Tampereen yliopisto

Elmeri Kivipato

LUOTETTAVUUSKOKEET ELEKTRONIIKASSA

Nopeutetun rasitustestauksen sekä yhdistetyn ja nopeutetun rasitustestauksen vertailu

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Katja Laine
Toukokuu 2024

TIIVISTELMÄ

Elmeri Kivipato: Luotettavuuskokeet elektroniikassa, nopeutetun rasitustestauksen sekä yhdistetyn ja nopeutetun rasitustestauksen vertailu
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Toukokuu 2024

Rasituskokeet ovat kokeita, joita suoritetaan laitteille, jotta saadaan selville laitteiden toimintavarmuus niille tarkoitetussa toimintaympäristössä. Kokeissa laite altistetaan tutkittavalle rasitteelle ja pyritään määrittämään laitteen kestävyys rasitetta kohtaan. Toisin sanoen laitteen kestävyys rasitteita kohtaan on sen luotettavuus.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan tarkemmin yhdistetyn ja nopeutetun rasitustestauksen sekä nopeutetun rasitustestauksen ominaisuuksia ja toimintaa kirjallisuuskatsauksena. Tarkoituksena on kertoa kummankin kokeen perusteet ja niiden tavoitteet. Työn lopussa vertaillaan näitä kokeita keskenään ja pyritään selvittämään kumpi kokeista on parempi mihinkin tilanteeseen.

Rasituskokeita käytetään kaikkialla tuotannossa, mutta tämä opinnäytetyö perehtyy niiden käyttöön elektroniikassa. Perusideana rasituskokeissa on altistaa laite rasitteelle ja analysoida rasitteen vaikutuksia laitteessa. Nämä rasitteet voivat olla miltei mitä vaan rasitteita, kuten kosteutta, suurta jännitettä, korkeaa lämpötilaa tai mekaanista rasitetta.

Yhdistetty ja nopeutettu rasitustestaus perehtyy useamman rasitteen yhdistelmän kokonaisvaikutukseen laitteessa. Tässä kokeessa laitteen kestävyyttä seurataan ääriolosuhteissa, missä se altistetaan useammalle kuin yhdelle rasitteelle samanaikaisesti. Tämä koetyyppi on hyvin luotettava tapa mallintaa laitteen kestävyyttä sen normaalissa käyttöympäristössä. Kokeella saadaan selville tietoa laitteen kestävyydestä sen oletetussa toimintaympäristössä.

Nopeutetussa rasitustestauksessa laite altistetaan korroosiota nopeuttaville rasitteille kuten suurelle ilmankosteudelle ja lämpötilalle. Tietyissä kokeissa laite altistetaan myös nopealle lämpötilanvaihtelulle tai muulle rasitteelle mitä se tulee kokemaan sen toimintaympäristössä. Tämän koetyypin tarkoituksena on ilmiantaa laitteen ”heikoin lenkki”, eli osa laitetta, mikä hajoaa ensimmäisenä. Tämä koetyyppi on hyvin käytännöllinen laitetta suunnitellessa tai sen elinkaaren alussa.

Rasituskokeiden merkitys laitteille ja niiden kehitykselle on huomattava. Jos laitteita ei altistettaisi kokeissa ollenkaan rasitteille, ei niiden toimintavarmuudesta voitasi saada luotettavaa kuvaa. Varsinkin elektronisten laitteiden testaaminen ennen markkinoille tuontia on hyvin suotavaa, sillä niiden vikaantumisesta voi koitua suuria vahinkoja ja pahimmassa tapauksessa laitteesta voi tulla hengelle vaarallinen. On siis tärkeä, että laitteille tehdään kokeita ja määritellään tarkasti, kuinka kauan ne kestävät ja mitä rasitetta.

Avainsanat: Rasituskoe, yhdistetty ja nopeutettu rasituskoe, nopeutettu rasituskoe

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 4
2. LUOTETTAVUUS ELEKTRONIIKASSA 6
2.1 Luotettavuuskokeet 6
2.2 Nopeutettu rasituskoe 6
2.2.1 Yhdistetty ja nopeutettu rasitustestaus 7
2.2.2 HAST ja sen variaatiot 10
2.3 Luotettavuuden kuvaajat 11
2.3.1 Kylpyammekäyrä 11
2.3.2 Weibull-jakauma 12
3. C-AST- JA HAST-MENETELMIEN LUOTETTAVUUS 15
3.1 Kustannus- ja aikanäkökulma 16
3.2 Virhetilojen mallinnus ja tunnistaminen 18
3.3 Parempi mallinnustapa laitteen elinkaaren eri vaiheille 19
3.4 C-AST- ja HAST-menetelmien rasitustavat ja vaikutus laitteen kestävyyteen 21
4. YHTEENVETO 23
LÄHTEET 25

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AF	Accelerator factor, kiihdytyskerroin
AST	Accelerated stress testing, nopeutettu rasituskoe
bHAST	Biased highly accelerated stress testing, biased erittäin nopeutettu rasituskoe
C-AST	Combined-accelerated stress testing, yhdistetty-nopeutettu rasituskoe
CDF	Cumulative distribution function, kumulatiivinen jakaumafunktio
CTE	Coefficients of thermal expansion, lämpölaajenemiskertoimet
FIT	Failure in time, ajan kuluessa tapahtuva vikaantuminen
FT	Field-testing, normaalin käyttöiän testaus tai kenttätestaus
HAST	Higly accelerated stress testing, erittäin nopeutettu rasituskoe
MAST	Module accelerated stress testing, moduulin nopeutettu rasituskoe
LED	Light-emitting diode, valoa säteilevä diodi
PDF	Probability density function, vikatiheysfunktio
PoF	Probability of failure, vikaantumistodennäköisyys
PV	Photovoltaic, aurinkokennotekniikka
RTC	Rapid thermal cycling, nopea lämpötilan vaihtelu
uHAST	Unbiased higly accelerated stress testing, unbiased erittäin nopeutettu rasituskoe
UV	Ultraviolet, ultravioletti
WD	Weibull distribution, Weibull-jakauma
C	Celsius, lämpötila
c	Kokoparametri
k	Muotoparametri
T	Temperature, lämpötila
t	Time, aika
δ	Paikka-arvoparametri

1. JOHDANTO

Mitä ovat luotettavuuskokeet ja mihin niitä käytetään? Luotettavuuskokeilla tarkoitetaan jonkin tuotteen tai menetelmän luotettavuutta ja kestävyyttä sille tarkoitetussa toimintaympäristössä, kun se tuottaa haluttuja tuloksia. Mitä tapahtuu, kun tämä toimintaympäristö muuttuu tai tuotteen tehoa tai jotain muuta ominaisuutta kasvatetaan tai muutetaan? Onko tuote enää luotettava tai onko sen tuottamat tulokset haluttuja.

Mitä luotettavuudella elektroniikassa tarkoitetaan? Luotettavuuden synonyyminä voidaan käyttää toimintavarmuutta. Käyttäjän näkökulmasta luotettavuus on tuotteen toimimista juuri niin kuin on luvattu, mutta toisaalta arvostetaan myös pitkää käyttöikää. Valmistajan näkökulmastakin on parempi, että tuote pysyy kauan toimintakykyisenä, sillä yleensä elektronisilla laitteilla on pitkätkin takuuajat. Mitkä tekijät vaikuttavat elektronisen tuotteen elinkaareen ja sen pituuteen?

