän aiheuttamat jännitykset kasvavat. Ylimoittamisen vaatiessa suurempaa komponenttikotelo, on mittojen kasvamisesta aiheutuvat suuremmat mekaaniset jännitykset otettava huomioon.

Ylimoittamisen ohjeeksi RIAC on julkaissut teoksen *Electronic Derating for Optimum Performance*, jossa annetaan 21 komponentille ylitoitusparametreja ja malleja, joiden avulla komponentit saataisiin toimimaan luotettavasti esimerkiksi liikennevälineissä tai lentokoneissa. Väitöskirjassa [49] on esitetty ylitoitusmalli, joka antaa komponentille suurimman sallitun liitoslämpötilan, kun halutaan komponenteille tietty elinikä esimerkiksi 99 % varmuudella ja tunnetaan lämpötilavaikutuksen aktivaatioenergia sekä epävarmuudet.

5 Piirikortin suunnittelu laajemmalle lämpötila-alueelle

Kun suunnitellaan elektronista laitetta tavallista laajemmalle lämpötila-alueelle, kuten tässä tapauksessa alkuperäisen $0 \dots 60 \text{ }^\circ\text{C}$ sijaan $-40 \dots 90 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötila-alueelle, täytyy ottaa huomioon sekä toiminnallisuus että vioittuvuus. Toiminnallisuuden merkitys korostuu toleransseissa, sillä suurempi toimintalämpötila-alue aiheuttaa komponenttien parametreihin suuremman vaihtelun, kuten luvussa 3 on käyty läpi. Samoin suuremmat lämpötilavaihtelut aiheuttavat vioittuvuuden osalta suurempia rasituksia ja toiminta korkeamassa lämpötilassa usein nopeuttaa vikamekanismeja luvun 4 mukaisesti.

Toiminnallisuuden osalta täytyy identifioida tärkeimmät komponentit, joiden parametrien muutos on kriittisintä. Esimerkiksi kondensaattorin kapasitanssiarvon muuttuminen vaikuttaa suuresti suodatinpiirin ominaistajuuteen, kun taas DC-erotuskondensaattorin kapasitanssin vaihtelun merkitys on usein pieni. Kriittisiä kohtia ovat passiivikomponenttien osalta esimerkiksi suodattimet, kompensointipiirit ja mittauspiirit. Puolijohteilla parametrien muutos vaikuttaa vahvistinkytkentöihin sekä komponenteissa aiheutuvaan tehohäviöön, joka edelleen vaikuttaa komponentin kuumenemiseen. Pahimmassa tapauksessa kuuma ympäristö aiheuttaa transistorin joutumisen kuumenemiskierteeseen, joka lopulta tuhoaa sen. Aktiivisilla komponenteilla parametrien muutos riippuu suuresti kyseessä olevan piirin rakenteesta, joten piirin soveltuvuus tulee tarkistaa datalehden arvoista. Yhteistä aktiivisille komponenteille kuitenkin on toiminnan hidastuminen kuumassa ja vuotovirtojen kasvu ja tästä aiheutuva lähdön logiikkatilojen lähentyminen toisiaan.

Vioittuvuuden osalta vikamekanismien parempi tunteminen on mahdollistanut entistä luotettavampien komponenttien valmistamisen, joten komponenttien, varsinkin puolijohdeiden, käyttö niille määritellyillä tavoilla voi kasvattaa eliniän selkeästi muuta laitteistoa pidemmäksi. Oikea käytötapa tarkoittaa esimerkiksi virtojen ja jännitteiden pitämistä komponenttivalmistajan salliman ylärajan alapuolella. Tällöin suurimmaksi vioittuvuuteen vaikuttavista vikamekanismeista jää lämpösyklauksen aiheuttama komponentin tai sen liitosten hajoaminen mekaanisesti, tai esimerkiksi elektrolyyttikondensaattoreiden kuivuminen. Lämpösyklauksen aiheuttamaa rikkoutumista voidaan estää valitsemalla materiaalit niin, että lämpölaajenemisen aiheuttamat rasituksen jäävät mahdollisimman pieniksi ja rajoittamalla lämpösykliä suuruutta esimerkiksi estämällä komponentin liiallista kuumenemistä minimoimalla häviöteho.

Tässä luvussa käydään ensin läpi taajuusmuuttajan pääpiiriliitynnän piirikortin nykyiset toimintaolosuhdemäärittelyt sekä yksittäisten toiminnan kannalta kriittisten komponenttien toimintalämpötila-alueet, jotka valmistaja on määritellyt. Tämän jälkeen luvussa 5.1 esitellään lämpökameran avulla etsityt mahdolliset ongelmakohdat ja luvussa 5.3 käydään läpi mittausten ja piirikaavion perusteella oletetut ongelmakohdat. Luvun lopussa esitellään ehdotetut muutokset komponentteihin ja piiriratkaisuihin, joiden avulla tuote saataisiin toimimaan laajemmalla lämpötila-alueella.

Alkuperäinen piirikortti on määritelty toimimaan käyttölämpötila-alueella $0 \dots 70 \text{ }^\circ\text{C}$, joka tarkoittaa lämpötilaa kortin ympäristössä. Ympäristön, eli taajuusmuuttajan sijoittamispaikan, lämpötilarajoiksi on määritelty $0 \dots 55 \text{ }^\circ\text{C}$. Lisäksi tuotteen eliniäksi on määritelty 100000 tuntia kun piirilevyn lämpötila on keskimäärin alle $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Työn tavoitteena on esittää muutoksia, joiden avulla tuote saataisiin toimimaan $-40 \dots 90 \text{ }^\circ\text{C}$ ympäristölämpötilassa ja kestäämään 60000 käyttötuntia.

5.1 Komponentit

Komponenttien valmistajat määrittelevät komponenteille yleensä $1 \dots 3$ toimintalämpötila-alueita, jotka ovat ympäristölämpötila-alue T_A , liitoslämpötila-alue T_J sekä kotelon lämpötila-alue T_C . Lämpötilarajoista tärkein on liitoslämpötila, joka kertoo puolijohteen sisällä sallitut lämpötilat. Komponentin suurin lämpötila on juurikin puolijohdeliitoksesä, joten liitoslämpötila vaikuttaa suoraan puolijohdekomponentin toimintaan. Liitoslämpötila on kuitenkin hankala mitata. Kotelon lämpötila-alue tarkoittaa komponentin kotelon pinnan lämpötilaa, jonka mittaaminen on helpompaa. Kuitenkaan kotelon lämpötila ei suoraan kerro tärkeämpää liitoslämpötilaa johtuen muun muassa lämmön johtumisesta piirilevyyn. Liitoslämpötilaa voidaan arvioida kotelon lämpötilasta käyttämällä valmistajan ilmoittamaa lämpöresistanssia liitoksesta koteloon luvun 4.9 mukaisesti. Ympäristölämpötila on käsitteistä hankalin, sillä yleensä valmistaja ei erikseen määrittele, mistä kohdasta ja millaisissa olosuhteissa lämpötila pitäisi mitata. Lisäksi lämmön johtuminen liitoksesta piirikortille ja komponentin koteloon, sekä kotelosta ilmaan, on monimutkainen prosessi, jota ei voi kuvata pelkästään yhdellä lämpöresistanssilla. Siihen vaikuttaa muun muassa ilman liikkuminen komponentin ympärillä. Tämän vuoksi ympäristölämpötilaa voidaan käyttää vain suuntaa antavana arvona komponentin soveltuvuudesta laajemmalle lämpötila-alueelle.

Valmistajan määrittelemät lämpötila-alueet eivät suoraan kerro lämpötilarajoja, joiden ulkopuolella komponentti ei toimi ollenkaan. Sen sijaan valmistaja on määritellyt komponentin parametrien pysyvän tietyissä toleransseissa kyseisellä lämpötilavälillä. Toleranssi voi olla esimerkiksi resistanssin muutos alle 10% suhteessa resistanssiin huoneenlämmössä. Tämän lisäksi valmistaja on yleensä antanut kaikista oleellisista parametreista niiden vaihteluvälin kyseisellä lämpötilavälillä, esimerkiksi resistanssin vaihteluväli $0,2 \dots 3,0 \ \Omega$ ja tyypillinen arvo $1,5 \ \Omega$. Usein parametrien muutoksista on olemassa käyriä, joista näkee, miten parametri tyypillisesti muuttuu lämpötilan vaikutuksesta.

Jotta voitaisiin olla varma, että laite toimii oikein halutulla laajalla lämpötila-alueella, täytyy kaikista komponenteista tietää niiden parametrien muutokset tällä lämpötilavälillä. Ensimmäinen askel on valita käyttöön vain sellaisia komponentteja, joiden oleelliset parametrit ovat tiedossa vaaditulla lämpötilavälillä.

Tämän työn kohteena olevan piirikortin komponenteista suurimmalla osalla valmista-

jan määrittelemä käyttölämpötila ylitti työn tavoitteeksi määritetyn lämpötila-alueen. Näitä komponentteja voidaan käyttää uudessakin tuotteessa, kunhan komponenttien parametrien vaihtelu lämpötila-alueella otetaan huomioon. Ne komponentit, joiden toimintalämpötila-alue on liian pieni, ja täten parametrien muutoksista ei voida olla varmoja, on listattu taulukossa 9. Kriteerinä lämpötila-alueelle oli liitoslämpötila-alue suurempi kuin $-40 \dots 120 \text{ }^\circ\text{C}$, joka sallii liitokselle $30 \text{ }^\circ\text{C}$ korkeamman lämpötilan kuin oletettu suurin ympäristölämpötila, tai ympäristölämpötila-alue suurempi kuin $-40 \dots 100 \text{ }^\circ\text{C}$ jos valmistaja ei ollut määritellyt erikseen liitoslämpötila-alueita.

