

KIIHDYTETTY ELINIKÄTESTAUS

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU

Tietotekniikan koulutusohjelma

Tietokone-elektroniikka

Opinnäytetyö

Kevät 2006

Iljo Jokela

Lahden ammattikorkeakoulu

Tietotekniikan koulutusohjelma

JOKELA, ILJO: Kiihdytetty elinikätestaus

Tietokone-elektroniikan opinnäytetyö, 24 sivua, 4 liitesivua

Kevät 2006

TIIVISTELMÄ

Tämä opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä Teknoware Oy:n kanssa. Loppuasiakkaiden vaatimuksesta tehtävät vanhennustestit ovat yleistyneet yrityksessä. Työn tarkoituksena onkin selvittää erilaisia kiihdytetyn elinikätestauksen laskentamalleja, jotta pystytään nopeuttamaan testauksia ja samalla vähentämään kustannuksia.

Aluksi työssä käsitellään vanhennusprosessia yleisesti, mitä kiihdytetty elinikätestaus tarkoittaa ja pitää sisällään sekä miksi on hyvin tärkeää suorittaa ko. testejä viallisten laitteiden eliminoimiseksi, jotta asiakkaat saavat hyvin luotettavia laitteita.

Seuraavaksi työssä kerrotaan erilaisista kiihdytetyn elinikätestauksen laskentamalleista. Esitellään sekä hyvin tunnettuja laskentamalleja, jotka ovat olleet käytössä jo vuosia ja ovat antaneet hyvin luotettavia tuloksia että vähän tuntemattomampia malleja.

Avainsanat: elinikätestaus, Arrhenius, Eyring

Lahti University of Applied Sciences

Faculty of Technology

JOKELA, ILJO: Accelerated lifetesting

Bachelor's Thesis in Computer Electronics, 24 pages, 4 appendices

Spring 2006

ABSTRACT

The aim of this thesis was to examine different ways to do calculations for accelerated lifetesting, and to find actual calculation models. The work was commissioned by Teknoware Oy and was done in co-operation with the company.

The need to do such tests comes from the clients who require that such operations are done before the product is released. This practise is widely spread and in the future it will most probably be mandatory. Another reason for these calculations is that standardized testing will eventually reduce the time for testing, and therefore will reduce costs.

The first part of the thesis deals with accelerated lifetesting in general, and examines what accelerated testing actually is and how it is done. It also discusses the importance of the procedure in eliminating defective parts so that the clients get the best possible product available.

The next part takes a closer look at different calculation models for accelerated lifetesting. Those include calculation models that have already been in use for many years and have been proven to be very reliable. A little less known calculation models are also introduced.

Keywords: lifetesting, Arrhenius, Eyring

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	1
1.1 Teknoware Oy	1
1.1.1 Yritys	1
1.1.2 Kansainvälisyys	1
1.1.3. Laatu ja laadunvalvonta.....	1
1.2 Päätötyön kuvaus.....	2
2 ELEKTRONISTEN LAITTEIDEN VANHENNUS	3
3 KIIHDYTETTY ELINIKÄTESTAUS.....	5
3.1 Kvantitatiivinen kiihdytetty elinikätesti	5
3.2 Käyttötason kiihdytys	6
3.3 Ylikuormitettu kiihdytys.....	6
4 VIKATAAJUUS	7
4.1 Varhaiskäyttökausi	7
4.2 Käyttökausi	8
4.3 Vanhenemiskausi.....	8
5 YLEISIMMÄT VIOITTUMISMALLIT.....	9
5.1 Arrhenius	9
5.1.1 Esimerkki Arrheniuksen laskentamallista	12
5.1.2 Aktivointienergia	12
5.2 Eyring	13
5.2.1 Eyringin laskentamallin hyödyt.....	15
5.2.2 Eyringin laskentamallin haitat	15
5.3 Lämpötilan ja kosteuden vaikutukset	16
5.3.1 Esimerkki kosteuden ja lämpötilan vaikutuksista	16
5.3.2 Peck-laskentamalli.....	17
5.4 Muut laskentamallit	18
5.4.1 (Invertoitu) tehosäätö jännitteelle.....	18
5.4.2 Eksponentiaalinen jännitemalli.....	18
5.4.3 Kahden lämpötilan/jännitteen malli.....	19
5.4.4 Jännitteen kiihdytyskerroin.....	19
5.4.5 Kolmen rasitteen malli.....	19
5.4.6 Coffin-Manson.....	20
6 YHTEENVETO.....	22
LÄHTEET	23
LIITTEET	24

1 JOHDANTO

1.1 Teknoware Oy

1.1.1 Yritys

Teknoware Oy on osa monialayritystä Trafo-konsernia. Muut konsernin yritykset ovat tehoelektroniikkateollisuutta edustavat Trafotek Oy Turussa ja Ellego Power-tec Oy Halikossa sekä neonvalaistuselektroniikkaan erikoistunut Neoncomp Oy Turussa.

Teknowaren toiminta alkoi vuonna 1972. Teknoware valmistaa liikkuvan kaluston valaisimia ja valaistusjärjestelmiä sekä kiinteistöjen turvavalaisimia ja turvavalaisusjärjestelmiä. Yrityksen erikoisosaamista on elektroninen muuntaja, joka toimii jännitteen muuttajana syöttöjännitteen ja valonlähteen välillä.

1.1.2 Kansainvälisyys

Yritys vie tuotteitaan yli 30 maahan, ja viennin osuus on n. 70 % yrityksen liikevaihdosta. Asiakkaita ovat ajoneuvoteollisuuden johtavat bussi- ja junavalmistajat sekä turvavalaisinvalmistajat. Teknoware työllistää n. 130 henkilöä. Teknowarella on ulkomaisia yksiköitä Venäjällä, Puolassa ja Kiinassa.

1.1.3. Laatu ja laadunvalvonta

Teknowarella on ollut sertifioidut ISO 9001-laatusjärjestelmä vuodesta 1993 ja ISO 14001-ympäristöjärjestelmä vuodesta 2000. Määritetyn toimintapolitiikan mukaan yrityksen päätavoite on palvella asiakkaita mahdollisimman hyvin. Toimintapolitiikkaa toteutetaan seuraavien toimintaperiaatteiden mukaan: asiakaspalvelun, jatkuvan parantamisen, ympäristösuojelun, taloudellisen kannattavuuden sekä vastuunjaon periaate.

1.2 Päätötyön kuvaus

Nykypäivän elektroniikkatuotteiden elinkaari on hyvin pitkä, joten ongelmana onkin, miten pystytään saavuttamaan asiakkaan vaatimat luotettavuuskriteerit erilaisilla testeillä. Laitteiden elinikää ei pystytä määrittelemään pelkillä käyttökokeilla, koska ne vievät niin paljon aikaa ja kustannukset nousevat hyvin suuriksi. Avuksi onkin kehitetty rasitekokeita ja kiihdytettyjä elinikätesteitä, joilla saadaan pienennettyä testausaikoja ja samalla myös supistetaan kustannuksia.