Elektroniset tuotteet altistetaan suurille määrille erilaisia sisäisiä ja ulkoisia rasitustekijöitä niiden elinkaarensa aikana. Jos tuotetta ei testata näiden rasitustekijöiden suhteen ja tuote vikaantuu ennen aikojaan, joudutaan mahdollisiin takuukiistoihin asiakkaiden kanssa. On siis hyvin tärkeää valmistajan näkökulmasta selvittää tuotteen käyttöympäristö ja altistaa se rasitukselle, jota se saattaa kokea käyttöympäristössään elinkaarensa aikana. Näitä kokeita, jossa tuote altistetaan rasitukselle ja ajetaan äärirajoille, kutsutaan luotettavuuskokeiksi. Kokeiden tarkoituksena on selvittää lukuarvoja, kuinka kauan tuote kestää, millaista rasitusta se kestää tai missä olosuhteissa tuote rappeutuu ennenaikaisesti.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää käsitteitä nopeutettu rasituskoe (AST, accelerated stress testing), erittäin nopeutettu rasituskoe (HAST, highly accelerated stress testing) ja yhdistetty ja nopeutettu rasituskoe (C-AST, combined-accelerated stress testing). Tarkoituksena on myös vertailla näitä toisiinsa sekä selvittää tarkemmin, mitä kummallakin käsitteellä tarkoitetaan, ja avata niihin liittyviä käsitteitä. Opinnäytetyössä käsitellään myös menetelmien merkitystä tutkimuksissa ja, miten kokeet suunnitellaan ja toteutetaan. Työssä tarkastellaan myös, mikä tekee luotettavuuskokeista luotettavia ja miten saatuja tuloksia analysoidaan.

Toisessa luvussa selitetään, mitä luotettavuus on elektroniikassa ja mikä on pohjimmainen tavoite luotettavuuskokeilla. Tämän jälkeen esitellään HAST- ja C-AST-menetelmät ja niihin liittyviä käsitteitä.

Luotettavuuskokeisiin tutustumisen jälkeen käydään läpi luvusta 2.3 alkaen kokeista saatujen tulosten analysointimenetelmiä ja muutama useimmiten luotettavuuskokeissa käytetty kuvaaja. Viimeisessä luvussa ennen yhteenvetoa vertaillaan HAST- ja C-AST-menetelmiä aika- ja kustannus-, virhetilojen mallinnus- ja tunnistamisnäkökulmasta, menetelmien kykyä mallintaa laitteen elinkaaren vaihetta ja niiden rasitetapoja ja toivottuja tuloksia.

2. LUOTETTAVUUS ELEKTRONIIKASSA

Elektroniikassa luotettavuudella eri tahoille on erilaisia määritelmiä ja tämäkin määritelmä muuttuu koko ajan. Elektronisten tuotteiden halutaan koko ajan tuottavan enemmän ja parempia tuloksia. Esimerkiksi 2000-luvun alussa olleet tietokoneet eivät pystyisi toimimaan nykymaailmassa ollenkaan riittämättömien toimintavaatimusten takia. Luotettavuudella valmistajalle on useita yhtäläisyyksiä asiakkaan kanssa. Molemmat osapuolet toivovat laitteen täyttävän tarkoituksensa ja kestävän vähintään sille luvatun eliniän ajan. Mutta seuraukset laitteen vikaantuessa ovat hyvin erilaiset asiakkaan ja valmistajan välillä. Laitteen käyttäjälle voi aiheutua harmia tai kustannuksia hajonneesta laitteesta, mutta pahimmissa tapauksissa rikkoutuneet laitteet voivat aiheuttaa jopa henkilövahinkoja. Valmistajalle ennenaikaisesta tuotteen hajoamisesta voi koitua kustannuksia tai asiakkaiden kaikkoamista. On siis hyvin tärkeä varmistua laitteen luotettavuudesta ennen sen julkaisemista.

2.1 Luotettavuuskokeet

Luotettavuutta voidaan käsitellä todennäköisyytenä. Täysin toimivan ja epäluotettavan laitteen välinen ero on vain todennäköisyys, jolla epäluotettava laite vikaantuu [1]. Todennäköisyyttä, jolla laite vikaantuu, kutsutaan laitteen vikaantumistodennäköisyydeksi (PoF, probability of failure). Tämä todennäköisyys ei kuitenkaan voi saavuttaa arvoa 0, sillä mikään laite ei ole täydellinen ja vikaantuu välttämättä jossain vaiheessa. Tälle todennäköisyydelle voidaan erilaisilla menetelmillä määrittää lukuarvoa. Tässä opinnäytetyössä on tarkoituksena vertailla yhdistettyä rasitustestausta ja nopeutettua rasitustestausta ja niiden mahdollisuuksia saada selville laitteiden luotettavuutta niitä käytettäessä. Elektroniikassa ei uusien laitteiden luotettavuuden saavuttamiseen ole muuta mahdollisuutta kuin rakentaa uusi laite, testata laitetta altistamalla sitä rasitukselle ja korjata esiin tulleet virheet. Toistamalla tätä prosessia voidaan viimein saavuttaa luotettava laite. Kyseessä on palauteprosessi, eikä muuta tapaa ole [2].

2.2 Nopeutettu rasituskoe

Tuotteen luotettavuutta selvitettäessä on tärkeä löytää sen heikoin lenkki, sillä tuote on vain niin luotettava kuin sen heikoin lenkki on. Varsinkin elektroniikassa, jos tuotteen yksi komponenteista pettää, on hyvin todennäköistä, että se johtaa koko laitteen vikaantumiseen. Nopeutetun rasitustestauksen, HAST tai AST, ideana on altistaa laite

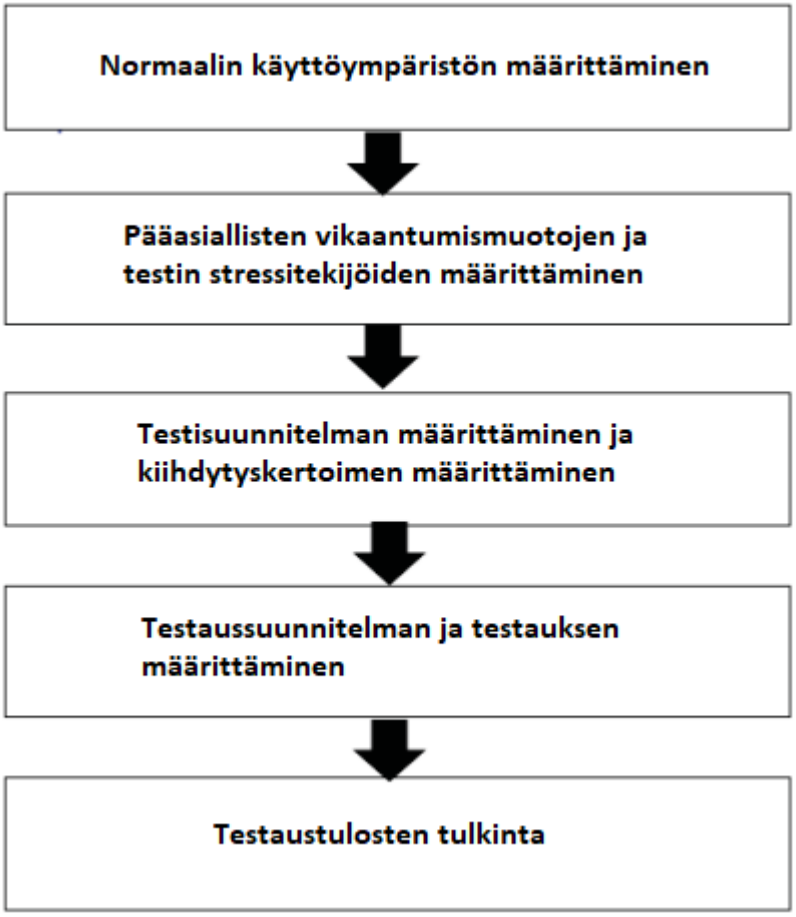
suuremmalle ulkoiselle tai sisäiselle rasitukselle kuin tosimaailmassa se todennäköisesti tulisi ikinä kokemaan. Nopeutetun rasitustestauksen altistusaika on suhteellisen pieni. Laite altistetaan vain hyvin pieneksi aikaa tälle suurelle määrälle rasitetta, jonka jälkeen selvitetään laitteesta komponentteja, jotka pettivät kokeen aikana. Riippuen laitteesta tai laitteen toimintaympäristöstä voidaan eri laitteille tehdä erilaisia kokeita. Jos kyseessä on ulkona toimiva laite, on tärkeä tutkia esimerkiksi sen kestävyyttä eri luonnonilmiötä, kuten kosteutta vastaan. On myös tärkeä tiedostaa, että yksittäisten rasitustekijöiden vaikutusten mittaaminen ei ole välttämättä paras vaihtoehto. Useiden rasitustekijöiden samanaikainen yhdistäminen mahdollistaa vikaantumismuotojen paremman tunnistamisen. Tämä mahdollistaa uuden kyvyn havaita uusia vikaantumismuotoja, joita ei tunneta ennalta [3].