Taulukko 9: Piirikortin komponentit, joille valmistaja on määritellyt pienemmän lämpötila-alueen kuin työn tavoitteena oleva alue

Ympäristölämpötila-alue [$^\circ\text{C}$]	Kuvaus
0 ... 70	LM339MX-komparaattori Ethernet-muuntaja
0 ... 85	Cyclone III -FPGA-piiri
-10 ... 70	HO-750 -oskillaattori
-20 ... 85	Useimmat muoviset (Nylon, PA 66) liittimet
-40 ... 85	MIC4421 -MOSFET-ajuripiiri EPCS-konfigurointimuisti EEPROM-muistipiiri SN65LVDS2-vastaanotin
-55 ... 85	Keraaminen X5R-kondensaattori MKP-filmikondensaattori KZE-filmikondensaattori

Kondensaattoreiden soveltumista korkeaan lämpötilaan käsitellään luvussa 5.3.7. Mainittujen keraamisen ja filmikondensaattoreiden alhaisen toimintalämpötila-alueen lisäksi korkeassa lämpötilassa on otettava huomioon elektrolyyttikondensaattoreiden (6 kpl.) eliniän pieneneminen lämpötilan noustessa. Vaikka kyseisten kondensaattorien toimintalämpötila-alue on riittävän suuri, niiden elinikä korkeassa lämpötilassa jää liian lyhyeksi. Valmistaja on ilmoittanut eliniäksi 4000 tuntia $105 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa, kun tuotteen haluttu toimintaikä on 60000 tuntia.

Piirilevy materiaalina on käytetty FR4:sta, jonka lasisiirtymän lämpötila T_g on vähintään $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ja hajoamislämpötila T_d vähintään $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Piirilevy materiaalin korvaaminen vielä korkeamman T_g :n omaavalla, esimerkiksi PI:llä saattaisi parantaa koko laitteen kestävyttä korkeassa lämpötilassa, mikäli uuden materiaalin lämpölaajenemiskerroin vastaisi paremmin komponenttien kerrointa, luvun 4.7 mukaisesti.

5.2 Mittaukset

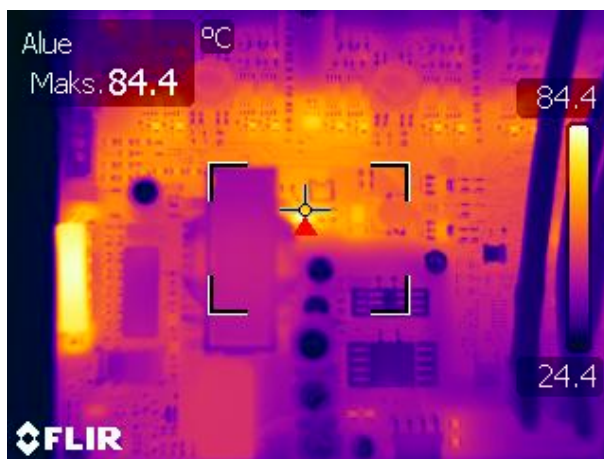
Piirikortin ongelmallisia komponentteja pyrittiin selvittämään myös etsimällä kortin kuumimpia komponentteja tuotteen ollessa käytössä. Näistä komponenteista voidaan tämän jälkeen arvioida, ylittääkö niiden toimintalämpötila valmistajan määrittelemän ylärajan lopullisessa ympäristölämpötilassa, ja voisiko lämpenemää pienentää kytkentää muuttamalla tai komponenttia vaihtamalla. Mitattava suure on komponentin lämpenemä suhteessa ympäristölämpötilaan, minkä oletetaan pysyvän jotakuinkin vakiona ympäristölämpötilan muuttuessa.

Piirikorttia mitattiin lämpökameralla taajuusmuuttajan ollessa avoimena pöydällä ilman lisäjähdytystä. Koska lämpökamera mittaa emissoituneen lämpösäteilyn määrää, tulee tarkan mittauksen aikaansaamiseksi tietää sekä materiaalin emissiivisyys että väliaineen (ilma ja kameran linssit) absorptio. Lisäksi lämpökameralla saadaan selville vain komponenttien pintalämpötila, eikä sisäistä liitoslämpötilaa, joka on komponenttien toimintaan vaikuttava suure. Tämän mittauksen tarkoitus ei kuitenkaan ollut selvittää komponenttien tarkkaa lämpötilaa, vaan identifioida mahdolliset ongelmakohdat eli selkeästi muita komponentteja kuumemmat tai valmistajan lämpötilarajat ylittävät komponentit. Tätä varten kameraa ei erikseen kalibroitu ja mustien muovisten puolijohdekomponenttien emissiivisyyden oletettiin olevan 0,9 . . . 0,95 (kameran oletusarvo). Mittaushetkellä huonelämpötila oli noin 25 °C.

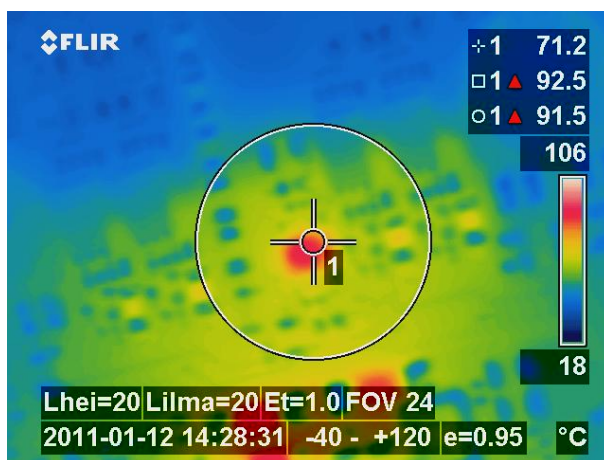
Seuraavassa luettelossa on listattu kortin kuumimmat komponentit:

- Tehoasteen ensiöpuolen käämin rinnalla diodien perässä olevan tehovastuksen lämpötila oli 95 °C, eli lämpenemä oli noin 70 °C. Vastuksen datalehden mukaan sen maksimilämpötila on 200 °C. Tehovastuksessa häviää arviolta 2,5 W tehoa lämmöksi. Kuormituksella ei havaittu olevan suurta merkitystä tehohäviön ja lämpenemän määrään. Vaikka vastus kestääkin kuumenemisen, johtuu lämpö muihin komponentteihin kuumentamalla niitä entisestään.
- Teholähteen toisiopuolen tasasuuntausdiodin lämpötila oli 89 °C ja lämpenemä 64 °C. Diodin liitoslämpötilan maksimiksi valmistaja on määritellyt 150 °C. Kotelön lämpötila ylittäisi sallitun liitoslämpötilan jo ympäristölämpötilassa 86 °C. Koska liitoslämpötila on kotelön lämpötilaa suurempi, ylittyy liitoslämpötila jo tätä matalammassa ympäristölämpötilassa. Diodin ja tehovastuksen muutoksia käsitellään luvussa 5.3.1.
- 15 V turvajännitteen kytkevien optoerottimien virranrajoitusvastusten lämpötila oli 75 °C ja lämpenemä 50 °C. Useimpien palavastusten maksimilämpötila on 125 °C, joka vastuksilla ylittyisi ympäristölämpötilan ollessa 75 °C.
- Hilaohjaimien optoerottimien virranrajoitusvastusten lämpötila oli 67 °C. Optoerottimien muutoksia käsitellään luvussa 5.3.3.

- Hilaohjaimien apujännitteen tekevien ohjauspiirien lämpötila oli 67 °C. Datalehdien mukaan komponentille sallittu suurin ympäristön lämpötila on 85 °C ja liitoslämpötila 150 °C. Kuormaa lisättäessä komponentin lämpötila nousi nopeasti jopa 100...150 °C asti. Lähdön resistanssi piirillä on 0,8...1,2 Ω (riippuen lämpötilasta ja johtavasta transistorista), jolloin 1 A virralla häviön suuruus on noin 1 W ja 2 A virralla jo lähes 4 W. Ympäristölämpötilan ollessa alle 25 °C piirille sallitaan kotelosta riippuen 1...2 W tehohäviö.



Kuva 17: Teholähteen toisiossa olevan diodin lämpökamerakuva



Kuva 18: Toroidimuuntajia ajavan mikropiirin lämpökamerakuva

- Kun uudemmassa piirikortin revisiossa pienennettiin hilaohjaimien teholähteen muuntajan käämien kierroslukua, nousi muuntajan läpi menevä magnetointivirta, joka johti suurempiin häviöihin ajuripiirissä. Ohjauspiirin lämpötilaksi mitattiin 92 °C, joka on huomattavasti yli piirille sallitun. Apujännitelähteen muutoksia käsitellään luvussa 5.3.6.

- Kuumin FPGA:n käyttöjännitettä tekevistä lineaariregulaattoreista oli $54\text{ }^{\circ}\text{C}$, datalehden määrittelemä suurin ympäristölämpötila on $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja liitoslämpötila $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lineaariregulaattoreita käsitellään luvussa 5.3.4.

5.3 Piiriratkaisut

Tuotteen piirikaaviota analysoimalla ja vertaamalla lämpötilamittauksiin, etsittiin ne komponentit ja piiriratkaisut, jotka eivät sovellu korkeaan lämpötilaan. Seuraavissa luvuissa on listattu ongelmakohtia sekä niille soveltuvia parannuksia.

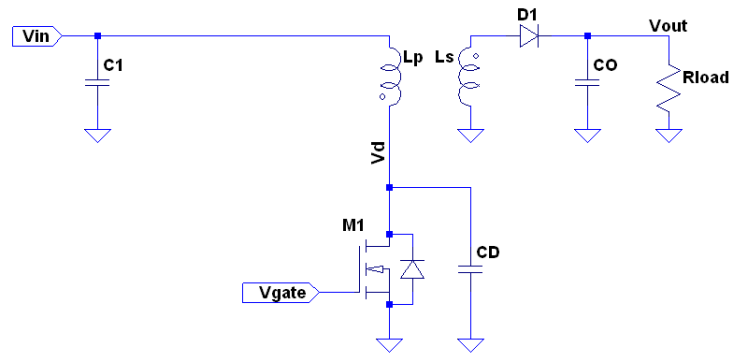
5.3.1 Teholähde

Teholähde on usein hankala suunnitella jo toimistolämpötiloihin, sillä sen läpi kulkee usein paljon tehoa, jolloin jo muutaman prosentin suuruiset häviöt aiheuttavat komponenttien huomattavaa lämpenemistä. Vielä hankalammaksi asian tekee teollisuuselektronikka, jossa voidaan käyttää korkeita, yli 1000 V , jännitteitä. Teholähteessä lämpenemistä aiheuttavat transistorien johtavuushäviöt ja kytkentähäviöt. Lisäksi muuntajassa ja diodeissa syntyy häviöitä.