Elinikätesteillä pyritään myös karsimaan tuotteista heikot yksilöt. Opinnäytetyöni tarkoituksena onkin tutkia erilaisia kiihdytetyn elinikätestaukseen liittyviä laskentamalleja. Suosituin laskentamalli on varmasti lämpötilariippuvainen Arrheniuksen laskentamalli. Kuitenkin vakiolämpötilaa käytettäessä testausajat kasvavat pitkiksi, koska lämpötilaa ei voida kasvattaa rajattomasti, joten täytyy ottaa käyttöön myös muita rasitteita, esim. kosteus.

Teknoware Oy:n kehittämät laitteet joutuvat käyttöolosuhteissa suuren rasituksen kohteeksi, joten yrityksen luotettavuuden kannalta asiakkaiden suhteen onkin erityisen tärkeä tehdä tuotteille vanhennustestejä, jotta saadaan poistettua toimimattomat laitteet jo alkuvaiheessa. Kun toimitusajat ovat hyvin pieniä, täytyy testit myöskin suorittaa lyhyessä ajassa.

2 ELEKTRONISTEN LAITTEIDEN VANHENNUS

Elektronisten laitteiden osalta riittävän laajat luotettavuustestit normaaleissa olosuhteissa vaativat paljon testattavia laitteita, hyvin pitkän testausajan ja samalla hyvin suuria kustannuksia. Joissakin tilanteissa elinikä tieto on hyvin vaikea, ellei jopa mahdoton saavuttaa. Syitä tähän vaikeuteen voi olla tämän päivän laitteiden pitkä elinikä, pieni aikaväli suunnittelun ja markkinoinnin välillä ja haaste testata laitteita, joita käytetään jatkuvasti normaaleissa olosuhteissa. Omaksuen nämä vaikeudet ja tarpeen havaita viat tuotteissa, jotta paremmin ymmärrettäisiin vioittumismalleja ja elinajan tunnusmerkkejä, luotettavuuden testaajat ovat yrittäneet keksiä keinoja tehostaa ja nopeuttaa laitteiden vioittumista, kuin normaaleissa olosuhteissa. Tänä päivänä luotettavuustestit suoritetaan usein ns. nopeutettuihin elinikä testeihin, joissa luotettavuuteen vaikuttavat tekijät (esim. lämpötila, kosteus, jännite) saavat normaaliolosuhteista poikkeavia, vikamekanismeja nopeuttavia arvoja.

Peruskäsitteenä kiihtyvyys on yksinkertainen. Oletetaan, että komponentit, joita käytetään tehostetuissa olosuhteissa (esim. korkeampi kosteus ja lämpötila), saavat samanlaisia vikoja kuin käytettäessä normaaleja olosuhteita, ainoastaan asiat tapahtuvat nopeammin. Esimerkiksi, jos korroosion viat esiintyvät tavallisessa käyttölämpötilassa ja kosteudessa, niin samanlaiset korroosion tapahtumat saadaan aikaiseksi paljon nopeammin korkeassa lämpötilassa ja kosteudessa laboratorio-olosuhteissa. Toisin sanoen voidaan ajatella kiihdytetystä ajasta, kuin että vioittumisprosessi kuvattaisiin nauhalle ja näytettäisiin se moninkertaisella nopeudella. Jokainen askel kemiallisessa tai fysikaalisessa tapahtumaketjussa kiihdytetyissä olosuhteissa johtaa samanlaiseen vioittumistilaan kuin normaaleissa olosuhteissa, ainoastaan aika-asteikolla tapahtuma-aika nopeutuu. (Tobias & Trindade 1998, 166 - 167.)

Kiihdytetyt elinikä testit voidaan jakaa kahteen osa-alueeseen: laadulliseen kiihtyvyydestiin ja kvantitatiiviseen (määrälliseen) kiihdytettyyn elinikä testiin. Laadullisessa kiihtyvyydestissä testaaja on enimmäkseen kiinnostunut vioittumistavoista ilman, että yrittää tehdä mitään ennusteita tuotteen eliniästä normaaleissa

olosuhteissa. Kvantitatiivisessa kiihdytetyssä elinikätestissä testaaja on kiinnostunut laitteen eliniän ennustamisesta (tarkemmin sanottuna eliniän tunnusmerkeistä, niin kuin esimerkiksi MTTF:stä, jne.) normaaleissa käyttöolosuhteissa.

3 KIIHDYTETTY ELINIKÄTESTAUS

Laitteen luotettavuuden mittaamiseen on olemassa kaksi erillistä tiedonlähdettä: kiihdytetty elinikätesti ja tehtaassa tai kentällä suoritettava suorituskyvyn testaus. Nämä lähteet edellyttävät kaksi hyvin erilaista luotettavuuden mittausta. Kiihdytetystä elinikätestistä saadaan tietoa odotettavasta luotettavuudesta hyvin pitkälle ajalle (vuosikymmeniksi). Tehtaasta tai kentältä saatavat tiedot antavat todellisia laitteen luotettavuustietoja lyhyeltä ajalta (vähemmän kuin muutama vuosi).

Koska laitteet ovat yleensä hyvin luotettavia, kiihdytetty vioittuminen on tarpeen, jotta vika voidaan havaita järkevän ajanjakson aikana. Kiihdytetty rasitteen vaikutukset täytyy ymmärtää hyvin, jotta voidaan tulkita kiihdytetyn rasitteen tuloksia. Annetun tuotteen rasitteen ja vioittumisvälin suhde määräytyy vioittumismekanismin aktivointienergialla, joka on vallitseva siinä tuotteessa. Aktivointienergia määräytyy laajoista kiihdytetyistä rasite testeistä, joita yleensä tehdään sen aikaa, kun ensimmäisen kerran vikamekanismi havaitaan.

3.1 Kvantitatiivinen kiihdytetty elinikätesti

Tuotteiden, komponenttien ja kokoonpanojen odotetaan toimivan onnistuneesti pitkän ajanjakson, esimerkiksi kymmeniä vuosia. Jotta yritys pystyisi säilyttämään kilpailukykynsä, vioittumistietojen saamiseen käytettävän ajan on oltava huomattavasti pienempi kuin tuotteen odotettu elinikä. (Accelerated Life Testing Reference 2001.)