2.2.1 Yhdistetty ja nopeutettu rasitustestaus

Yhdistetyn ja nopeutetun rasitustestauksen (C-AST) ideana on yhdistää useampaa laitteeseen vaikuttavaa rasitustekijää. Näin pystytään simuloimaan paremmin tosimaailman ja laitteen todellisen toimintaympäristön rasitustekijöitä. Yhdistettäviä rasitteita ovat muun muassa UV-säteily (ultraviolet), lämpötila, kosteus, sähkövirta tai ulkoisesti syötetty mekaaninen häiriö. Näitä häiriöitä pyritään syöttämään laitteelle testiympäristössä ennalta määritellyssä aikaikkunassa pikemminkin kuin tasaisessa tilassa [4].

Tilanteissa, joissa pyritään selvittämään laitteen kestävyyttä luonnossa, on hyvä selvittää kriittisimmät kuormitustekijät laitteelle. Viime aikoina yhdistettyä ja nopeutettua rasitustestausta on kehitetty tutkimaan aurinkosähkömoduuleita [5]. Tutkimuksissa tulee ottaa huomioon aurinkosähkömoduulien sijainti, joka suoranaisesti vaikuttaa lämpötilaan ja sen vaihteluun, ilmankosteuteen, UV-säteilyyn ja sademääriin. On kuitenkin hyvin tärkeä simuloidessa rasitusta laitteelle, että selvitetään todelliset luonnon olosuhteet. Rasitustekijöiden tulisi edustaa tosimaailmassa ilmeneviä rasitustekijöitä [3].

Kuten aikaisemmin mainitsin, on hyvin tärkeä selvittää laitteelle kohdistuvat rasitustekijät sekä se, millaisessa ympäristössä laite tulee olemaan. Luotettavien tulosten saamiseksi ja hyvän testiympäristön laatimiseksi on ymmärrettävä laitteen normaali toiminta, käyttöaste ja toimintaympäristö [6]. Kuvassa 1 on esitetty viisivaiheinen prosessi, jolla voidaan määrittää yhdistetty ja nopeutettu rasitustestaus niin, että sen antamat tulokset ovat luotettavia ja ne pystytään suhteuttamaan tosielämän tilanteeseen.



Kuva 1. Viisivaiheinen prosessi yhdistetylle ja nopeutetulle rasituskokeelle. Muokattu lähteestä [6].

Prosessin ensimmäisessä vaiheessa määritellään laitteen normaali toimintaympäristö, kuten lämpötila, kosteus tai jännite. Toisessa vaiheessa määritellään laitteen ensimmäisenä esiin tulevat vikaantumistavat. Nämä vikaantumistavat voidaan määritellä aikaisempien kokemusten perusteella tai päättelemällä laitteen rakenteen mukaan, mikä osa laitteesta kokee suurimman rasitteen. Komponentit, jotka vikaantuvat ensimmäisenä, otetaan luotettavuuskokeisiin tarkasteltaviksi.

Kolmannessa vaiheessa määritellään oikea yhdistelmä rasitustekijöitä, joita testauksessa käytetään. Luotettavuuskokeet mallinnetaan yleensä useammassa kuin yhdessä vaiheessa, jolloin saadaan luotettavampia tuloksia rasituksesta johtuvan vikaantumisen ja kenttäolosuhteissa tapahtuvan vikaantumisen suhteesta. Kaavassa 1 on annettu esimerkki tämän suhteen laskemisesta. Kaavassa 1 mitataan aikaa laitteen hajoamiselle normaaliolosuhteissa ja koeolosuhteissa. Näiden aikojen suhteesta saadaan laskettua kiihdytyskerroin (AF, Acceleration factor). Kiihdytyskertoimen laskeminen on tärkeä osa luotettavuuskokeita, sillä sen avulla laboratoriossa tehtyjen

kokeiden tulokset voidaan muuntaa vastaamaan tosielämän tilanteita [7]. Kaavan 1 lähde on Pohl Elmar (2016) [8].

$$Kiihdytyskerroin = AF = \frac{Vikaantumisaika\ käyttöolosuhteissa}{Vikaantumisaika\ testiolosuhteissa} \quad (1)$$

Yhdistetyssä ja nopeutetussa rasitustestauksessa laitteeseen yhdistetään useampaa rasitustekijää. Jokaiselle näistä rasitustekijöistä tulee laskea oma kiihdytyskerroin kaavan 1 mukaan. Testeissä jokaisen rasitustekijän vaikutuksen voidaan olettaa olevan yhtä suuri testattavaan laitteeseen, jolloin voimme kertoa kaikkien rasitustekijöiden kiihdytyskertoimet toisillaan. Tällöin saamme todellisen kiihdytyskertoimen kaikkien rasitteiden yhteisvaikutukselle [6]. Esimerkiksi koe, jossa käytetään rasitteita X, Y ja Z. Todellinen kiihdytyskerroin voidaan laskea, määrittämällä jokaiselle rasitteelle oma kiihdytyskerroin ja kertomalla ne toisillaan kaavan 2 mukaan. Kaavassa AF_{kok} kuvaa kokeen todellista kiihdytyskerrointa ja yksittäiset kiihdytyskertoimet ovat erillisten rasitteiden kiihdytyskertoimet. Kaava 2 on saatu lähteestä Hirler A (2019) [9].

$$AF_{kok} = AF_X * AF_Y * AF_Z \quad (2)$$

Neljännessä vaiheessa määritetään testisuunnitelma kokeille. Kauanko laitetta testataan ja kuinka suurella kuormalla laitetta rasitetaan. Kokeen lopputuloksille on kaksi haluttua ulostuloa. Rasitettava laite hajoaa ja saadaan selville mikä rasitetekijä aiheutti tämän hajoamisen tai laite ei hajoa kokeen aikana, jolloin voimme todeta laitteen näiden rasitevaikutusten suhteen luotettavaksi [6].

Prosessin viimeisessä vaiheessa tulkitaan saatuja tuloksia laitteen luotettavuudesta. Saatujen tulosten mukaan laitteen rakennetta tai valmistusprosessia muutetaan, jotta siitä saadaan luotettavampi rasitetta vastaan. Yleensä laitteen vikaantumisen jälkeen laitetta muutellaan ja sama C-AST-koe toistetaan ja saatuja tuloksia vertaillaan keskenään [6].

Yhdistetyn ja nopeutetun rasitustestauksen tuloksista varsinkin aurinkosähkömoduulien testauksesta on huomattu sen tuottavan tuloksia, mitä standardoiduilla testausmenetelmillä ei ole saatu. C-AST on suunniteltu löytämään vikatiloja, myös sellaisia, joita ei vielä ole toteutettu testiolosuhteissa. C-AST on osoitettu jäljittävän ja tuottavan samantyyppisiä tuloksia uudestaan erillisten kokeiden välillä, mikä tekee siitä luotettavan. [3] [10]

2.2.2 HAST ja sen variaatiot

HAST eli erittäin nopeutettu rasitustestaus on luotettavuuskokeiden muoto, jossa laite altistetaan jollekin yhdelle tietylle rasitustekijälle, minkä tarkoituksena on nopeuttaa erilaisten vikaantumismuotojen, kuten ruostumisen, leviämistä laitteessa. HAST on käytännöllinen tapa testata laitetta, kun tiedetään, mitä halutaan testata eikä löytää uusia vikatiloja.