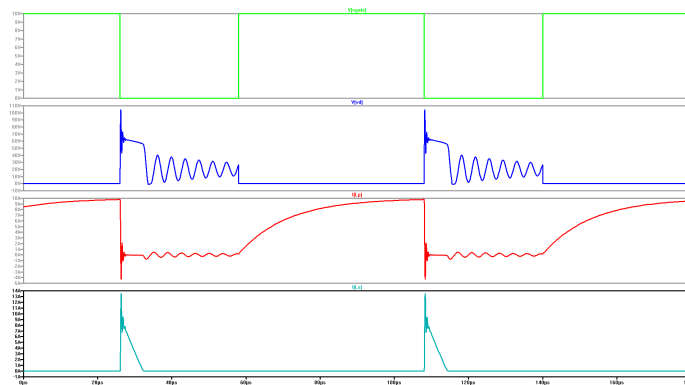
Erilaisia teholähteiden topologioita on useita ja sopivan valinta riippuu käyttöjännitteistä, tehosta ja monesta muusta parametrasta. Tämän työn kohteena olevalla kortilla käytetään *quasi-resonant flyback* -tyyppistä teholähdettä, jossa muuntajan ja kytkintransistorin nielukapasitanssin muodostamaa resonanssiipiiriä hyödyntämällä saadaan hyötysuhdetta parannettua kytkintransistorin kytkentähäviöiden pienentyessä. Kuvassa 19 on yksinkertaistettu malli tavallisesta *flyback*-tyyppisestä teholähteestä ja kuvassa 20 sen toiminnan kannalta oleelliset virrat ja jännitteet. Koska muuntajassa on epäideaalisuuksia, kuten hajainduktanssia, aiheutuu transistorin poiskytkennässä jännitepiikki transistorin yli. Tämä piikki rasittaa transistoria, ja varsinkin korkeilla jännitteillä voi aiheuttaa transistorin rikkoutumisen. Siksi muuntajan ensiön rinnalle laitetaan suojapiiri (engl. *snubber circuit*), jonka tarkoitus on pienentää jännitepiikkiä. Kuva *flyback*-teholähteestä suojapiirin kanssa on kuvassa 21.

Suojapiirissä jännitepiikki varaa kondensaattorin C_{sn} diodin D_{sn} läpi (komponentit kuvassa 19). Tällöin C_{sn} :n jännite nousee V_{in} :n yläpuolelle ja kondensaattorin varaus purkautuu transistorin ollessa pois päältä vastuksen R_{sn} läpi. Kondensaattori mitoitetaan siten, että se pystyy varastoimaan kokonaan hajainduktanssiin varautuneen energian ja vastus siten, että kondensaattori ehtii purkautua ennen seuraavaa kytkentäjaksota. [50]

Kuvassa 22 on kuvattu teholähteen oleelliset jännitteet ja virrat. Kuvassa näkyy toisiovirran laskettua nollaan transistorin yli olevassa jännitteessä aaltoilua, joka aiheutuu transistorin nielukapasitanssiin varautuneen energian värähtelystä muuntajan kanssa. Tätä ilmiötä käytetään hyväksi *quasi-resonant* -tyyppisessä teholähteessä, jossa transistorin päälle-



Kuva 19: Yksinkertaistettu *flyback*-tyyppisen teholähteen piirikaavio. Oleellista on muuntajan käämien kiertosuunta. Kondensaattori **CD** on transistorin **M1** nielukapazitanssi.



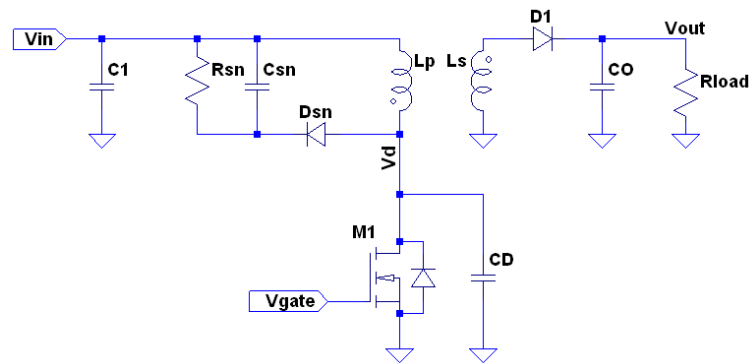
Kuva 20: Kuvan 19 piirin jännitteet ja virrat. Ylimpänä transistorin kytkentäjännite V_{gate} , toisena transistorin yli oleva jännite V_d , toiseksi alimpana muuntajan ensiövirta I_{Lp} ja alimpana toisiovirta I_{Ls} . Transistorin poiskytkentähetkellä jännitteessä V_d on huomattava piikki, joka rasittaa transistoria.

kytkentä ajoitetaan siten, että transistorin yli oleva jännite on pienimmillään, kuten kuvassa 23. Tällöin transistorin kytkentähäviöt pienenevät verrattuna tapaukseen, jossa kytkentähetki on kiinteä kuten kuvassa 22.

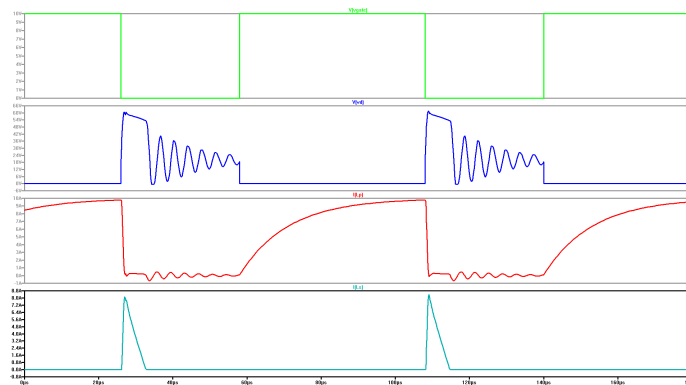
Teholähteen RCD-suojapiirin (vastuksen, kondensaattorin ja diodin muodostama suoja-
piiri) vastus (R_{sn} kuvassa 21) käy hyvin kuumana. Vaikka vastukselle valmistajan mukaan sallitaan 200 °C lämpötila, johtuu lämpö muihin lähellä oleviin komponentteihin, mistä voi seurata ylikuumentumisoongelmia.

Vastuksen kuumentumisen perimmäinen syy on muuntajan hajainduktanssin aiheuttama jännitepiikki, jonka minimoiminen pienentää lämpöhäviötä. Hajainduktanssin vähentäminen vaatii korkealaatuisen muuntajan, joka on tarkasti mitoitettu. Hajainduktanssin minimointi voi käytännössä olla hankalaa, mutta se parantaa tehonlähteen kokonaishyötysuhdetta ja vähentää kuumentumista.

RCD-suojapiirin tyyppin vaihtaminen esimerkiksi lähes häviöttömään LCD-suojapiiriin



Kuva 21: *Flyback*-teholähde, jossa muuntajan ensiön rinnalle on lisätty suojapiiri (**Rsn**, **Csn** ja **Dsn**) suodattamaan transistorin kytkennästä aiheutuvia jännitepiikkejä.



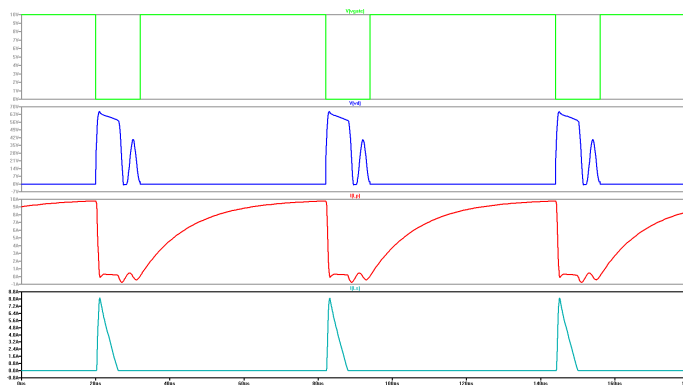
Kuva 22: Kuvan 21 piirin jännitteet ja virrat. Suojapiirin lisääminen on pienentänyt huomattavasti jännitteen **Vd** piikkiä transistorin sammutushetkellä.

(kelan, kondensaattorin ja diodien muodostama suojapiiri), kuva 24, vähentää kuume-nemisongelmaa, sillä se pienentää piirin tehohäviötä. LCD-suojapiirissä hajainduktanssin energia varastoidaan kondensaattoriin **Csn**, minkä jälkeen se kierrätetään kelan **Lsn** kautta takaisin käyttöjännitteeseen seuraavan kytkentäjakson aikana. LCD-suojapiirin mitoittaminen ja yhteensovittaminen muun piirin kanssa vaatii kuitenkin piirin toiminnan tarkkaa tuntemista. Lisäksi se kasvattaa kytkintransistorin ja suojadiodin **Dsn** virtaräsitystä.

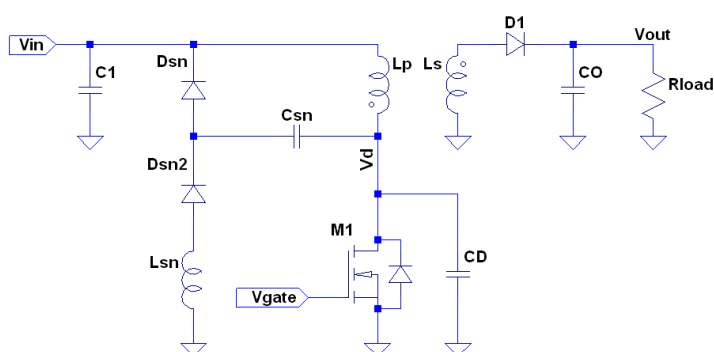
Toinen mahdollisuus olisi korvata vastus koteloidulla ja eristetyllä versiolla, joka saataisiin kiinnitettyä erillisillä johdoilla suoraan jäähdytyselementtiin. Tällöin vastuksen lämpö ei pääsisi johtumaan piirilevyllä muihin komponentteihin.

Teholähteen toision tasasuuntausdiodi käy myös kuumana. Sen vaihtaminen kynnyksjännitteeltään pienemmäksi vähentäisi tehohäviötä ja täten diodin lämpenemistä. Myös kotelon suurentaminen ja piirilevyn kuparimäärän lisääminen parantaisi lämmön johtumista diodista pois, mikä vähentäisi lämpenemää.