Kaksi kiihdytysmenetelmää, käyttötason kiihdytys ja yllärasitettu kiihdytys on keksitty, jotta saataisiin vioittumistietoa kiihdytetystä testistä. Laitteille, joille käyttöastekiihdytysmenetelmä on epäkäytännöllinen, voidaan lisätä rasiustasoja, jotka ylittävät tuotteen normaalisti kohtaamat käyttöolosuhteet ja käyttää tällä tavoin saavutettuja vioittumistietoja vastaamaan normaaleja käyttöolosuhteita. Tätä kutsutaan yllärasitetuksi kiihdytykseksi. (Accelerated Life Testing Reference 2001.)

3.2 Käyttötason kiihdytys

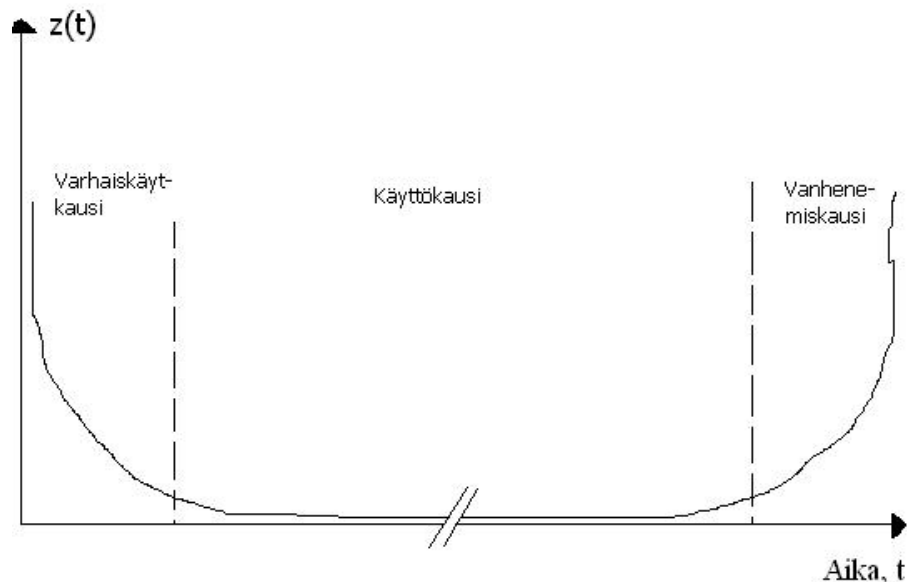
Jos laitteet, jotka eivät ole normaaleissa olosuhteissa käytössä jatkuvasti, testataan jatkuvalla ”toiminnolla”, viat tulevat esille aikaisemmin kuin jos testaus tapahtuisi normaalissa käytössä. Esimerkiksi mikroaaltouunia käytetään pieniä ajanjaksoja päivässä. Mikroaaltouunia voidaan testata käyttämällä sitä useammin vian saavuttamiseksi. Samaa voi sanoa pesukoneista. Jos oletetaan pesukoneen käyttöasteen olevan keskimäärin kuusi tuntia viikossa, voidaan kuvitella testausajan pienentyvän 28-kertaisesti testaamalla pesukoneita jatkuvasti. Kun testaaja luo testejä, hänen pitäisi ottaa huomioon myös muut rasitteet ja toisarvoiset seuraamukset, joita voi ilmetä laitteen käynnistyksen ja sammutuksen yhteydessä, tai ylikuormeneminen jatkuvan käytön aikana. Käyttöasteen kiihdytyksen rajoittuvuus kasvaa, kun tuotteet, esimerkiksi tietokoneserverit ja oheislaitteet, ovat usein tai jopa jatkuvasti käytössä. Tällaisissa tapauksissa käyttöasteen kiihdytys ei ole käyttökelpoinen vaihtoehto. Tällöin testaajan on stimuloitava tuotteen virhe tavallisesti sovelletun rasitteen avulla. Tätä menetelmää kutsutaan ylikuormitetuksi kiihdytykseksi. (Accelerated Life Testing Reference 2001.)

3.3 Ylikuormitettu kiihdytys

Tuotteille, joiden käyttöaste on korkea tai jatkuva, täytyy testaajan stimuloida tuotteen virhe elinikätestillä. Tämä toteutetaan lisäämällä rasitteita, jotka ylittävät tuotteen normaaleissa olosuhteissa kohtaamat rasitteet. Näissä olosuhteissa saavutettuja vioittumistietoja muokataan vastaamaan käyttöolosuhteita. Testin toteuttamiseen voidaan käyttää mm. korkeaa tai matalaa lämpötilaa, kosteutta, jännitettä, painetta ja tärinää, jotta saadaan kiihdytettyä tai stimuloitua virhemekanismia. Myös useampia rasitteita voidaan käyttää testauksessa yhtä aikaa. (Accelerated Life Testing Reference 2001.)

4 VIKATAAJUUS

Kenttäolosuhteissa viat eivät yleensä ilmesty vakionopeudella, mutta seuraavat kuitenkin aikajakaumaa, jota yleisesti kutsutaan ”kylpyammekäyräksi” (Bathtub Curve). Kylpyammekäyrä (KUVIO 1) kuvaa, kuinka komponentin tai laitteen vikataajuus $z(t)$ muuttuu ajan funktiona. Laitteen ikä voidaan jakaa kolmeen alueeseen: varhaiskäyttökausi, jossa vioittumisaste progressiivisesti paranee; käyttökausi, jossa vioittumisaste pysyy vakiona; ja vanhenemiskausi, jossa vioittumisaste alkaa kasvaa. (Quality & Reliability Concepts 2003.)



KUVIO 1. Vikataajuuden ”kylpyammekäyrä”

4.1 Varhaiskäyttökausi

Asiakkaiden tyytyväisyyden kannalta varhaiskäyttökautta on mahdoton hyväksyä. Se horjuttaa asiakkaiden luottamusta. Vikataajuus on tällä ajanjaksolla korkea suunnittelu- ja valmistusvirheiden vuoksi. Tämän takia välttyäkseen varhaiskäyttökauden ongelmilta täytyy laitevalmistajien löytää keinoja ongelmien välttämiseksi. Tarkoituksenmukainen spesifointi, sopiva suunnittelutoleranssi ja riittävä

komponenttien määrittelyt voivat auttaa, mutta jopa tarkin suunnittelu voi epäonnistua, eikä laitetta pystytä suojaamaan kaikilta komponenttien vuorovaikutuksilta käytössä. (Speaks 2001, 3 – 4.)

4.2 Käyttökausi

Varhaiskäyttökauden jälkeen seuraa varsinainen käyttökausi, jolloin esiintyy vain satunnaisia vikoja. Vikataajuus pysyy vakiona ja alhaisena. Käyttökausi voi kestää hyvinkin pitkään. Kesto riippuu kyseessä olevasta laitteesta tai komponentista. Käyttökausi määrää laitteen todellisen luotettavuuden kentällä. (Speaks 2001, 4.)