RTC, rapid thermal cycling, eli nopea lämpötilan vaihtelu on HAST:in variaatio, jossa lämpötilaa kohotetaan rajusti, minkä jälkeen se lasketaan taas takaisin normaalilämpöön. Lämpötilaa voidaan nostaa koko laitteessa tai vain tietyssä osassa laitetta. RTC:n käyttö luotettavuuskokeissa on suotavaa, jos tiedetään laitteen saavan huomattavaa lämpökuormaa. RTC:tä hyödynnetään esimerkiksi juotosliitoksissa, joissa metalleilla on eri lämpölaajenemiskertoimet (CTE, coefficients of thermal expansion). Metallien laajenemisen erojen takia liitoskohtiin kasaantuu huomattava määrä rasitusta, joka pitkällä aikavälillä voi johtaa laitteen vikaantumiseen [11].

BHAST-rasitustestauksessa (biased highly accelerated stress testing) tutkittava laite altistetaan suurelle lämpötilalle kosteissa olosuhteissa. JEDEC JESD22-A110-standardin mukaan bHAST-testissä laite tulee altistaa 130 °C lämpötilalle ilman suhteellisen kosteuden ollessa 85 % ja paineen ollessa 33.3 psia. Näissä olosuhteissa laitteen täytyy antaa olla 96 tuntia [12]. Testin tarkoituksena on selvittää laitteen sietokyky korroosiota vastaan kosteassa ympäristössä. Tosin bHAST-testauksessa laitteessa on jännitekuorma, joka nopeuttaa siinä tapahtuvaa korroosiota huomattavasti verrattuna muihin samantyyppisiin testausmenetelmiin. Laitteeseen johdettu jännite nopeuttaa kemiallista reaktiota korroosion suhteen, joten se leviää liitoksissa nopeammin [12].

Hieman edellisestä testausmenetelmästä eroten uHAST (unbiased highly accelerated stress testing), tutkii laitteen korroosion aiheuttamaa rasitusta. Eroten bHAST-menetelmästä uHAST ei altista laitetta ollenkaan jännitteelle, mikä hidastaa korroosion leviämistä ja hidastaa näin koko prosessia. Usein valinta joudutaan näiden kahden testausmenetelmän välillä tekemään sen mukaan, mikä kokeissa on tavoitteena. UHAST keskittyy puhtaasti kosteuden vaikutuksiin laitteessa ilman jännitteestä johtuvaa vinoumaa. Toisaalta olisi myös turhaa tutkia laitteen kestävyyttä jännitteen alaisena, jos sen normaalissa toimintaympäristössä se ei altistu jännitteelle.

2.3 Luotettavuuden kuvaajat

Luotettavuuskokeista saadut tulokset muodostavat luotettavuusfunktioita R(t). Luotettavuusfunktio kertoo todennäköisyyden sille, kuinka luotettava laite on suhteessa aikaan. Tästä luotettavuusfunktiosta saadaan kumulatiivinen kertymäfunktio F(t) (CDF, cumulative distribution function), ottamalla sen komplementti kaavan 3 mukaan [13].

$$F(t) = 1 - R(t) \tag{3}$$

Kaava 3 kertoo siis, kuinka todennäköisesti laite vikaantuu suhteessa sen käyttöikään. Usein myös esiintyvä mittaustapa todennäköisyydelle on PDF (probability density function), f(t). PDF-arvo saadaan ensimmäisellä derivaatalla kaavasta 3, kaavan 4 mukaan, kun derivoidaan ajan suhteen. Kaava 3 kertoo siis, miten laitteen vikaantumiset ovat jakautuneet ajan suhteen [14].

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \tag{4}$$

2.3.1 Kylpyammekäyrä

Yksi tapa kuvata laitteiden vikaantumisastetta on kylpyammekäyrä. Kuvaaja saa nimensä sen muodosta, niin kuin kuvasta 2 voidaan nähdä. Kuvaaja on jaettu kolmeen osaan: alkutilan vikaantuminen, satunnaiset vikaantumiset ja kulumisesta johtuvat vikaantumiset. Kuvaajan vasempaan reunaan jäävä alue, alkutilan vikaantumiset, kertoo laitteiden elinkaaren alkuvaiheessa tapahtuvia vikaantumisia. Näitä vikaantumisia löydetään muun muassa testaamalla laitetta ja löytämällä vikaantuvia kohtia. Kuvaajan keskikohtaan jäävää aluetta kutsutaan satunnaisiksi vikaantumisiksi. Tällä alueella tapahtuvat vikaantumiset ovat täysin sattumanvaraisia ja vikaantumisaste on hyvin tasainen. Tuotteen elinkaaren loppua kohden laitteen vikaantumisaste kasvaa. Tätä vikaantumista kutsutaan kulumisesta johtuvaksi vikaantumiseksi.

Kuva 2. Kylpyammekäyrä vikaantumisasteesta. Muokattu lähteestä [15].

Kuvaajassa Y-akselilla on kuvattu laitteen vikataajuus ja X-akselilla aika. Laitteen vikaantumisaste *h(t)* saadaan kaavan 5 mukaan. Kaavassa *f(t)* on kaavan 4 mukaisesti laskettu vikatiheysfunktio ja *R(t)* on luotettavuusfunktio [16].

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \tag{5}$$

Laitteen vikaantumisaste kertoo laitteen vikaantumisen todennäköisyyden yleensä suhteessa aikaan. Vikaantumisaste on ominainen eri laitteille ja sen pidetään olevan ajallisesti muuttuva [17]. Kuvaajan avulla voidaan määrittää ajanhetket, joilla laitteet ovat kaikista vikaantumisherkimpiä. Tämän avulla voidaan määrittää kaikki rasitustekijät, mitkä ovat vaikutuksessa tai ovat vaikuttaneet laitteeseen sen elinkaaren aikana tähän mennessä. Kun laitteen rasitustekijät ovat tiedossa, voidaan päätellä millä niistä on suurin vaikutus laitteen mahdolliseen vikaantumiseen. Tämän tiedon avulla voidaan luotettavuuskokeita muuttaa niin, että tutkitaan juuri tämän rasitteen vaikutusta laitteeseen.

2.3.2 Weibull-jakauma

Toinen hyvin usein käytetty kuvaaja luotettavuuskokeissa on Weibull-jakauma eli Weibull distribution (WD). Tämä menettelytapa on nimetty ruotsalaisen Waloddi Weibullin mukaan, jonka mielletään keksineen sen. Tämä todennäköisyysjakauma mallintaa laitteiden vikaantumisaikaa niiden elinkaarella. WD on yleensä mallinnettu kahdella muuttujalla *k* tai *β* ja *c*. Muuttuja *k* tai *β* on kuvaajan muotoparametri ja muuttuja *c* on

kuvaajan kokoparametri. Riippuen lähteistä muotoparametrin tunnus vaihtelee. Muotoparametri määrittää kuvaajassa jakauman leveyden ja kokoparametri määrittää käytettyjen arvojen rajat. Näitä parametreja kutsutaan yleensä Weibull-parametreiksi [18]. Etenkin tämä kahden parametrin WD on yleensä käytetty käyttöikäjakautumana. Kuten tiedämme kylpyammekäyrän perusteella, jotkin vikaantumismuodot ovat sidonnaisia niiden käyttöikään. Tästä esimerkkinä alkutilan-, satunnaiset- ja kulumisesta johtuvat vikaantumiset. Näitä vikaantumisia on kuvattu niiden muotoparametrilla *k* [19].