MOSFET:lla sammutuksesta syntyvät häviöt ovat pieniä, sillä transistorin virta laskee nopeasti verrattuna jännitteen nousuun transistorin kytketyessä pois päältä. Tämän vuoksi



Kuva 23: *Quasi-resonant* -tyyppisen *flyback*-teholähteen jännitteet ja virrat. Huomattavaa on transistorin päällekytkemishetken säätäminen kohtaan, jossa transistorin yli oleva jännite on minimissään.

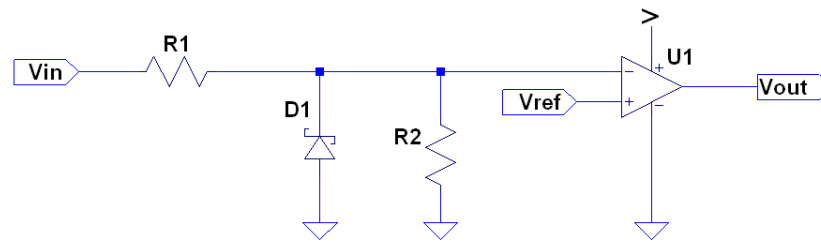


Kuva 24: Lähes häviöttömän LCD-suojapiirin kaavio [50, s. 554]

suojapiirejä ei yleensä käytetä sammutushäviöiden minimoimiseen vaan hajainduktanssin aiheuttaman jännitepiikin (transistorin ollessa sarjassa kelan tai muuntajan kanssa) pienentämiseen. Kun varsinkin *buck*-tyyppisillä teholähteillä MOSFET:n päällekytkemishäviöt ovat suuria nielu-lähde -kapasitanssin vuoksi, aiheuttaa suojapiiri häviöiden kasvua kasvattamalla kuorman kapasitanssia. Bipolaaritransistoreilla taas suojapiirin käyttö transistorin sammutushäviöiden pienentämiseen on monesti tarpeen. [50, s. 546–548]

5.3.2 Jännitteenmittaus

Piirikortilla on kytkentä, jolla mitataan taajuusmuuttajan lähtöjännitteet, ja verrataan niitä referenssijännitteisiin. Jännitemittauksen avulla havaitaan esimerkiksi taajuusmuuttajan lähdön oikosulku tai välipiirin ylijännite, ja taajuusmuuttaja voidaan tarvittaessa pysäyttää. Jännitteenmittaus on kuvan 25 mukainen. **Vin** on lähtöjännite, joka vaihtelee 0 V ja 1250 V välillä. **R1** ja **R2** muodostavat jännitteenjakopiirin, jolla korkea jännite laskeetaan komparaattorille soveltuvalle tasolle. Komparaattori **U1** vertaa jännitettä tunnettuun referenssijännitteeseen **Vref**.

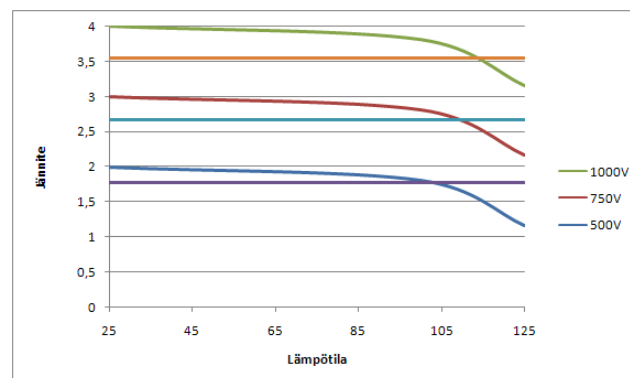


Kuva 25: Lähtöjännitteiden mittauksen periaatteellinen kytkentäkaavio

Schottky-diodi **D1** suojaa komparaattoria negatiiviselta tulojännitteeltä. Komparaattorin **U1** datalehdessä mukaan tulojännite saa olla suurimmillaan $-0,3$ V, jonka jälkeen komparaattorin sisäiset suojadiodit alkavat johtaa. Datalehti lisää myös, että sisäiset suojadiodit kestävät korkeintaan 50 mA virran.

Sarjavastus **R1** on suuruusluokaltaan noin $1\text{ M}\Omega$, joten virta diodin **D1** läpi on aina pieni. 1 mA virta saavutetaan, jännitteen **Vin** ollessa noin -1000 V. Diodin **D1** datalehdessä mukaan kynnyksijännite on alle 0,3 V pienellä virralla lämpötilan ollessa yli 25°C . Tämän perusteella diodi suojaa tarvittaessa komparaattoria negatiiviselta jännitteeltä.

Toisaalta schottky-diodin estosuuntainen virta on lämpötilasta riippuen $100\text{ nA} \dots 200\text{ }\mu\text{A}$, joka on mittausvirtaan nähden huomattava. Korkeassa lämpötilassa diodin estosuuntainen vuotovirta pienentää mitattavaa jännitettä huomattavasti, mikä voi johtaa virheelliseen toimintaan. Kuvassa 26 on esitetty kolmen eri jännitteen mittaustulos lämpötilan funktiona. Kuvasta nähdään, että jännite näyttää virheellisesti menevän referenssin alapuolelle lämpötilan ylittäessä 100°C , jolloin laitteen toiminta on virheellistä.



Kuva 26: Komparaattorin tulossa näkyvä jännite diodin **D1** liitoslämpötilan funktiona. **Vin** on alimmassa käyrässä 500 V, keskimmaisessä 750 V ja ylimmässä 1000 V. Vaakaviivat ovat kyseisillä jännitteillä olevat referenssijännitteet.

Vastuksilla toteutetussa jännitteenjaossa vastuksien lämpötilakertoimet vaikuttavat mitaustarkkuuteen. Miljoonasosina ilmoitettujen kertoimien ero aiheuttaa jännitteen jako-

suhteen muuttumista, mutta jos molempien vastuksien kerroin on sama, ei lämpötila vaikuta mittaustulokseen. 100 °C lämpötilamuutoksella 1000 yksikön ero vastuksien ppm-lämpötilakertoimissa aiheuttaa noin 0,1 % virheen mittaustulokseen. Pitkäaikaisen stabiilisuuden suhteen pätee sama analyysi; yhtäsuuri ja samansuuntainen suhteellinen muutos molemmissa vastuksissa kumoutuu.

Korkeaan lämpötilaan tarkoitetuissa pienivirtaisissa mittauskytkennöissä schottkydiodien käyttö on vuotovirtojen takia epäsuositeltavaa. Tällaisissa tilanteissa suojadiodi voidaan usein jättää pois, sillä komparaattorin sisäinen suojaus kestää negatiivisen jännitteen aiheuttaman pienen virran. Jos mittausvirta olisi suurempi, täytyisi suojadiodit laittaa, mutta tällöin myös estosuuntaisen virran merkitys olisi pienempi. Mittausvastukset tulisi valita siten, että niiden lämpötilakertoimet ja stabiilisuus ovat yhtä suuret. Tällöin lämpötilan vaikutus mittaustulokseen minimoituu. Käytännössä tämä tarkoittaa samalla valmistustekniikalla tehtyjä vastuksia, esimerkiksi valmistajan samasta sarjasta.

5.3.3 Optoerottimet

Optoerottimien virranrajoitusvastusten lämpötila on korkea, ja vaikka vastukset itsessään kestävät hyvin korkeita lämpötiloja, johtuu lämpö vieressä oleviin optoerottimiin, jotka ovat herkkiä korkeille lämpötiloille.

Optoerottimia on huonosti saatavilla korkeammalle lämpötila-alueelle, minkä vuoksi ne voisi korvata digitaali-erottimilla. Digitaali-erottimet perustuvat siirrettävän signaalin näyteistämiseen ja tämän digitoitun signaalin siirtämiseen joko kapasitiivisesti tai induktiivisesti erotusvälin ylitse. Digitaalisten optoerottimien soveltuvuutta taajuusmuuttajakäyttöön on tutkittu diplomityössä [51], jossa niiden havaittiin olevan optoerottimia parempia varsinkin hallitun lämpötilakäyttämisen ja datanopeuden suhteen.

Digitaali-erottimilla ei usein ole riittävän pitkää eristysväliä korkeille jännitteille, jolloin riittävän eristysvälin saavuttamiseksi täytyy kytkeä kaksi erotinta peräkkäin. Koska digitaali-erottimet tarvitsevat käyttöjännitteen sekä tulo- että lähtöpuolelle, on kahden digitaali-erottimen väliselle saarekkeelle tuotettava käyttöjännite erottavaa muuntajaa käyttämällä. Digitaali-erottimien tehontarve on usein pieni, jolloin muuntajan koko määrätty vaadittavan erotusvälin pituuden perusteella, ja ajuripiiriksi riittää pieni komponentti.

On myös mahdollista toteuttaa signaalin erottaminen käyttämällä piirilevyn ylä- ja alapuolelle johtimista muodostettuja induktiosilmukoita, jolloin eristysmateriaalina toimii piirilevy. Tällaisen piirilevymuuntajan toteutusmahdollisuutta on tutkittu diplomityössä [52]. Diplomityön perusteella erottaminen piirilevymuuntajaa käyttäen on mahdollista ja toiminta ennustettavissa, mutta rakenteen toteuttaminen vaatii korkeatasoista piirilevynvalmistustekniikkaa ja rakenteen häiriönsiedosta ei toistaiseksi ole riittävästi tietoa. Kaulapallisten digitaali-erottimien käyttäminen onkin toistaiseksi hyvä ratkaisu optoerottimien korvaamiseksi.

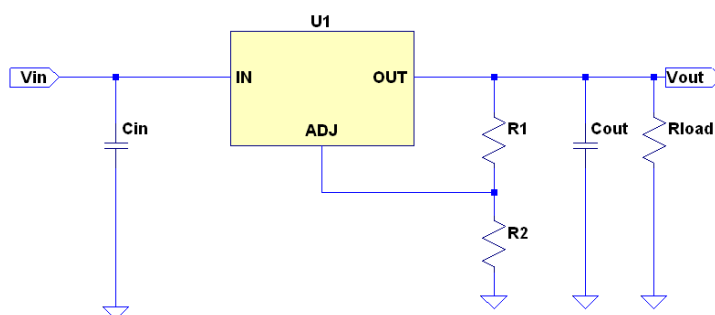
5.3.4 Lineaariregulaattorit

Lineaariregulaattori (kuvassa 27) on piiri, jolla saadaan muutettua korkeampi tasajännite matalammaksi. Lineaariregulaattorit ovat yksinkertaisia käyttää, tarvitsevat vähän ulkoisia komponentteja ja niiden lähtöjännite on usein helposti säädettävissä. Toisaalta lineaariregulaattorin hyötysuhde on huono; regulaattorissa jännitettä pienennetään muuttamalla ylimääräistä tehoa lämmöksi.