4.3 Vanhenemiskausi

Vanhenemiskaudella vikataajuus kasvaa, mikä on seurausta komponenttien loppuun kulumisesta. Kaikilla komponenteilla ei vanhenemiskautta vielä tunneta, mikä johtuu nykypäivän teknologian nopeasta kehityksestä, uusia komponentteja kehitellään jatkuvasti ja laitteet korvataan uusilla, ennen kuin niissä alkaa näkyä selvää vikataajuuden kasvua. (Speaks 2001, 4.)

5 YLEISIMMÄT VIOITTUMISMALLIT

5.1 Arrhenius

Yksi tunnetuimmista suureista vanhennuksen yhteydessä on varmasti lämpötila, jota käytetäänkin yleisesti. Lämpötilan vaikutukset tunnetaan parhaiten, ja tulokset ovat hyviä ja luotettavia. Olosuhteet on yleisesti aika helppoja järjestää haluttunlaisiksi, jos muuttuvana suureena on pelkästään lämpötila. Täytyy kuitenkin muistaa, että lämpötilaa ei voi korottaa rajattomasti. Elektroniset komponentit ovat hyvin herkkiä varsinkin suurille lämpötiloille. Myös muita ongelmia voi lämpötilan korottamisen yhteydessä esiintyä.

Arrheniuksen lain esitti ensimmäistä kertaa saksalainen kemisti J. H. van't Hoff vuonna 1884; viisi vuotta myöhemmin, ruotsalainen kemisti Svante Arrhenius mahdollisti fysikaalisen perusteen ja tulkinnan laille. Kun ainoastaan lämpötilaa lisätään, voidaan Arrheniuksen laskentamalli kirjoittaa seuraavanlaiseen muotoon (Tobias & Trindade 1998, 182):

$$[1] \quad A_f = e^{\left[\left(\frac{E_a}{k} \right) \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t} \right) \right]}$$

jossa AF = kiihdytyskerroin

Ea = aktivointienergia

k = Boltzmannin vakio ($8,6159 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$)

Tu = käyttölämpötila (K)

Tt = testauslämpötila (K)

Kun aktivointienergia (5.1.2. Aktivointienergia) on tiedossa, voidaan laskea kiihdytyskerroin minkä tahansa kahden lämpötilan välillä. Konvertoidusti, jos tiedetään kiihdytyskerroin, voidaan laskea aktivointienergia seuraavan yhtälön avulla (Tobias & Trindade 1998, 182):

$$[2] \quad \Delta H = \frac{k \ln(A_f)}{\left(\frac{1}{T_1}\right) - \left(\frac{1}{T_2}\right)}$$

On hyödyllistä tarkastella kiihtyvyysskertoimia, kun muuttujina ovat lämpötilat (T_1 ja T_2) ja aktivointienergia (ΔH) (LIITE 1). Tobias ja Trindade (1998, 183) esittävät kiihtyvyysskertoimia kahdella eri aktivointienergian arvolla [$\Delta H=0,5$ (1,0)]. Tästä voidaan myös huomata kuinka suuri vaikutus aktivointienergian arvolla on lopputulokseen (Tobias & Trindade 1998, 182).

Kun yhdistetään lämpötilakertoimet (LIITE 2) kiihdytyskertoimia (LIITE 3) esittävään kuvaan, on mahdollista vertailla kiihtyvyysskertoimia eri aktivointienergioiden tasolla. Ensiksi käyttö- ja testauslämpötiloja (T_u , T_t) käytetään saadaksesen selville lämpötilakertoimen (TF) arvo (Tobias & Trindade 1998, 182) (LIITE 2).

$$[3] \quad TF = \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t}\right) \cdot \frac{1}{k}$$

Seuraavaksi lämpötilakertoimen (TF) arvoa ja sopivaa aktivointienergiaa käytetään kuvaajaan (LIITE 3) saadaksesen selville kiihdytyskerroin. Kiihdytyskerroin voidaan laskea myös kaavasta (Tobias & Trindade 1998, 182):

$$[4] \quad AF = e^{\Delta H(TF)}$$

Arrheniuksen elinikä-rasite malli on muotoiltu olettaen, että elinikä on suhteessa käänteiseen vastavaikutuksen prosessin tasoon. Täten Arrheniuksen elinikä-rasite suhde on kirjoitettu muotoon (Accelerated Life Testing Reference 2001):

$$[5] \quad L(V) = Ce^{\frac{B}{V}}$$

jossa L edustaa määrällistä eliniän mittaa, niin kuin keskimääräistä elinikää, tunnusomaista elinikää, jne.

V edustaa rasitteen tasoa (lämpötila arvot absoluuttisina arvoina (Kelvin))

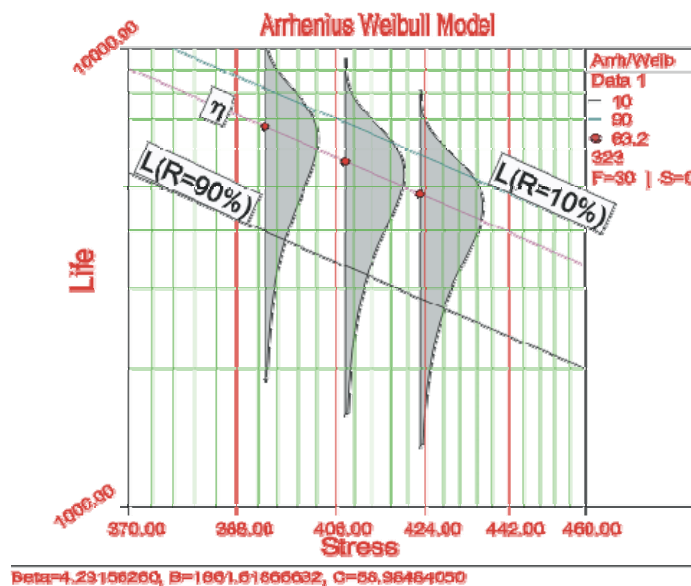
C on yksi mallin parametreista, joka täytyy ratkaista ($C > 0$)

B on toinen parametri, joka täytyy ratkaista

Koska Arrheniuksen malli on fysiikkaan perustuva malli lämpötilan riippuvuudesta, on suositeltavaa, että mallia käytetään lämpötilakiihdytystesteihin. Samasta syystä lämpötila arvot täytyy olla absoluuttisia arvoja (Kelvin). (Accelerated Life Testing Reference 2001.)