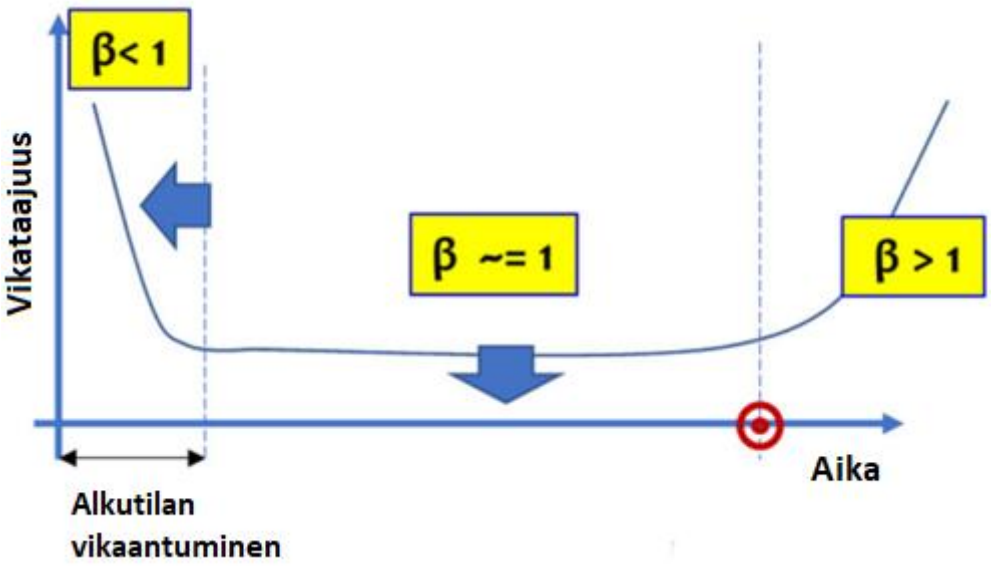
Kun tarkastelemme WD-kumulatiivistajakautumisfunktiota, ilmestyy kaavaan uusi muuttuja *δ*. Tämä muuttuja on nimeltään paikka- tai raja-arvoparametri. Tämä parametri kertoo pienimmän mahdollisen arvon, joka ilmenee WD-kuvaajassa. Jos raja-arvoparametri on asetettu negatiiviseksi, mahdollistaa se siis kuvaajan käsittelevän negatiivisia arvoja myös. Negatiivinen kynnysarvo voi tulla hyödylliseksi esimerkiksi tilanteessa, jossa mitattava laite voi hajota sen ollessa täysin uusi. Tässä tapauksessa kuvaaja ottaa huomioon myös laitteen alkutilan vikaantumiset. Tilanteissa, missä raja-arvoparametri on nolla, on WD-kuvaaja silloin puhtaasti kahden muuttujan WD-kuvaaja. Kaavassa 6 on esitetty WD CDF [20].

$$F(x) = 1 - exp\left(-\left[\frac{x-\delta}{c}\right]^{\beta}\right) \tag{6}$$

Kuten huomaamme raja-arvoparametrin ollessa nolla, poistuu sen vaikutus kaavasta kokonaan, jolloin ainoat vaikuttavat parametrit ovat enää sen koko- ja muotoparametrit. Tässä tapauksessa lauseke supistuu kaavan 7 mukaiseen muotoon.

$$F(x) = 1 - exp\left(-\left[\frac{x}{c}\right]^{\beta}\right) \tag{7}$$

Yhteys WD:n ja kylpyammekäyrän välillä on Weibull -jakauman muotoparametri *β*. Tämä parametri kertoo laitteen vikaantumismuodon tai niiden yhdistelmän. Varsinkin uusien laitteiden suunnittelussa jotkin muotoparametrin arvot ovat vakiintuneet ja nämä on tunnettu koko teollisuuden alalla [21]. Kuvassa 3 on esitetty kolme hyvin tyypillistä muotoparametrin arvoa, jotka ovat sidonnaisia kylpyammekäyrään.



Kuva 3. Muotoparametrin tyypillisiä arvoja. Muokattu lähteestä [21].

Kuvan 3 perusteella muotoparametrin ollessa noin yksi, kuvaa se tilannetta, jossa laite vikaantuu tasaisesti. Eli laite on satunnaisten vikaantumisten vaiheessa. Muotoparametrin ollessa enemmän kuin yksi, laitteen vikaantumisten määrä on kasvavassa vaiheessa. Tästä voidaan päätellä, vikaantumisten olevan kulumisesta johtuvia. Kun muotoparametri on alle yhden, kuvaa se laskevaa jakaumaa. Tällöin vikaantumisten määrä vähenee.

3. C-AST- JA HAST-MENETELMIEN LUOTETTAVUUS

Luotettavuuskokeita suunnitellessa ja toteutettaessa, on hyvin tärkeää suunnitella, minkälainen koe laitteelle toteutetaan. Yksi suuri vaikuttava tekijä kokeita suunnitellessa on osa-alue, mitä laitteesta halutaan testata. Altistetaanko laite suurelle määrälle lämpöä ja katsotaan, mikä osa pettää ensimmäisenä vai altistetaanko se suurelle kosteudelle? Yhtenä vaihtoehtona on altistaa laite kummallekin näistä rasitustekijöistä.

Yleensä C-AST-kokeiden tulokset ovat nopeammin valmiina, sillä laitteet eivät kestä usean rasitustekijän yhteisvaikutusta kovinkaan kauaa. Tästä voidaan toki esittää kysymys, onko nämä tulokset luotettavia ja antavatko tulokset väärää tietoa laitteesta. HAST-menetelmässä laite altistetaan vain yhdelle rasitustekijälle, jonka tarkoituksena on nopeuttaa esimerkiksi korroosion leviämistä laitteessa. Koemenetelmä herättää kysymyksen laitteen luotettavuudesta, sillä harvoin kenttäolosuhteissa laitteeseen kohdistuu vain yhtä rasitetta

Kumpi näistä menetelmistä antaa parempia tuloksia ja on luotettavampi? Seuraavat luvut pyrkivät vastaamaan näihin kysymyksiin eri näkökulmista.

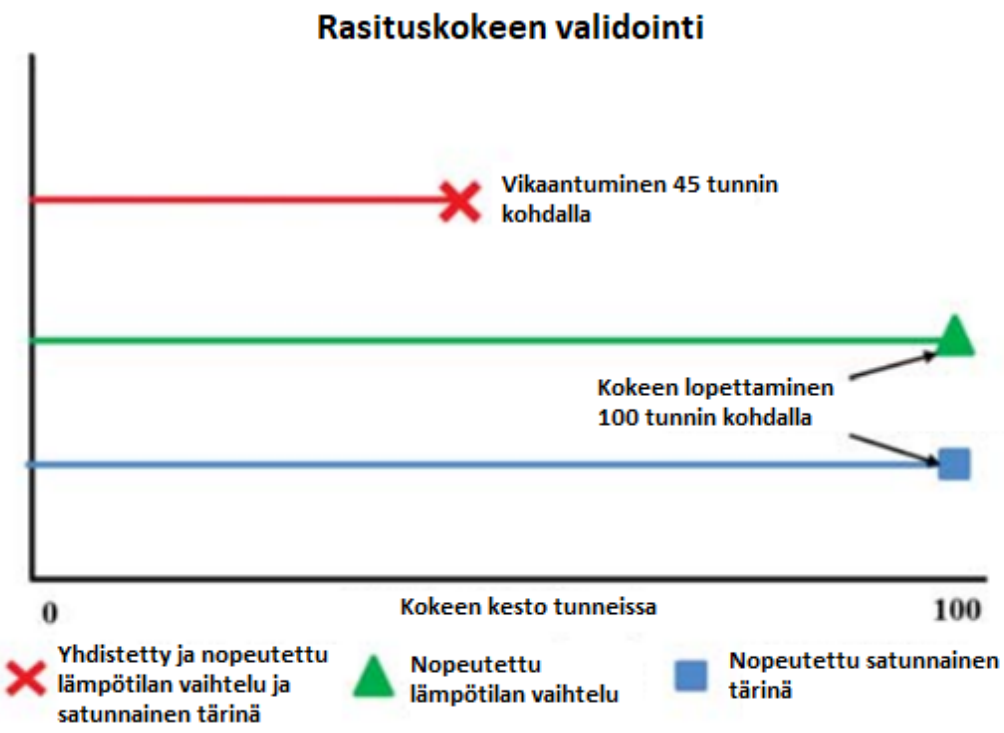
Taulukossa 1 on kuvattu tulevien lukujen päätelmät tiivistettynä. Taulukon vasemmassa reunassa on vertailtava muuttuja ja taulukon ylimmällä rivillä on rasituskoe.