Lineaariregulaattorin toiminnan stabiilisuuteen vaikuttaa regulaattorin lähdössä näkyvä kapasitanssi. Koska lineaariregulaattorissa on takaisinkytkentä, jolla säädetään jännite halutuksi, muodostuu lähdössä näkyvästä kapasitanssista siirtofunktioon napa taajuudelle

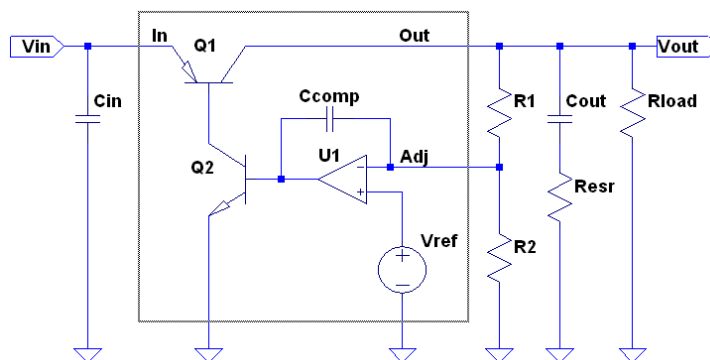
$$f_{out} = \frac{1}{2\pi R_{out} C_{out}} \quad , \quad (43)$$

jossa R_{out} on lähdössä näkyvä impedanssi, jota usein voidaan approksimoida pelkällä kuormaresistanssilla R_{load} . C_{out} on lähdössä näkyvä kapasitanssi, joka muodostuu paitsi lähdön suotokondensaattorista, myös hajakapasitansseista ja muista lähdössä kiinni olevista kapasitansseista. Huomattavaa on, että lähdössä näkyvä resistanssi riippuu kuormituksesta (pienellä kuormituksella vastaava R_{load} on suuri, suurella kuormituksella pieni), jolloin navan taajuus siirtyy tyypillisesti normaalitoiminnan useista kilohertseistä muutama hertzeihin kuormittamattomana. Kaavasta nähdään myös, että kuormaresistanssin tai suotokondensaattorin pienentäminen nostaa navan taajuutta.



Kuva 27: Säädettävä lineaariregulaattori. Lähtöjännite säädetään vastuksilla **R1** ja **R2**. Lähdössä näkyvä kuorma muodostuu jännitteen säätövastuksista, kapasitanssista **Cout** ja resistanssista **Rload**.

Lineaariregulaattorin rakenteesta (kuva 28) aiheutuu silmukkavahvistukseen useita napoja ja nollia. Näistä tärkeimpiä on matalalla taajuudella oleva regulaattorin rakenteesta johtuva napa sekä kuormituksesta (kaava 43) johtuva napa. Tämän lisäksi virhevahvistin ja transistorit aiheuttavat korkeille taajuuksille nollia ja napoja, jotka tulee myös ottaa huomioon. Matalilla taajuuksilla olevien napojen vaihesiirto aiheuttaa regulaattorin toimintaan epästabiilisuutta.



Kuva 28: Lineaariregulaattorin lohkokkaavio, jossa näkyy sisäinen virhevahvistin **U1** sekä transistorit **Q1** ja **Q2**. Lisäksi virhevahvistimessa on integraattorina toimiva kondensaattori **Ccomp**. Lähdön suotokondensaattorin **Cout** sarjaresistanssi on esitetty erillisenä vastuksena **Resr**.

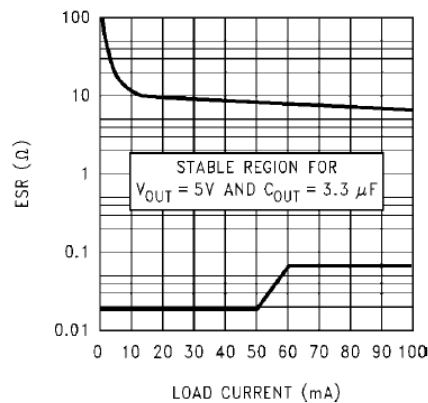
Lähdön suotokondensaattorin sarjaresistanssi R_{ESR} aiheuttaa siirtofunktioon yhden nollan lisää taajuudelle

$$f_{esr} = \frac{1}{2\pi R_{ESR} C_{out}} \quad , \quad (44)$$

jonka täytyy asettua lineaariregulaattorin siirtofunktiossa sopivasti, jotta siirtofunktion vaihemarginaali on riittävä takaamaan stabiilin toiminnan. Sarjaresistanssin tai suotokondensaattorin kapasitanssin pienentäminen nostaa nollaa korkeammille taajuuksille. Kuvassa 29 on erään lineaariregulaattorin suotokondensaattorin Cout sarjaresistanssille sallitut arvot, joilla piiri toimii stabiilisti. Koska lähdöstä aiheutuvan navan (kaava 43) taajuus nousee kuormituksen kasvaessa, voi nolla olla myös korkeammilla taajuuksilla ja toiminta on yhä stabiilia. Navan taajuuden laskiessa myös nollan taajuuden täytyy laskea. Käytännössä tämä tarkoittaa sarjaresistanssin kasvattamista kuormituksen pienentyessä. Lineaariregulaattoreiden valmistajat antavat datalehdessään suositellut suotokondensaattoreiden kapasitanssiarvot ja niiden sallitut sarjaresistanssiarvot kuormituksen funktiona, kuten kuvassa 29. Näitä arvoja käyttämällä lineaariregulaattorin toiminnan pitäisi olla stabiilia.

Sallitut resistanssiarvot riippuvat paitsi lähdön kapasitanssista (tässä tilanteessa $3,3 \mu\text{F}$), myös kuormituksesta. Koska kondensaattorien kapasitanssiarvo saattaa vaihdella kondensaattorityypistä riippuen hyvinkin paljon lämpötilan funktiona, samoin kuin sen sarjaresistanssi, on varmistuttava, että arvot pysyvät sallituissa rajoissa kaikissa tilanteissa. Esimerkiksi keraamisen X7R-kondensaattorin kapasitanssi voi kuumassa olla 75 % nimellisarvostaan tai elektrolyyttikapasitanssin sarjaresistanssi vain neljäsosa arvostaan huoneenlämmössä. Lisäksi elektrolyyttikondensaattorin sarjaresistanssi kasvaa lähes eksponentiaalisesti kylmässä, joka hyvin todennäköisesti johtaa epästabiilisuuteen.

Koska kaikkien lineaariregulaattorin lähdössä olevien kondensaattorien ja resistanssien yhteisvaikutusta on hankala arvioida, tulee lineaariregulaattoreiden stabiilisuus valmiilla



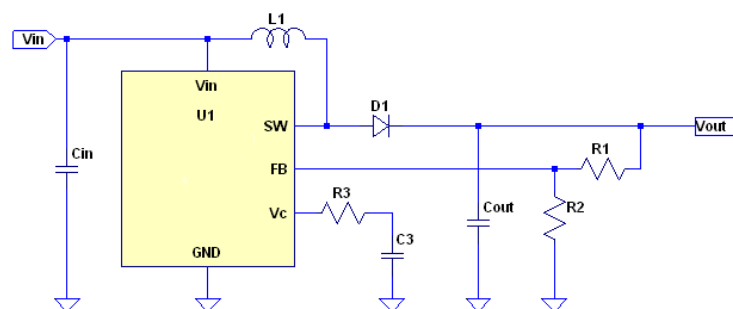
Kuva 29: Erään lineaariregulaattorin suotokondensaattorille C_{OUT} sallitut sarjaresistanssin R_{ESR} sallitut arvot, joilla piirin toiminta on stabiilia.

piirilevyllä testata keinokuormalla. Testaus tulisi suorittaa toimintalämpötilan äärirajoissa, jotta kapasitanssien ja sarjaresistanssien muuttuminen tulee huomioon. Testauksessa kuormituksen tulisi vaihdella askelmaisesti avoimesta piiristä täyteen kuormitukseen. Lähtöjännitteen värähtelystä tai ylittymisestä kuormamuutosten yhteydessä voidaan päätellä toiminnan olevan epästabiilia, jolloin täytyy hakea uusi yhdistelmä suotokondensaattorista ja sen sarjaresistanssista. [53]

5.3.5 Hakkuriregulaattorit

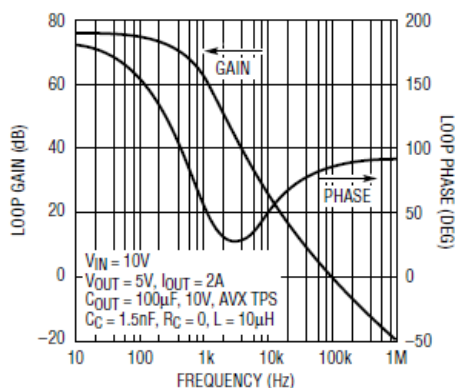
Hakkuriregulaattorissa (kuva 30) hyödynnetään induktanssin energianvarastointikykyä siten, että kytkemällä induktanssiin vuoroin tulojännite ja vuoroin lähtökuorma, saadaan muutettua tulojännite halutuksi lähtöjännitteeksi, joka voi hakkuritopologiasta riippuen olla matalampi tai korkeampi kuin tulojännite. Hakkuriregulaattori on huomattavasti lineaariregulaattoria monimutkaisempi ja se aiheuttaa enemmän sähkömagneettisia häiriöitä. Hakkuriregulaattorin hyötysuhde toisaalta voi olla parhaimmillaan jopa yli 90 %.