Arrheniuksen suhde voidaan linearisoida ja piirtää elinikä-rasitteen funktiona (KUVIO 2). Suhde linearisoidaan ottamalla luonnollinen logaritmi molemmilta puolilta yhtälöstä [5], joka kirjoitetaan muotoon (Accelerated Life Testing Reference 2001):

$$[6] \quad \ln(L(V)) = \ln(C) + \frac{B}{V}$$



KUVIO 2. Arrheniuksen kuvaaja Weibullin elinikäjakaumasta (Accelerated Life Testing Reference 2001)

5.1.1 Esimerkki Arrheniuksen laskentamallista

Lasketaan, kuinka kauan laitteita pitää ”vanhentaa”, jotta se vastaisi 5 vuoden käyttöä normaaliolosuhteissa. Oletetaan että normaali käyttölämpötila on 40 °C ja testauslämpötila 80 °C. Aktivointienergia on yleensä 0,35 ja 1,8:n välissä. Valitaan tähän esimerkkiin aktivointienergiaksi 1,0 eV. Sijoittamalla nämä arvot yhtälöön [1] saadaan laskettua kiihdytyskerroin.

$$A_f = e^{\left[\left(\frac{1,0 \text{ eV}}{8,6159 \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{°K}}} \right) \left(\frac{1}{(40+273) \text{°K}} - \frac{1}{(80+273) \text{°K}} \right) \right]} = 66,8$$

Kun testin pitäisi vastata viiden vuoden käyttöä (43800 tuntia), niin kiihdytetyn testin, jossa lämpötila on nostettu normaaleista olosuhteista 80 °C:seen, täytyy kestää

$$t_i = \frac{43800h}{66,8} = 655h = 27 \text{ päivää}$$

5.1.2 Aktivointienergia

Aktivointienergia on energiaa, joka tarvitaan molekyylin osallistumiseen reaktioon. Toisin sanoen aktivointienergia mittaa lämpötilan vaikutusta/seurausta reaktiossa.

Laitteen elinikää ennustaessa tarvitaan tietoa laitteen aktivointienergiasta. Pienikin muutos aktivointienergian arvoon vaikuttaa paljon laitteen eliniän arvioimiseen. Aktivointienergia voidaan laskea laitteelle tehdyn elinikätestin avulla. (Muuronen 2003.)

Esimerkki

Tuotetta testattaessa havaittiin, että sen toiminta loppui 310 tunnin kuluttua lämpötilan ollessa 150 °C. Testattaessa 125 °C:lla tuote kesti 1000 tuntia ja 100 °C:lla testattaessa tuote kesti 4000 tuntia.

Asetetaan testeistä saadut tulokset:

$$L_{150} = 310 \text{ tuntia } 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$L_{125} = 1000 \text{ tuntia } 125 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$L_{100} = 4000 \text{ tuntia } 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Testeistä saatujen tulosten perusteella voidaan päätellä laitteen aktivoitumisenergia. Aktivoitumisenergiaa (E_a) laskettaessa käytetään seuraavaa yhtälöä (Muuronen 2003):

$$[7] \quad \ln \cdot \frac{L_2}{L_1} = \left[\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right]$$

$$[8] \quad E_a = \frac{k \left(\ln \cdot \frac{L_{100}}{L_{150}} \right)}{\left(\frac{1}{T_{100}} - \frac{1}{T_{150}} \right)}$$

Tämän jälkeen asetetaan testeistä saadut arvot oikeille paikoille:

$$E_a = \frac{8,6159 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\ln \cdot \frac{4000}{310} \right)}{\left(\frac{1}{273+100} - \frac{1}{273+150} \right)}$$

$$E_a = 0,70(eA)$$

Yleisimmin hyväksytyt aktivointienergiat on esitetty LIITEESSÄ 4 (General Reliability Considerations 1987, 5/14).

5.2 Eyring

Arrheniuksen malli on empiirinen yhtälö, jonka käyttöä on perusteltu sen toimivuudella monissa tapauksissa. Kuitenkin sen puutteena on teoreettinen johtaminen ja kyky mallintaa kiihtyvyyttä, kun on käytössä muitakin rasitteita lämpötilan lisäksi. (Meeker & Escobar 1998, 473.)

Eyringin laskentamalli tarjoaa yleisen ratkaisun ongelmaan, kun halutaan lisätä rasitteita. Sen vahvuutena on myöskin kemialliseen reaktioon perustuva teoreettinen johtamisteoria. Tässä johtamisessa, joka perustuu Eyringin töihin, parametri ΔH :lla on fyysinen tarkoitus. Se edustaa energian määrää, joka tarvitaan elektronin siirtämiseen paikkaan, jossa kemiallisen reaktion prosessi tai diffuusio ovat mahdollisia. (Tobias & Trindade 1998, 191.)

Täytyy huomioida, että yleinen Eyringin laskentamalli sisältää termit, joissa on rasitteen ja lämpötilan vuorovaikutus (toisin sanoen lämpötilan muutoksen vaikutukset riippuvat muiden rasitteiden tasosta). Useimmat käytetyt laskentamallit eivät sisällä vuorovaikutteisia termejä, niin että suhteellinen muutos kiihtyvyyksikertoimissa, kun vain yksi rasite muuttuu, ei riipu toisten rasitteiden tasoista.

Malleissa, joissa ei ole vuorovaikutusta, voi laskea kiihtyvyyksikertoimet jokaisella rasitteelle erikseen ja kertoa ne sitten yhteen. Tämä ei päde, jos mekanismit vaativat vuorovaikutteisia termejä, mutta ainakin se näyttää toimivan enimpiin esimerkkeihin kirjallisuudessa.

Eyringin laskentamallin yhtälö lämpötilalle ja toiselle rasitteelle kirjoitetaan seuraavasti (Tobias & Trindade 1998, 191):

$$[10] \quad T_{50} = \left[AT^\alpha e^{\frac{\Delta H}{kT}} \right] \left[e^{\left(\frac{B+C}{T}\right)S} \right]$$

jossa S voi olla jännitteen tai virran tai minkä tahansa muun olennaisen rasitteen toiminto ja parametrit α , ΔH , B C määräävät kiihtyvyyden rasitteiden yhdistelmien välissä. Niin kuin Arrheniuksen mallissakin, k on Boltzmannin vakio ja lämpötila Kelvineissä.

Ensimmäisissä suluissa on lämpötilan termi, kun taas toiset sulut sisältävät yleisen muodon minkä tahansa muun rasitteen lisäämiseksi.

Kun halutaan lisätä uusi ”non-thermal” rasitetermin, yhtälö kirjoitetaan seuraavaan muotoon (Tobias & Trindade 1998, 191):

$$[11] \quad T = AT^\alpha e^{\left\{ \frac{\Delta H}{kT} + \left(B + \frac{C}{T} \right) S_1 + \left(D + \frac{E}{T} \right) S_2 \right\}}$$

Yhtälöön voidaan lisätä muita tarpeellisia rasitteita vain lisäämällä samanlaisia termejä.