Taulukko 1. Yhteenveto luvun 3 sisällöstä.

	HAST	**C-AST**
Hinta	Kohtuullinen	Kallis
Aika	Keskinopea	Nopea
Tunnettavuus	Vielä vieras	Tunnettu
Kenttävirhetilojen tunnistus	Hyvä	Hyvä
Uusien virhetilojen tunnistus	Heikko	Erinomainen
Alkutilan vikaantumiset	Loistava	Heikko
Satunnaiset vikaantumiset	Heikko	Loistava
Kulumisesta johtuvat vikaantumiset	Menettelee	Loistava
Monipuolisen rasituksen mallinnus	Heikko	Erinomainen
Yksittäisen rasitteen vaikutuksen mallinnus	Erinomainen	Heikko

3.1 Kustannus- ja aikanäkökulma

Luotettavuuskokeiden suunnittelussa tulee ottaa huomioon tulosten laatu ja kuinka nopeasti tuloksia halutaan. Laatuun vaikuttaa esimerkiksi resurssien käyttö kokeissa tai kuinka tarkkoja tuloksia niistä vaaditaan. Tuloksien saamisnopeuteen vaikuttaa käytetty koe itse. Esimerkiksi, mitä suuremmalle rasitukselle laite altistetaan, sitä nopeammin se todennäköisesti pettää. Tämä vaikuttaa tosin tulosten luotettavuuteen, joka voi johtaa tulosten epäluotettavuuteen verrattuna tosimaailman olosuhteisiin.



Kuva 4. Yksittäisten ja yhdistettyjen rasitteiden koe samalle laitteelle. Muokattu lähteestä [6].

Kuvassa 4 on esitetty laitteelle toteutettu koe, jossa se altistettiin aluksi vain lämpötilan vaihtelulle ja satunnaisille värähtelyille erikseen. Näiden kokeiden jälkeen koe toistettiin näiden rasitteiden yhteisvaikutuksella. Kuvassa 4 punaisella oleva viiva kuvaa koetta, jossa oli yhdistettynä satunnaiset värähtelyt sekä lämpötilan vaihtelu. Rasitteiden yhteisvaikutuksessa laite kesti vain 45 tuntia. Sinisellä ja vihreällä on taas yksittäiset rasitetekijät, jossa kummassakin laite kesti 100 tuntia ilman vikaantumista ja koe jouduttiin lopettamaan.

Jos kokeita toistettaessa rasitteen arvot, kuten lämpötila ja värähtelyn voimakkuus pidetään samoina, voidaan todeta näiden rasitteiden summautumisen kuluttavan laitetta enemmän. Kokeesta saatujen tulosten perusteella voidaan siis todeta, että yhdistetty ja nopeutettu rasitustestaus on tehokkaampi tapa saada laite vikaantumaan nopeammin. Kokeista syntyviä kustannuksia voidaan verrata suoraan aikaan. Mitä kauemmin kokeet ovat käynnissä, sitä enemmän ne kuluttavat resursseja. Tämän takia voidaan todeta, että yhdistetty ja nopeutettu rasitustestaus on tältä näkökannalta halvempi vaihtoehto kuin nopeutettu rasitustestaus. Toisaalta C-AST-kokeiden toteuttaminen on monimutkaisempi projekti kuin AST-kokeiden. Siinä missä AST-kokeissa laitteelle johdetaan vain yhtä rasitetta, C-AST-kokeissa laiteelle johdetaan kahta tai useampaa

rasitetta. Näiden rasitteiden ylläpitäminen, kokeen suunnittelu ja valvominen on huomattavasti työläämpää.

Kokeessa, jossa testattiin LED-valojen ikääntymistä ja toimintaa, huomattiin lämpötilalla olevan suurin vaikutus niiden ikääntymiseen. On myös huomattu aikaisemmissa kokeissa, että valolla ja sen säteilyllä on myös vaikutusta LED:ien ikääntymiseen. Kokeessa tehtiin myös mittauksia LED-valojen eliniästä näiden rasitustekijöiden yhteisvaikutuksesta. Kokeen tuloksien mukaan ikääntymisprosessi on huomattavasti nopeampi, kun rasitustekijöitä yhdistellään verrattuna vain yksittäisiin rasitustekijöihin [22].

AST on huomattavasti suositumpi tapa testata laitteiden luotettavuutta tällä hetkellä, sillä valmiudet näihin kokeisiin on paremmat ja siitä on enemmän tietoa saatavilla. Tosin C-AST tulokset ovat lupaavampia ja nopeampia toteuttaa, joten tulevaisuudessa näitä kokeita tullaan todennäköisesti näkemään enemmän. C-AST antaa tietoa vikatiloista, joita AST ei pysty antamaan, mikä lisää laitteiden luotettavuutta ja varmistaa niiden kestävyyden käytössä. C-AST antaa myös luotettavaa tietoa laitteiden eliniän arviosta, joka on hyödyllinen tieto elektronisten laitteiden markkinoilla.

3.2 Virhetilojen mallinnus ja tunnistaminen

Laitteeseen tehtyjen kokeiden olisi hyvä tunnistaa jo olemassa olevia vikoja, jotta niitä voitaisiin korjata ja tehdä laitteesta luotettavampi. Parhaissa tapauksissa laitteeseen tehdyt kokeet löytävät jopa uusia vikatiloja, joita ei ole vielä ilmennyt. Vertaillaan siis näiden kahden testausmenetelmän ominaisuuksia ja kykyjä tunnistaa virhetiloja.

C-AST-menetelmä on tarkoitettu enemmän tosimaailman olosuhteiden mallintamiseen, sillä siinä yhdistellään useamman rasitteen yhteisvaikutusta. HAST-menetelmä ei ole tarkoitettu löytämään uusia vikatiloja vaan pikemmin tuomaan laitteiden heikot lenkit esille kokeissa.

C-AST-menetelmän tiedetään olevan raju laitetta kohtaa. Kun laite altistetaan useammalle rasitteelle samanaikaisesti, johtaa se välttämättä johonkin vikatilaan. Vaikka laite voi joutua vikatilaan yhdestäkin rasitteesta, yleensä laitteiden vikaantuminen on useamman kuin yhden rasitteen summa. On hyvä siis kokeissa mallintaa tätä usean rasitteen yhteisvaikutusta.

PV-laitteille (photovoltaic) tehdyssä kokeessa, missä hyödynnettiin C-AST-menetelmää, huomattiin useamman rasitteen yhdistelmän johtavan uudenlaisiin vikatiloihin. Tässä kokeessa laite altistettiin UV-valolle sekä vesisuihkulle samanaikaisesti. Kokeen tulokset

korostivat merkitystä rasitustekijöiden yhdistämisestä yhteen kokeeseen ja siitä saatuihin tuloksiin [23].

Luotettavuuskokeissa on myös tärkeää, että kokeiden tulokset ovat luotettavia ja toistettavia. Jos kokeista saatujen tulosten hajauma olisi suuri, ei tuloksia voitaisi pitää luotettavina. C-AST-menetelmän on huomattu pystyvän luotettavasti toistamaan joitakin kenttävikoja, joita ei ole voitu jäljentää standardeilla sertifiointimenetelmillä [3]. Tämä ominaisuus tekee C-AST-menetelmästä luotettavan testausmenetelmän.