Hakkuriregulaattorissa lähdön suotokondensaattorin C_{OUT} sarjaresistanssi R_{ESR} määrää oleellisesti lähdön jännitevaihtelun suuruuden, joten sen minimointi takaa vakaamman jännitteen. Tällöin on otettava huomioon sarjaresistanssin muutokset lämpötilassa, ja varsinkin elektrolyyttikondensaattorit ovat kylmässä käyttökelvottomia. Tantaalikondensaattoreilla sarjaresistanssi aiheuttaa nollan matalille taajuuksille ja kondensaattori on kytkentätaajuudella (yleensä yli 200 kHz) lähes resistiivinen, mikä parantaa regulaattorin stabiilisuutta. Keraamisilla kondensaattoreilla taas täytyy huomioida kondensaattorin sarjainduktanssi, sillä keraamiset kondensaattorit ovat kytkentätaajuuksilla yhä kapasitiivisia ja sarjainduktanssi aiheuttaa usein resonanssin ennen kuin sarjaresistanssi vaikuttaa. Keraamisilla kondensaattoreilla silmukavahvistuksen stabiilisuuteen täytyy kiinnittää erityistä huomiota.



Kuva 30: Esimerkki *boost*-tyyppisestä hakkuriregulaattorista, jolla saadaan korkeampi lähtöjännite kuin tulojännite. Sisäinen kytkin kytkee **SW**-nastaa maan ja kuorman välillä, jolloin kuormaan saadaan haluttu keskimääräinen jännite, joka asetetaan vastuksien **R1** ja **R2** avulla.

Kuten lineaariregulaattoreissa, myös hakkuriregulaattoreissa on takaisinkytkentä, johon liittyvät nollat ja navat saattavat aiheuttaa epästabiilisuutta. Hakkuriregulaattoreiden induktiiviset komponentit aiheuttavat siirtofunktion useita nappoja ja yhdessä suotokondensaattorin kanssa ne aiheuttavat resonanssiipiirin. Hakkuriregulaattoreiden vaihe voi käydä lähellä vaihemarginaalin nollaa matalilla taajuuksilla (kuva 31). Minimien taajuus liikkuu suotokondensaattorin sarjaresistanssin muuttuessa samoin kuin yksikkövahvistuksen taajuus, ja sarjaresistanssilla on muutenkin suurin vaikutus silmukan siirtofunktion. Minimien siirtyessä liikaa muuttuu hakkuriregulaattori epästabiiliksi.



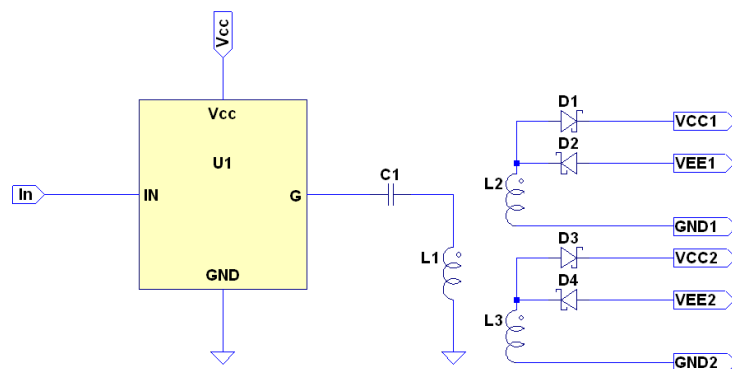
Kuva 31: Esimerkki hakkuriregulaattorin silmukkavahvistuksesta ja vaiheesta. Vaihe käy lähellä vaihemarginaalin nollaa noin 4,4 kHz taajuudella. Yksikkövahvistuksen taajuus on noin 100 kHz, jossa vaihemarginaalia on noin 60°.

Käytännössä hakkuriregulaattoreiden stabiilisuus tulee testata kuormitusta askelmaisesti muuttamalla ja ottaen huomioon lämpötilan vaikutus sekä kondensaattoreiden kapasitanssiin ja sarjaresistanssiin kuin kelojen induktanssiin ja vastuksiin. Tämän vuoksi stabiili-

suus täytyykin testata optimiarvojen lisäksi myös esimerkiksi $\pm 20 \dots \pm 50 \%$ kapasitanssiarvoilla, $\pm 200 \%$ sarjaresistanssiarvoilla ja $\pm 30 \%$ induktanssiarvoilla, jotta stabiilisudesta kaikissa käyttöolosuhteissa voidaan olla suhteellisen varmoja. [54]

5.3.6 Hila-ajurien apujännite

Tehopäätetransistorien ohjausta varten piirikortilla tuotetaan -8 V ja 16 V apujännitteet, joilla transistorit kytketään päälle ja pois. Jännitteiden tuottamiseen käytetään yksinkertaista *push-pull*-tyyppistä teholähdettä (kuva 32), jossa pulssisuhteella säädetään lähtöjännitteiden suhdetta ja DC-erotuskondensaattori estää muuntajan saturoitumisen.



Kuva 32: Kaavio hila-ajurien apujännitteet tekevstä toroidimuuntajasta ja sen ajuripiiristä.

Muuntajaa ajavat piirit toimivat hyvin kuumina suuren lähtöresistanssin vuoksi. Kuumentamista voitaisiin vähentää pienentämällä piirin läpi menevän virran määrää tai lähtöresistanssia.

Muuntajan käämikierrosten lisääminen vähentäisi ensiöpuolella tarvittavan virran määrää. Toisaalta käämilangan resistanssi kasvaa, mikä aiheuttaa lähtöjännitteen putoamista kuormituksen kasvaessa. Käämilangan tulisi olla mahdollisimman paksua, jotta resistanssi pysyisi pienenä ja lähtöjännite vakaana.

Ajuripiiriin voisi vaihtaa nastoiltaan yhteensopivaan malliin, jolla lähtöresistanssi olisi pienempi, mutta sopivaa piiriä ei työn kirjoitushetkellä ollut saatavilla. Myös pienemmän lämpöresistanssin omaavan piirin käyttäminen voisi pienentää kuumentamisongelmaa hieman.

Kuumentamisongelma helpottuisi parhaiten ajamalla erillisiä transistoreita, joiden $R_{DS,on}$ olisi pieni, esimerkiksi $0,3 \text{ m}\Omega$. Tällöin käämikierroksia voitaisiin vähentää ja lähtöjännite pysyisi vakaampana ja silti teholähteen häviöt pysyisivät huomattavasti nykyistä pienempänä. Erillisten transistorien käyttö vaatisi piirilevyn uudelleensuunnittelua tilaongelmien vuoksi.

5.3.7 Kondensaattorit

Piirikortin kondensaattoreista suurin osa on X7R-tyyppisiä, joiden toleranssi on $\pm 15\%$ lämpötilavälillä $-55 \dots 125 \text{ }^\circ\text{C}$. Nämä soveltuvat myös uuteen tuotteeseen, sillä suunnittelussa on täytynyt ottaa koko kapasitanssin vaihteluväli huomioon.

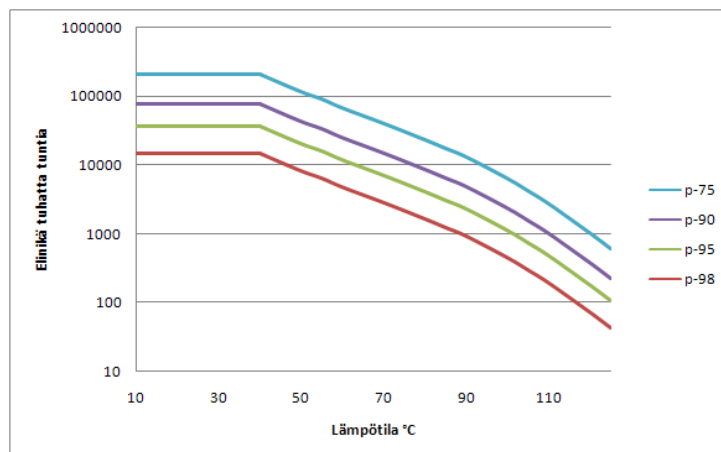
Kolmella kondensaattorilla lämpötila-alue on rajoitetumpi; yksi X5R-tyyppinen keraaminen kondensaattori sekä kaksi filmikondensaattoria. Näille valmistaja lupaa käyttölämpötila-alueen $-55 \dots 85 \text{ }^\circ\text{C}$, mikä on riittämätön tulevissa käyttöolosuhteissa.

Keraaminen kondensaattori voidaan vaihtaa suoraan vastaavaan X7R-tyyppiseen, jolloin saavutetaan riittävä toimintalämpötila-alue. Filmikondensaattoreiden kohdalla tilanne on hankalampi, sillä kondensaattoreilta vaaditaan jopa 1250 V jännitekesto ja suuri, yli 10 mm, eristysväli. Keraamisia kondensaattoreita on hankala löytää vaaditulla eristysvälillä ja jännitekesto rajoittaa muun muassa tantaali- ja elektrolyyttikondensaattoreiden käyttöä. Mica-paperikondensaattoreista ja teflon-kondensaattoreista ei toistaiseksi löydy vaadittua 100 nF kapasitanssia.

Filmikondensaattoreita voidaan käyttää ylärajaa korkeammassa lämpötilassa, jos käyttöjännitettä rajoitetaan. Esimerkiksi käytössä olevan kondensaattorin suurin sallittu jännite pienenee 1,3 % jokaista $1 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilan nousua kohti $85 \text{ }^\circ\text{C}$ yläpuolella. Jos vaaditaan jännitekesto 1250 V lämpötilassa $100 \text{ }^\circ\text{C}$, täytyy kondensaattorin normaalin jännitekeston olla vähintään 1550 V.

Kortilla on myös 6 elektrolyyttikondensaattoria, joille valmistaja on määritellyt käyttölämpötila-alueen $-44 \dots 105 \text{ }^\circ\text{C}$. Tämä on riittävä, mutta valmistaja lupaa kondensaattoreille vain 4000 tunnin eliniän $105 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa, joka on huomattavasti lyhyempi kuin piirikortin suunniteltu elinikä. Myös filmikondensaattoreilla lämpötilan nousu vaikuttaa elinikää lyhentävästi. Elektrolyyttikondensaattoreiden elinikä on määritely kapasitanssin yli $\pm 25 \%$ muutoksella, häviökertoimen 200 % muutoksella tai vuotovirran ylittämislä nimellisen arvonsa [55]. Filmikondensaattoreiden kapasitanssin muutos elinaikana saa olla alle $\pm 10 \%$, häviökerroin saa muuttua alle 400 % ja eristysvastuksen tulee pysyä alle $1500 \text{ M}\Omega$:n. Kuvassa 33 on esitetty lämpötilan vaikutus filmikondensaattorin elinikään olettaen datalehdessä annettu 1 virhe miljoonaa käyttötuntia kohden $40 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa. [56]

Kuvasta nähdään, että filmikondensaattoreidenkin elinikä jää korkeassa lämpötilassa lyhyeksi. Koska nämä kondensaattorit toimivat piirissä energiavarastoina, voi olla että parametrien muutos ei heti johda kortin toimimattomuuteen, mutta pidemmällä aikavälillä komponentit hajoavat lopullisesti. Lyhyen eliniän vuoksi elektrolyytti- tai filmikondensaattoreiden käyttöä korkean lämpötilan laitteissa ei voi suositella, ja ne olisikin hyvä korvata esimerkiksi keraamisilla kondensaattoreilla aina kun mahdollista. Usein keraamisia kondensaattoreita tarvitaan useampia saman kapasitanssin saavuttamiseksi, joka voi aiheuttaa tilaongelmia piirikortilla.