5.2.1 Eyringin laskentamallin hyödyt

Seuraavaksi on esitetty joitakin Eyringin laskentamallin etuja muihin laskentamalleihin verrattuna.

- Pystytään käyttämään monia rasitteita.
- ΔH parametrilla on fyysinen tarkoitus ja se on laskettu monilla tunnetuilla vikamekanismeilla ja materiaaleilla. (e-Handbook of Statistical Methods 2003.)

5.2.2 Eyringin laskentamallin haitat

Eyringin laskentamalli tuo mukanaan myös erinäköisiä haittoja verrattuna muihin laskentamalleihin.

- Jo kahdella rasitteella on viisi tuntematonta parametria, jokainen lisätty rasite lisää kaksi tuntematonta parametria.
- Monet parametrit saattavat vaikuttaa vain toissijaisesti. Esimerkiksi $\alpha=0$ toimii melko hyvin, koska näin ollen lämpötilatermistä tulee samanlainen kuin Arrheniuksen laskentamallissa.
- Muotoa, jossa toiset rasitteet esiintyvät, ei ole eritelty yleisessä mallissa, ja rasitteet voivat muuttua tietyn vioittumismekanismien mukaan. Toisin sanoen S voi olla jännite tai \ln (jännite) tai jokin muu jännitteen funktio.
- (e-Handbook of Statistical Methods 2003.)

5.3 Lämpötilan ja kosteuden vaikutukset

Kun halutaan selvittää lämpötilan ja kosteuden vaikutuksia laitteiden elinikään, käytetään usein kiihdytyskertoimen laskemiseen seuraavaa yhtälöä (Livingston 2000, 4):

$$[12] \quad A_f = \left(\frac{RH_t}{RH_u} \right)^3 \cdot e^{\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t} \right) \right]}$$

missä A_f = kiihdytyskerroin

RH_u = käyttöympäristön suhteellinen kosteus

RH_t = testausympäristön suhteellinen kosteus

E_a = aktivointienergia

k = Boltzmanin vakio ($8,6159 \cdot 10^{-5}$ eV/K)

T_u = käyttöympäristön lämpötila (K)

T_t = testausympäristön lämpötila (K)

5.3.1 Esimerkki kosteuden ja lämpötilan vaikutuksista

Oletetaan samanlaisen esimerkin kuin Arrheniuksen laskentamallin kohdalla (kts. 5.1.1.), niin voidaan verrata, kuinka paljon kosteuden lisäys vaikuttaa kiihdytyskertoimeen.

Käyttölämpötilaksi oletetaan $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ja testauslämpötilaksi $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ja käyttöympäristön kosteuden oletetaan olevan 50 % suhteellista kosteutta sekä testausympäristön suhteellinen kosteus 85 %. Aktivointienergian arvona käytetään samaa lukua eli 1,0 eV. Nämä arvot sijoittamalla kaavaan [12] saadaan kiihdytyskertoimeksi:

$$A_f = \left(\frac{85}{50} \right)^3 e^{\left[\frac{1,0\text{eV}}{8,6159 \cdot 10^{-5}} \left(\frac{1}{(40+273)\text{K}} - \frac{1}{(80+273)\text{K}} \right) \right]} = 125,9$$

Viiden vuoden käyttöä (43800 h) vastaavan kiihdytetyn testin pitäisi kestää

$$t = \frac{T}{A_f} = \frac{43800h}{125,9} = 347,9h = 14\text{päivää}$$

Kun verrataan tulosta pelkällä lämpötilalla kiihdytettyyn tulokseen (kts. 5.1.1.), huomaamme, että kosteuden vaikutuksesta tarvittava testausaika laskee melkein puolella.

5.3.2 Peck-laskentamalli

Peck-laskentamalli erottelee lämpötilan ja kosteuden vaikutukset ja olettaa normaaleiksi lämpötilan ja kosteuden rasiiteeksi 85 °C ja 85 % RH. Näitä kertoimia käyttämällä saadaan selville kokonaiskiihdytyskerroin. Seuraava yhtälö kuvaa ko-
mallia (Livingston 2000, 4):

$$[13] \quad A_f = e^{\left[\left(\frac{E_a}{k} \right) \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_r} \right) \left(\frac{RHO}{RH} \right)^n \right]}$$

T_u ja RHO ovat lämpötilan ja kosteuden viitearvoja, ja tässä mallissa $n = 4,5$

Kun käytetään lämpötila-kosteuden suhdetta, molempien lämpötilan ja kosteuden vaikutus elinikään on haettava. Tämän takia testi täytyy suorittaa yhdistetyllä tavalla kahden erilaisen rasiitetason välillä, kahdella eri rasiitetyypillä.

Esimerkiksi oletetaan, että kiihdytystesti suoritetaan kahdella lämpötilan ja kahdella kosteuden tasolla. Kaksi lämpötilan tasoa, jotka valitaan, ovat 300 K ja 343 K. Kaksi valittua kosteuden tasoa ovat 0.6 ja 0.8. Olisi väärin suorittaa testi arvoilla 300 K, 0.6 ja 343 K, 0.8. Jos niin tehtäisiin, ei saataisi tietoa lämpötila-kosteuden vaikutuksista elinikään. Tämä johtuu siitä, että molemmat rasiitukset kasvavat samanaikaisesti ja siksi ei tiedetä, kumpi rasiitus aiheuttaa kiihtyvyyttä elinikään. Mahdollinen yhdistelmä, joka antaisi tietoa lämpötila-kosteuden vaikutuksista elinikään, olisi (300 K, 0.6), (300 K, 0.8) ja (343 K, 0.8). On selvää, että

testaamalla arvoilla (300 K, 0.6) ja (300 K, 0.8), kosteuden vaikutus elinikään saadaan selville, koska lämpötila pysyy muuttumattomana. Samalla tavalla lämpötilan vaikutukset saadaan selville testaamalla arvoilla (300 K, 0.8) ja (343 K, 0.8), kosteus pysyy muuttumattomana. (Accelerated Life Testing Reference 2001.)

THB (eng. The Temperature Humidity Bias) eli lämpötila-kosteuden vaikutustestejä käytetään kosteuden aiheuttamien vikojen, esimerkiksi korroosion mallinnukseen ja testaukseen. Jos verrataan ”korkeasti kiihdytettyihin rasitustesteihin” (HALT), tarvitaan vähemmän korkeita lämpötiloja ja suhteellisen kosteuden tasoa. Testi vaatii laitteita muuttumattomien lämpötilojen, kohoavan suhteellisen kosteuden ja sähkönvaikutuksen läpikäymiseen (muuttumattomuus tai epäsäännöllisyys perustuu laitteen tyyppiin) (Livingston 2000, 2.)