Varistoreille tehdyssä kokeessa, jonka tarkoituksena oli pyrkiä tuottamaan kenttävika laboratorio-olosuhteissa, käytettiin HAST-menetelmää, jolla haluttuja tuloksia pyrittiin saamaan aikaan. Laite altistettiin samantyyppiselle rasitteelle, mitä se kokee kentällä. Kokeen lopuksi voitiin todeta saman kenttävian ilmenneen laiteessa [24]. HAST:illa on siis mahdollisuus saada aikaan vikatiloja, joita ilmenee laitteessa sen normaalitoimintaympäristössä.

Näistä tuloksista voidaan huomata, että kummallakin, C-AST- ja HAST-menetelmällä pystytään mallintamaan kenttäolosuhteissa tapahtuvia vikatiloja ja toistamaan ne luotettavasti useammassa toisistaan riippumattomassa kokeessa. Etuna C-AST-menetelmässä on sen mahdollisuus tuottaa täysin uusia vikatiloja, jota ei tiedetty etukäteen. Toisaalta, jos ei ole tarvetta löytää uusia vikatiloja vaan testata yhden tietyn rasitteen vaikutusta laitteeseen, on HAST tehokkaampi tapa.

3.3 Parempi mallinnustapa laitteen elinkaaren eri vaiheille

Edellisessä luvussa tutustuttiin HAST- ja C-AST-menetelmien kykyihin tunnistaa ja mallintaa uusia ja jo tunnettuja vikaantumistapoja. Tässä luvussa tutustutaan kummankin testausmenetelmän kykyihin mallintaa laitteen eri elinkaaren vaiheita ja näissä elinkaaren vaiheissa laitteelle tyypillisiä vikatiloja. Kumpi menetelmistä on tehokkaampi laitteen valmistusvaiheen alussa tapahtuvassa testauksessa ja kumpi antaa parempia tuloksia valmiin laitteen testauksesta?

Laitteen eliniän testauksen eri vaiheissa on parempi keskittyä laitteen eri ominaisuuksiin. Laitteen alkuvaiheessa, milloin laitetta vielä kehitellään ja parannellaan, on parempi keskittyä laitteen suunnitteluvirheiden paljastamiseen ja korjaamiseen. Laitteen elinkaaren mallintamisessa pyritään keskittymään pitkäaikaisen rasituksen ja monen rasitteen yhdistelmän mallintamiseen, sillä tämä kuvaa parhaiten laitteen todellista käyttöympäristöä.

Kylpyammekäyrän mukaan laitteiden vikaantuminen niiden elinkaarella on jaettu kolmeen osaan: alkutilan vikaantumisiin, satunnaisiin vikaantumisiin ja kulumisesta

johtuviin vikaantumisiin. Tutkitaan siis tässä kappaleessa kylpyammekäyrän eri vaiheissa olevien vikatilojen mallintamista HAST- ja C-AST-menetelmillä.

Laitteen eliniän alussa pyritään tuomaan sen suunnitteluvaiheen virheitä esiin ja tunnistamaan laitteiden heikoimmat lenkit. Nämä tiedot ovat välttämättömiä, jotta laitetta voidaan tehdä paremmaksi ja luotettavammaksi. HAST-menetelmä soveltuu tähän loistavasti, sillä HAST-menetelmällä voidaan kohdistaa juuri haluttua rasitetta laitteelle. Tämä mahdollistaa siis laitteen luotettavuuden tutkimista juuri tietyn rasitteen suhteen. HAST-menetelmän ollessa nopeampi ja halvempi toteuttaa on se parempi valinta laitteen alkutilan testaukselle. Vaikka C-AST toimisi myös laitteen alkutilan testauksessa, on se kustannuksiltaan arvokkaampi toteuttaa. Laitteen aikaisen kehittämisvaiheen testaamisessa on myös mahdollisesti turhaa altistaa laite useammalle rasitteelle, jos se ei kestä edes yhtä. Siirryttäessä myöhempään tuotannon vaiheeseen, missä lähestytään jo valmista laitetta, on hyvä valinta hyödyntää C-AST-menetelmää. Tässä vaiheessa laitetta on jo todennäköisesti rasitettu HAST-menetelmällä ja se on todettu se kestäväksi.

Satunnaisten virheiden ja kulumisesta johtuvien vikaantumisten mallintamisessa pitää ottaa laitteen kenttäolosuhteet huomioon pikemmin kuin yksittäiset rasitetekijät. Näissä kummallakin testausmenetelmällä on saatu toteutettua kenttäolosuhteissa tapahtuneita vikatiloja, on C-AST monipuolisempi tässä vaiheessa. Laitteen ollessa sen normaaleissa kenttäolosuhteissa on se altistuneena useammalle rasitteelle samanaikaisesti. C-AST-menetelmän hyvänä puolena on sen mahdollisuus tuottaa ennalta tunnistamattomia vikatiloja, joiden ansiosta laitetta voidaan parannella. Tämä taas johtaa laitteen luotettavuuden paranemiseen.

Yhtenä merkittävänä tekijänä laitteen testauksessa on tunnistaa laitteen käyttöolosuhteet ja vaatimukset. Toisin sanoen on turha testata laitetta C-AST menetelmällä, jos siihen ei tule koskaan kohdistumaan useampaa rasitetta saman aikaisesti. Myös on hyvä tunnistaa laitteen turvallisuusvaatimukset ja kuinka kattavasti laitetta tulee testata. Kompromisseilla laitteen testauksessa saadaan kustannuksia huomattavasti madallettua, mutta luotettavuus saattaa kärsiä. Toisaalta, jos laitteen luotettavuustestauksia vähennetään, saattaa se johtaa katastrofaalisiin lopputuloksiin laitteen vikaantumisen myötä.

Mitä siis tulisi ottaa huomioon laitetta testattaessa? Laitteen elinkaaren mallintamisen vaiheilla on suuri merkitys kumpi testausmenetelmistä kannattaa valita. Toisaalta laitteen luotettavuusvaatimuksillakin on huomattava merkitys. Laitteen lopullinen käyttöympäristökin vaikuttaa huomattavasti laitteen kannalta kriittisiin rasitetekijöihin.

Ei siis ole yhtä oikeaa vastausta kumpi testausmenetelmistä on parempi laitteen luotettavuuden testaamisessa. Toki mikään ei kiellä laitteen testaamista kummallakin menetelmällä. Tällä tavalla voidaan varmistua sen luotettavuudesta, mutta kustannukset ja aikavaatimukset kasvavat huomattavasti.

3.4 C-AST- ja HAST-menetelmien rasitustavat ja vaikutus laitteen kestävyyteen

Tutkitaan tässä luvussa kummankin menetelmän mallinnustapoja ja minkälaista rasitusta kummassakin menetelmässä sovelletaan. Kuten tiedetään, että HAST-menetelmässä keskitytään yhden rasitustekijän mallintamiseen ja sen vaikutuksen tutkimiseen. C-AST-menetelmässä yhdistetään kahta tai useampaa rasitetta ja määritetään näiden rasitteiden yhteisvaikutusta.

HAST-menetelmällä ominaista on mallintaa laitteen ikääntymistä altistamalla se suurelle lämmölle, kosteudelle tai jollekin muulle rasitteelle, mikä ilmenee luonnossa. Rasite HAST-menetelmässä saattaa kokeesta riippuen olla suurempi, mitä se tulee kokemaan luonnossa, mutta silti se on todettu hyväksi tavaksi mallintaa luonnon ilmiöitä. Toisin sanoen HAST-menetelmässä pyritään tutkimaan yksittäisten luonnossa ilmenevien rasitustekijöiden vaikutusta laitteessa ja sen kestävyydessä [25]. C-AST menetelmässä perehdytään useamman rasitteen yhteisvaikutuksiin. Vaikka kummassakin tutkitaan luonnossa ilmenevien rasitustekijöiden vaikutusta, C-AST-menetelmässä tutkitaan myös mekaanista rasitetta, käyttöjännitteen vaihtelua tai iskuja. Tämä mallintaa paremmin laitteen käyttöympäristössä tapahtuvaa rasitusta riippuen laitteesta ja sen käyttöympäristöstä.