Kuva 33: Lämpötilan vaikutus filmikondensaattorin odotettavissa olevaan elinikään, olettaen että muut parametrit pysyvät vakiona. P-arvot kertovat varmuustekijän (75 . . . 98%). [57]

5.3.8 Tehonkulutus

Komponenttien lämpötilan mukana muuttuvat vuotovirrat, kytkentäaikojen kasvaminen ja muut ilmiöt muuttavat myös niiden tehonkulutusta. Tämän vuoksi suunniteltaessa laitetta laajemmalle lämpötila-alueelle ei riitä, että tarkistetaan piirin tyypillinen tehonkulutus, sillä esimerkiksi kylmässä joidenkin IC-piirien kohdalla tehonkulutus voi olla jopa kaksinkertainen käyttölämpötilan ylärajaan verrattuna.

Tehonkulutuksen muuttumisella voi olla huomattava vaikutus varsinkin pienitehoista, hyvähyötysuhteista piiriä suunniteltaessa, sillä teholähde täytyy mitoittaa toimimaan sekä pienimmällä että suurimmalla kulutuksella. Samoin kuumina käyvät piirit täytyy ottaa tarkemmin huomioon, mikäli kuumentuminen edelleen lisää piirissä tapahtuvia häviöitä, sillä tällöin lämpeneminen ruokkii itseään ja johtaa piirin tuhoutumiseen.

Komponenttien yksilölliset tehonkulutuslaskut on käsitelty luvussa 3, mutta tyypillisiä ilmiöitä on sarjaresistanssien muuttuminen, esimerkiksi elektrolyyttikondensaattoreilla pieneneminen ja transistoreilla suureneminen lämpötilan noustessa, kapasitanssien lataamiseen kuluvan energian muutos, kytkentäaikojen pitenemisestä aiheutuva kytkentähäviöiden kasvu ja vuotovirroista aiheutuva häviöteho. Jotkin ilmiöt kumoavat toisensa, joten tarkkaa suunnittelua varten tulee jokaisen komponentin parametrit käydä läpi ja arvioida niiden vaikutus koko laitteen häviötehoon.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Elektronisen laitteen suunnittelu tavallista kuluttaja- tai teollisuuselektroniikkaa laajempiin lämpötilaolosuhteisiin vaatii huomattavasti enemmän perehtymistä komponenttien toimintaan ja parametrien muutoksiin.

Lämpötilan laskun voi harvemmin olettaa muodostuvan ongelmaksi. Komponenttien parametrit muuttuvat lämpötilan laskiessa, mutta häviötehon komponentteja lämmittävä vaikutus pienentää ongelmaa. Elektrolyyttikondensaattoreiden mahdollinen jäätyminen täytyy ottaa huomioon, ja niiden välttäminen kylmissä olosuhteissa on perusteltua myös sarjaresistanssin suuren muutoksen vuoksi. Puolijohdekomponenteilla kynnysjännitteiden nousu voi aiheuttaa ongelmia, mikäli komponentteja käytetään niiden toimintarajalla. Toisaalta vuotovirrat ja kohina pienenevät ja toimintanopeus kasvaa. Toimintanopeus alkaa laskea piikomponenteilla vasta alle 100 K lämpötilassa. Lämpötilan laskeminen myös hidastaa virhemekanismeja, mikä johtaa eliniän kasvamiseen.

Käyttölämpötilan nostaminen on hankalampaa. Piikomponenttien toiminnan yläraja alkaa tulla vastaan liitoslämpötilassa 125 . . . 150 °C, joka tarkoittaa noin 90 . . . 120 °C ympäristölämpötilaa. Tästä ylöspäin mentäessä täytyy puolijohdekomponenteilla harkita uusien materiaalien, kuten SOI:n tai piikarbidin (SiC) käyttämistä. Tällöin komponenttien hinta toistaiseksi nousee huomattavasti. Lisäksi komponenttien saatavuus on tällä hetkellä heikompaa kuin piipohjaisten, mikä rajoittaa suunnittelumahdollisuuksia. Puolijohdekomponenteilla rajoittaviksi tekijöiksi muodostuvat vuotovirrat ja kynnysjännitteiden lasku, mikä huonontaa nolla- ja ykköstilojen erottamista sekä kytkennän hidastuminen. Vuotovirran kasvaminen on otettava huomioon etenkin suuri-impedanssisissa kytkennöissä ja hidastuminen nopeiden signaalien välityksessä. Ykkös- ja nollatilojen läheneminen voi aiheuttaa virheellisiä päällekytkeytymisiä tai osittaista kytkeytymistä, minkä vuoksi lo-giikkatilat on erotettava riittävällä jännitteellä toisistaan.

Optiset komponentit ovat erityisen herkkiä lämpötilan nostamiselle, sillä optinen teho pienenee lämpötilan noustessa. Tämä heikentää esimerkiksi optoerottimien virransiirtosuhdetta. Lisäksi kuumeneminen nopeuttaa materiaalin vanhenemista, josta seuraa optisen tehon pysyvä pieneneminen ja lopulta komponentin toiminnan loppuminen. Kriittisille optisille komponenteille tulisikin löytää korvaava ratkaisu, esimerkiksi digitaalinen erotin.

Passiivikomponenteilla lämpötilan nousu muuttaa parametrien arvoja huomattavasti. Eri-tyisen kriittisiä ovat takaisinkytkentöjä sisältävät piirit, joissa parametrien muutos helposti johtaa epästabiilisuuteen. Tällaisia piirejä ovat esimerkiksi teholähteet ja vahvistinkytkennät. Lisäksi elektrolyyttikondensaattoreiden kuivumisesta johtuva eliniän nopea lasku lämpötilan noustessa usein estää elektrolyyttikondensaattoreiden käyttämisen. Myös polymeeri- ja filmikondensaattoreilla elinikä lyhenee, joten niidenkin korvaamista muilla vaihtoehdoilla on harkittava. Ferromagneettisten aineiden Curie-lämpötila on usein

100 . . . 130 °C, joten muuntajien ja kelojen sydänmateriaalia valittaessa on kiinnitettävä huomiota materiaalin soveltuvuuteen korkeampaan lämpötilaan.

Monet elektroniikan vikamekanismeista kiihtyvät lämpötilan noustessa, ja vikatiheyden kasvu on sitä nopeampaa, mitä korkeampi lämpötila on. Tämän vuoksi lämpenemistä samoin kuin muita vikamekanismeja aktivoivia ilmiöitä täytyy välttää. Yksi tapa tähän on ylimitoittaa komponentteja, jolloin niiden suuremman koon ansiosta lämpeneminen, virrantiheys ja usein myös sähkökentän suuruus jäävät pienemmäksi ja vikamekanismit hidastuvat. Lisäksi lämpötilavaihteluiden kasvaessa komponenttien kotelointiin on kiinnitettävä huomiota, erityisesti mikäli ympäristössä on myös tärinää. Usein jalallisten komponenttien joustaminen ja pienten komponenttien pienempi lämpölaajeneminen vähentää liitoksiin kohdistuvaa rasitusta ja täten parantaa kestävyyttä. Toisaalta ylimitoittaminen vaatii usein suuremman kotelon käyttöä, jolloin on tehtävä kompromissi ylimitoittamisen ja tärinän ja lämpösykluskestävyyden välillä. Myös piirilevymateriaalin valinnalla on merkitystä; sen lämpölaajenemiskertoimen tulisi olla mahdollisimman sama kuin komponenttien. Jopa juotosliitoksen koolla ja muodolla on vaikutusta siihen, kuinka nopeasti rasitus rikkoo liitoksen.

Huolellisella suunnittelulla voidaan elektronisen laitteen toiminnallisuus tavallista korkeammassa lämpötilassa varmistaa ja vioittuvuutta voidaan pienentää joidenkin virhemekanismien osalta ylimitoittamalla komponentteja. Korroosio ja tärinän sekä lämpötilan vaihtelun aiheuttamat rasitukset kuitenkin vaikuttavat vioittuvuuteen, eikä niitä voida täysin estää elektroniikkasuunnittelun keinoin. Vioittuvuutta voitaisiin edelleen pienentää muun muassa laitekoteloinnin ja muun mekaniikan huolellisella suunnittelulla.

Viitteet

- [1] Mauri Peltola, ABB, *Taajuusmuuttajat kansankielellä*, 2002. Esitelmä.
- [2] ABB Drives, *Technical guide book*, 2008.
- [3] Vishay Beyschlag, *Basics of linear fixed resistors*, 2008. Tekninen tiedote.
- [4] R. R. Grzybowski, "Long term behavior of passive components for high temperature applications - an update," *Fourth international high temperature electronics conference*, s. 207–214, kesäkuu 1998.
- [5] M. L. Gasperi, "Life prediction model for aluminum electrolytic capacitors," *Industry applications conference*, 1996.
- [6] W. D. Greason ja J. Critchley, "Shelf-life evaluation of aluminum electrolytic capacitors," *IEEE transactions on components, hybrids, and manufacturing technology*, vol. CHMT-9, syyskuu 1986.
- [7] Sanyo Electric Co., Ltd., *OS-CON Capacitor Lecture (Basic)*, 2009. Esitelmä.
- [8] EIA, *Ceramic dielectric capacitors classes I, II, III and IV part I: Characteristics and requirements*, 2002. EIA-198-1F.
- [9] KEMET Electronics Corp., *Technical update - comparison of ceramic and tantalum capacitors*, 2004.
- [10] S. Barkal, M. Prevallet, J. Prymak, ja P. Staubli, "High temperature ceramic and tantalum capacitors," *CARTS-Europe*, 2004.
- [11] F. Esteban, "Thermal shock poses no problem in automotive," *Power systems design Europe*, 7-8/2007.
- [12] J. S. Bowers, "Comparative characterization of capacitors used in high temperature electronics applications," *High temperature electronics conference*, 1998.
- [13] A. N. Hammoud, E. D. Baumann, ja I. T. Myers, "Electrical characterization of glass, teflon, and tantalum capacitors at high temperatures," *Conference on Electrical insulation and dielectric phenomena*, s. 280–285, 1991.
- [14] Epcos, *Thermal design of capacitors for power electronics*, 2005.
- [15] L. F. Chen, C. P. Neo, C. K. Ong, C. C. Varadan, ja V. K. Varadan, *Microwave electronics: Measurement and materials characterization*. England: John Wiley & Sons, 2004.