5.4 Muut laskentamallit

5.4.1 (Invertoitu) tehosäätö jännitteelle

Tässä mallissa, jota käytetään kondensaattoreihin, on vain jänniteriippuvuus ja malli saa muodon (e-Handbook of Statistical Methods 2003):

$$[14] \quad t_f = AV^{-\beta}$$

Tämä malli on hyvin yksinkertaistettu laskentamalli, jossa α , ΔH ja C ovat kaikki 0, ja $S = \ln V$ sekä $\beta = -B$

5.4.2 Eksponentiaalinen jännitemalli

Joissakin tapauksissa jänniteriippuvuus on mallinnettu paremmin eksponentiaalisella mallilla (e-Handbook of Statistical Methods 2003):

$$[15] \quad t_f = Ae^{-BV}$$

5.4.3 Kahden lämpötilan/jännitteen malli

Lämpötila/jännitemallit ovat samankaltaisia ja saavat jommankumman alla olevista muodoista (e-Handbook of Statistical Methods 2003):

$$[16] \quad t_f = A e^{\frac{\Delta H}{kT}} V^{-\beta},$$

$$[17] \quad t_f = A e^{\frac{\Delta H}{kT}} e^{-BV}$$

Nämäkin mallit ovat vain yksinkertaistettuja Eyringin kahden rasiitteen mallista, jossa on sopivat vakiot ja jännitteen toiminnot.

5.4.4 Jännitteen kiihdytyskerroin

Kiihdytystä jännitteen avulla käytetään vain vikamekanismeille, jotka tiedetään kiihtyneen jännitteen avulla. Yleinen jännitekiihtyvyyssmalli on julkaistu muodossa (e-Handbook of Statistical Methods 2003):

$$[18] \quad AFV = e^{Z \cdot (V_s - V_n)}$$

missä AFV = jännitteen kiihtyvyysskerroin

V_s = rasitusjännite (V)

V_n = nimellisjännite (V)

Z = jännitteen kiihtyvyyssvakio (yleensä $0.5 < Z < 1.0$)

5.4.5 Kolmen rasiitteen malli

Kosteudella on tärkeä merkitys monissa vikamekanismeissa, jotka ovat riippuvaisia korroosiosta tai ionien liikkeistä. Yleinen kolmen rasiitteen malli saa muodon (e-Handbook of Statistical Methods 2003):

$$[19] \quad t_f = A e^{\frac{\Delta H}{kT}} V^{-\beta} RH^{-r}$$

Tässä RH on suhteellinen kosteus prosentteina. Toinen ilmeinen variaatio tässä mallissa olisi käyttämällä eksponentiaalista jännitteen termiä ja eksponentiaalista RH termiä.

Tässäkin yksinkertaisessa Eyringin kolmen rasitteen mallissa on neljä tuntematonta parametria ja tarvitaan laaja kokeellinen järjestely, jotta saadaan sopiva malli ja voidaan laskea kiihdytyskertoimet.

5.4.6 Coffin-Manson

Mekaanisen vioittumisen tai materiaalin väsymisen laskentamallit eivät ole Eyringin mallin eri muotoja. Yleensä nämä mallit sisältävät rasitteen sykklauksia, käyttötaajuuksia tai lämpötilan vaihteluita. Tämänkaltainen malli tunnetaan nimellä Coffin-Manson mallina, jota on käytetty onnistuneesti mallinnettaessa juotteen haurastumista ja muissa malleissa, joissa käytetään toistuvia lämpötilan sykklauksia samalla kun laite kytketään päälle ja pois päältä. Tämä malli saa muodon (e-Handbook of Statistical Methods 2003):

$$[20] \quad Af = \left[\frac{\Delta T_l}{\Delta T_f} \right]^{1,9} \left(\frac{f_f}{f_l} \right)^{\frac{1}{3}} e^{\left(1414 \left\{ \frac{1}{T_{\max f}} - \frac{1}{T_{\max l}} \right\} \right)}$$

missä: Af = laskettu kiihdytys kerroin

ΔT = lämpötilaerot välillä T_{on} ja T_{off} (°K)

T_{\max} = maksimi juotteen liitoslämpötila (°K)

f = syklaustaajuus

f ja l kuvaavat kenttä- (f = eng. field) ja laboratorio-olosuhteita

(l = eng. lab).

Loppuosa tästä yhtälöstä $e^{\left(1414 \left\{ \frac{1}{T_{\max f}} - \frac{1}{T_{\max l}} \right\} \right)}$ on tuttu jo Arrheniuksen laskentamallista.

6 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia erilaisia mahdollisuuksia suorittaa kiihdytettyjä elinikätestejä. Työ esittääkin erilaisia laskentamalleja, joista saadaan kiihdytyskertoimet, ja niiden avulla pystytään laskemaan aika, joka tarvitaan kiihdytettyyn elinikätestiin.

Teknoware Oy:ssä on erityisen tärkeää, että suoritetaan elinikätestejä ns. vanhennus testejä, koska yrityksen tuotteet joutuvat asiakkailta hyvin vaativiin olosuhteisiin. Opinnäytetyöni antaa viitteitä siitä, minkälaisia mahdollisuuksia on tehostaa vanhennustapahtumia. On myös ensisijaisen tärkeää selvittää kustannukset, joita uudet menetelmät tuovat tullessaan esim. laitteistojen osalta.

Koska pelkkää lämpötilaa nostamalla vanhennusprojektissa, testausajat ovat liian pitkiä, pyritäänkin Teknoware Oy:ssä lanseeraamaan, erään yrityksen asiakkaan pyynnöstä, uutta menetelmää lämpösyklauksen osalta. Teknoware Oy:öön on rakennettu testauskaappi, jossa on kaksi erillistä tilaa: kylmätila (-25 C) ja lämmintila (+60 C), joista aina yhden ajanjakson (syklin) jälkeen siirretään tuotteet kylmästä kuumaan ja kuumasta kylmään. Soveltamalla Coffin-Manson kaavaa (5.4.6. Coffin-Manson) pystytään laskemaan testausaika. Em. uusi testausmenetelmä on antanut jo hyviä tuloksia, mutta pienentämällä vielä siirtymisaikaa, kylmästä kuumaan ja päinvastoin, saavutetaan varmasti vielä parempia tuloksia.