- [16] C. A. Harper, *Electronic materials and processes handbook*. New York: McGraw-Hill, 3. painos, 2003.
- [17] T. Brander, A. Gerfer, B. Rall, ja H. Zenkner, *Trilogy of magnetics*. Waldenburg: Würth Elektronik GmbH & Co. KG, 4. painos, 2009.
- [18] Ferroxcube, *3F3 material specification*, 2004. Datalehti.
- [19] R. Bechmann, "Frequency-temperature-angle characteristics of at-type resonators made of natural and synthetic quartz," *Proceedings of the IRE*, 1956.
- [20] E. K. Miquel, "A temperature compensated sc cut quartz crystal oscillator," *36th annual frequency control symposium*, 1982.
- [21] J.-P. Colinge, *Physics of semiconductor devices*. New York: Kluwer academic publishers, 2002.
- [22] A. S. Sedra ja K. C. Smith, *Microelectronic circuits*. New York: Oxford university press, 4. painos, 1998.
- [23] J. Sinkkonen, *Puolijohdeteknologian perusteet*. Otaniemi, 1996.
- [24] D. A. Jenny ja J. J. Wysocki, "Temperature dependence and lifetime in semiconductor junctions," *Journal of applied physics*, 1959.
- [25] M. S. Shur, A. Khan, ja G. Simin, "Wide band gap electronic devices (keynote)," *Fourth IEEE International Caracas Conference on devices, circuits and systems*, 2002.
- [26] M. R. Werner ja W. R. Fahrner, "Review on materials, microsensors, systems, and devices for high-temperature and harsh-environment applications," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 48, s. 249–257, huhtikuu 2001.
- [27] A. Weinert, *Plastic optical fibers*. Wiley-VCH, 5. painos, 1999.
- [28] Philips, *Useful life: Understanding LM-80, Lumen maintenance, and LED Fixture lifetime*, 2010. Tekninen tiedote.
- [29] T. Väätäinen, "Minimization of losses in frequency converters," Diplomityö, Teknillinen Korkeakoulu, Automaation ja systeemitekniikan laitos, 2002.
- [30] A. K. et al., "Trench mosfet robustness in linear mode applications," *Power systems design Europe*, 7-8/2007.
- [31] Integrated Circuit Devices, University of California, College of Engineering, Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, *MOSFET Technology Scaling, Leakage Current, and Other Topics*, 2006.

- [32] H. M. et al., "A 7-ns/850-mw gaas 4-kb sram with little dependence on temperature," *IEEE Journal of solid-state circuits*, vol. 25, s. 1232–1238, lokakuu 1990.
- [33] J. D. Lytle, *Handbook of optics, Volume II*. New York: McGraw-Hill, 2. painos, 1995.
- [34] E. Savioja, "Erään taajuusmuuttajan luotettavuusanalyysi," Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto, 1994.
- [35] J. Romppainen, "Linjakäytön ennakkohuolto," Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto, 2002.
- [36] JEDEC, *Failure mechanisms and models for semiconductor devices*. JEP122.
- [37] Telcordia Technologies Special Report, *Reliability prediction procedure for electronic equipment*. SR-332.
- [38] Yhdysvaltain puolustusministeriö, *Reliability prediction of electronic equipment*. MIL-HDBK-217f.
- [39] P. D. O'connor, *Practical reliability engineering*. England: Wiley, 4. painos, 2002.
- [40] R. Hienonen ja R. Lahtinen, *Korroosio ja ilmastolliset vaikutukset elektroniikassa*. Helsinki: VTT, 2007.
- [41] H. Qi, S. Ganesan, J. Wu, ja M. Pecht, "Effects of printed circuit board materials on lead-free interconnect durability," *5th international conference on polymers and adhesives in microelectronics and photonics*, 2005.
- [42] C. Hunt ja M. Dusek, "Lead-free solders and pcb finish effects on solder joint reliability," *Electronics Systemintegration technology conference*, 2006.
- [43] Y.-S. Lai, T. H. Wang, ja C.-C. Lee, "Thermal-mechanical coupling analysis for coupled power- and thermal-cycling reliability of board-level electronic packages," *IEEE transactions on device and materials reliability*, vol. 8, s. 122–128, maaliskuu 2008.
- [44] R. Grzybowski, "Advances in electronic packaging technologies to temperatures as high as 500°C," *High-temperature electronic materials, devices and sensors conference*, 1998.
- [45] P. Németh, Z. Illyefalvi-Vitéz, ja G. Harsányi, "Review of the reliability of advanced component packaging technologies," *Electronic components and technology conference*, 2000.

- [46] C.-M. Liu, C.-C. Lee, ja K.-N. Chiang, "Enhancing the reliability of wafer level packaging by using solder joints layout design," *IEEE transactions on components and packaging technologies*, vol. 29, s. 877–885, joulukuu 2006.
- [47] P. Rantala ja M. Lahdenperä, *Elektroniikan värinäsietoisuus*. Helsinki: Suomen metalli-, kone- ja sähkötekniikan teollisuuden keskusliitto, 1990.
- [48] Q. J. Yang, H. L. J. Pang, Z. P. Wang, G. H. Lim, F. F. Yap, ja R. M. Lin, "Vibration reliability characterization of pbga assemblies," *Microelectronics reliability*, vol. 40, heinäkuu 2000.
- [49] O. Salmela, *Reliability assessment of telecommunication equipment*. Väitöskirja, Teknillinen korkeakoulu, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan laitos, 2005.
- [50] A. Pressman, K. Billings, ja T. Morey, *Switching power supply design*. New York: McGraw-Hill, 3. painos, 2009.
- [51] S. Lindvall, "Digitaalierottimien soveltuvuus häiriölliseen ympäristöön," Diplomitö, Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan koulutusohjelma, 2008.
- [52] A. Kekki, "Tehopuolijohteen ohjaussignaalin induktiivinen erottaminen," Diplomitö, Aalto-yliopisto, Elektroniikan laitos, 2011.
- [53] National Semiconductor, *Linear regulators: theory of operation and compensation*, 2000. AN-1148, Tekninen tiedote.
- [54] Linear Technology, *LT1959 - 4.5A, 500kHz step-down switching regulator*, 2000. Datalehti.
- [55] Nippon Chemi-Con, *KZE Series miniature aluminum electrolytic capacitors*. Tuoteluettelo.
- [56] Epcos, *Metallized Polypropylene Film Capacitors (MKP)*, 2009. Tuoteluettelo.
- [57] EPCOS, *Film capacitors quality*, 2009. Tekninen tiedote.
- [58] AVX, *Dielectric comparison chart*, viitattu 2011. Tekninen tiedote.
- [59] T. Williams, *The Circuit Designer's Companion*. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd, 1991.

A Vastusten lämpötilaparametreja

Taulukko A1: Vastusluokkien tyypillisiä lämpökäyttämisarvoja. Stabiilisuus tarkoittaa resistanssin muutosta prosentteina 1000 käyttötunnin jälkeen 70 °C lämpötilassa. [3]

Vastustyyppi	Lämpötilakerroin [ppm/°C]	Suurin käyttöläm- pötila [°C]	Stabiilisuus [%]
Metallikalvo (<i>foil</i>)	$\pm 2 \dots \pm 50$	150	$\pm 0,05$
Metallikalvo (<i>film</i>)	$\pm 5 \dots \pm 50$	155	$\pm 0,15 \dots \pm 0,5$
Paksukalvo	$\pm 50 \dots \pm 200$	155	$\pm 1 \dots \pm 3$
Lankavastus	$\pm 1 \dots \pm 200$	400	$\pm 1 \dots \pm 10$
Virranmittaus	$\pm 30 \dots \pm 250$	275	$\pm 1 \dots \pm 2$
Hiilikalvo	$200 \dots - 1500$	155	$\pm 0,8 \dots \pm 3$
Hiili-komposiitti	$-200 \dots - 1500$	150	$-6 \dots 4$

B Kondensaattorien lämpötilaparametreja

Taulukko B1: Kondensaattoreiden lämpötilariippuvuudet. Lämpötilakerroin tarkoittaa kapasitanssin muutosta nimellisestä toimintalämpötila-alueella. Vakaus tarkoittaa kapasitanssin muutosta 1000 käyttötunnin jälkeen. [58] [59]

Kondensaattorin tyyppi	Lämpötila-alue [°C]	Lämpötilakerroin [%/°C]	Vakaus [%]	Huomioita
Alumiini-elektrolyytti	-40...85	±10	10	R_{ESSR} pienenee lämpötilan kasvaessa Ikääntyminen nopeutuu korkeassa lämpötilassa
Tantaali	-55...125	±8	10	Kuivilla ei ilmene ikääntymisilmiötä
Filmi (PS)	-55...75	±1	2	Käyttölämpötila nostettavissa jännitettä rajoittamalla
Filmi (PP)	-55...85	±2,5	3	
Filmi (PC)	-55...125	±2	5	
Filmi (PET)	-55...125	±12	10	
Mica	-55...125 -55...200 -55...260	-0,4...1,8	0,1	Erittäin vakaat ominaisuudet Korkein lämpötila riippuu sidosaineesta
Teflon	-65...200			
Lasi-K	-75...200			
Keraaminen X7R	-55...125	±15		Ikääntymisilmiö, nollattavissa
Keraaminen C0G	-55...125	±0,3	0,1	
Keraaminen Y5V	-30...85	-82...22		