LÄHTEET

Accelerated Life Testing Reference [verkkodokumentti]. 2001 [viitattu 13.3.2006]. Saatavissa <http://www.weibull.com/acceltestwebcontents.htm>

e-Handbook of Statistical Methods [verkkodokumentti]. 2003 [viitattu 1.6.2006]. Saatavissa <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook>

Livingston, H. SSB-1: Guidelines Using Plastic Encapsulated Microcircuits and Semiconductors in Military, Aerospace and Other Rugged Applications [verkkodokumentti]. 2000 [viitattu 8.4.2006]. Saatavilla: <http://smaplab.ri.uah.edu/dsms2k/papers/livingston.pdf>

Quality & Reliability Concepts [verkkodokumentti]. 2003 [viitattu 7.4.2006]. Saatavissa <http://www.hifn.com/info/quality/Concepts.html>

Speaks, S. Reliability and MTBF Overview [verkkodokumentti]. 2001 [viitattu 7.4.2006]. Saatavissa http://www.vicr.com/documents/quality/Rel_MTBF.pdf

General Reliability Considerations 1987.

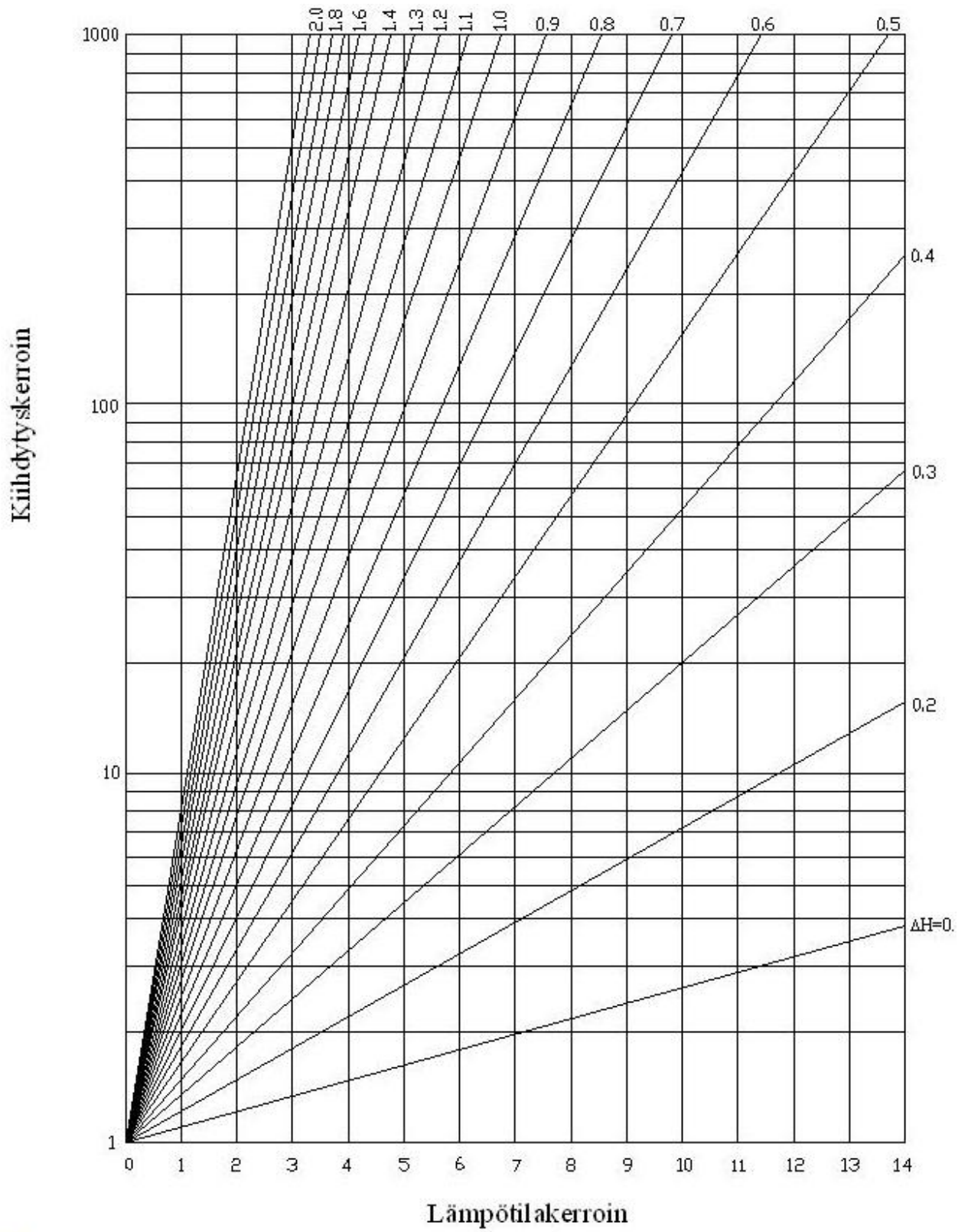
Meeker, W. & Escobar, L. 1998. Statistical Methods for Reliability Data. John Wiley & Sons, Inc, USA.

Muuronen, J. 2003. Vanhennustestaus elektroniikan laitteille. Elektroniikan insinööriyö. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu.

Tobias, P. & Trindade, D. 1998. Applied Reliability. 2. uudistettu painos. CRC, New York.

LIITTEET

LIITE 1	Kiihtyvyyuskertoimia kahdella eri aktivointienergia arvolla
LIITE 2	Lämpötilakertoimia
LIITE 3	Kiihdytyskertoimia
LIITE 4	Yleisimpiä aktivointienergioita



Failure Mechanisms in Silicon Semiconductor Devices

Device Association	Process	Relevant Factors	Accelerating Factors	Acceleration (Ea = Activation Energy)
SiO ₂ and Silicon-SiO ₂ Interface	Surface Charge Accumulation	Mobile Ions, V, T, Q _m	T	1,0 eV
	Dielectric Breakdown (TDDDB)	E, T	E(T)	0,35 eV
	Charge	E, T, Q _{it}	E, T	1,3 eV
	Hot Carrier Trapping	E, T, Q _{ot}	E, T	-0,06 eV
Metallization	Electromigration of Al	T, j, A Gradients of T and j, Grain Size	T, j	0,5 eV j ⁿ n=2±10%
	Electromigration of Si in Al	T, j, A	T, j	0,9 eV
	Corrosion	Contamination, Humidity (H) V, T	H, V, T	Strong H Effect 0,9 eV
Bonds and Other Mechanical Interfaces	Contact Degradation	T, Metals, Impurities	Varied	1,8 eV
	Intermetallic Growth	T, Impurities, Bond Strength	T	Al-Au: 1,0 eV
Hermeticity	Fatigue	Temperature Cycling, Bond Strength	T Extremes in Cycling	
	Seal Leaks	Pressure Differential, Temp. Cycling	Pressure, ΔT	

H = Humidity

V = Voltage

E = Electric Field

A = Area

Q = Oxide Charge

T = Temperature

j = Current Density