Kosteuden mallintamisella testauksen aikana pyritään aiheuttamaan ennenaikaista korroosiota laitteessa ja täten tutkia laitteen kestävyyttä materiaalin hajoamisen jälkeen [12]. Lämpötilan vaihtelun tavoitteena on tutkia kemiallisten reaktioiden vaikutusta, sillä lämpötilan nousu yhdistettynä kosteuteen toimii yleensä katalyyttinä etenkin korroosion leviämiselle [26]. Vaikka näiden vaikutus on tärkeä tutkia laitteessa, on laitteesta riippuen hyvä myös tutkia laitteeseen kohdistuvaa mekaanista rasitetta tai käyttöjännitteen vaikutusta.

Tulee siis tässäkin tilanteessa määrittää, mitä rasitetta laitteen tulee kestää ja miten tarkasti sen luotettavuutta halutaan mallintaa. Jos kyseessä on yksinkertainen laite, halutaan tutkia laitteen ikääntymistä, laite toimii korkeissa lämpötiloissa ja siihen ei kohdistu dynaamista rasitetta tai laite on vasta sen kehityksen alussa, parempi valinta rasitusmenetelmäksi saattaa olla HAST. Jos laitteen toimintaympäristö on monipuolinen rasitteiden suhteen, laitteeseen kohdistuu dynaamista rasitetta, laite on tarkoitettu

kestävän pitkään ja halutaan tutkia rasitteiden kumulatiivista vaikutusta tai laitteen halutaan olla varmasti luotettava ja testaukset suoritetaan monelta eri näkökulmalta, kannattaa menetelmäksi valita C-AST.

4. YHTEENVETO

Molemmat luotettavuuskokeet ovat loistavia menetelmiä nopeuttaa laitteeseen kohdistuvaa rasitetta ja mallintaa niiden luotettavuutta. Vaikka kummankin menetelmän tavoitteena on mallintaa laitteen luotettavuutta, perustuvat ne hyvin erilaisiin lähestymistapoihin sen mallintamisessa.

C-AST lähestyy laitteen luotettavuuden mallintamista sen käyttöympäristön näkökannalta. Laite altistetaan sen käyttöympäristössä oleville rasitetekijöille ja niiden kumulatiivisille vaikutuksille. C-AST:n etuna verrattuna HAST-menetelmään on sen kyky ottaa huomioon laitteeseen kohdistuvaa mekaanista ja sähköistä rasitetta. C-AST tuo myös esille täysin uusia vikatiloja, joita ei ole saatu aikaan HAST-menetelmillä eikä muillakaan aikaisemmilla standardimenetelmillä. Uusien vikatilojen löytäminen luo luotettavuutta C-AST-menetelmälle. C-AST-menetelmä on myös todella pätevä menetelmä kuvaamaan pitkäikäisten laitteiden kestävyyttä ja luotettavuutta. HAST ei pysty mallintamaan niin luotettavasti pitkäikäisyyttä, sillä sen käytössä laite altistetaan kovemmalle rasitukselle, mitä se todennäköisesti tulee ikinä kokemaan. C-AST antaa siis kokonaisvaltaisen näkemyksen laitteiden luotettavuudesta niiden omassa käyttöympäristössään.

Toisaalta aina ei haluta kuvata laitteen todellista toimintaympäristöä laitetta testattaessa. Esimerkiksi laitteen kehitysvaiheen alussa halutaan mahdollisesti kuvata laitteen kestävyyttä jotakin tiettyä rasitetta kohtaan, tällöin HAST on parempi valinta. HAST on myös parempi luotettavuuskoe mallintamaan laitteiden vanhenemista. Jos tiedetään testattavan laitteen toimivan hyvin korkeissa lämpötiloissa, on todennäköisesti parempi valinta testata laitetta aluksi vain hyvin korkeaa lämpötilaa vastaan, minkä jälkeen tulosten perusteella siirtyä kehityksen seuraavaan vaiheeseen.

Tästä voimme tulla lopputulokseen, että laitteiden luotettavuutta saadaan hyvin mallinnettua näiden menetelmien avulla. Ei ole yhtä oikeaa vastausta kumpi menetelmistä on parempi. Laitetta testattaessa ja kokeita suunnitellessa pitää määrittää vastaus seuraaviin kysymyksiin: kuinka tarkkoja ja laajoja kokeita haluamme suorittaa, mitä haluamme testata, mikä on laitteen normaali käyttöympäristö, kuinka pitkä on laitteen arvioitu käyttöikä ja kuinka luotettavia tuloksia haluamme. Näihin kysymyksiin vastattua, pystytään määrittämään tälle laitteelle parempi menetelmä.

Tällä hetkellä menetelmät antavat vielä luotettavia tuloksia laitteille, mutta laitteiden kehittyessä ja muuttuessa, tulevaisuudessa tämänhetkiset luotettavuuskokeet eivät välttämättä riitä enää. Tulevaisuudessa laitteilta saatetaan vaatia entistä parempia kestävyysvaatimuksia tai tarkempia tuloksia luotettavuuskokeista.

Teknologisen kehityksen myötä tulee uutta teknologiaa markkinoille. Tämä työllistää luotettavuuskokeita suunnittelevia entistä enemmän. Aikaisemmin riittäneet koemenetelmät eivät välttämättä riitä enää. On siis turvallista todeta, että luotettavuuskokeiden on muututtava teknologisen kehityksen mukana samaa vauhtia.

LÄHTEET

[1] Suhir, E. (2013). Could electronics reliability be predicted, quantified and assured? Microelectronics Reliability, 53(7), 925–936. Saatavilla: https://doi.org/10.1016/j.microrel.2013.03.011

[2] Gray, K. A., & Paschkewitz, J. J. (2016). *Next Generation HALT and HASS: Robust Design of Electronics and Systems*. John Wiley & Sons, Incorporated. Saatavissa: http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=4451897

[3] Owen-Bellini, M., Hacke, P., Miller, D. C., Kempe, M. D., Spataru, S., Tanahashi, T., Mitterhofer, S., Jankovec, M., & Topič, M. (2021). Advancing reChen, J. B., Li, C., & Wu, Y. P. (2012). Study on rapid thermal cycling by inducted heating for microstructure of single SnAgCu solder joint. Science & Technology of Welding & Joining, 17(3), 237–243. Saatavilla: https://doi.org/10.1179/1362171811Y.0000000102

[4] Miller, D., Perrin, G., Terwilliger, K., Morse, J., Xiao, C., To, B., Ulicna, S., Jiang, C.-S., Schelhas, L. T., & Hacke, P. (2022). Development of Fixtures and Methods to Assess the Durability of Balance of Systems Components. *IEEE Journal of Photovoltaics*, *12*(6), 1341–1348. Saatavilla: https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2022.3205154

[5] Miller, D., Perrin, G., Terwilliger, K., Morse, J., Xiao, C., To, B., Jiang, C.-S., & Hacke, P. (2022). *Evaluating the Durability of Balance of Systems Components Using Combined-Accelerated Stress Testing*. 0015–0017. Saatavilla: https://doi.org/10.1109/PVSC48317.2022.9938581

[6] Sunderajan, N., & Ramar, K. (2019). Replication of Field Scenario in Reliability Testing. 1–5. Saatavilla: https://doi.org/10.1109/RAMS.2019.8769007

[7] Zheng, D., & Fang, X. (2018). Exact Confidence Limits for the Acceleration Factor Under Constant-Stress Partially Accelerated Life Tests With Type-I Censoring. IEEE Transactions on Reliability, 67(1), 92–104. Saatavilla: https://doi.org/10.1109/TR.2017.2747762

[8] Pohl, E., Hermanns, R. (2016) Physical model based reliability analysis for accelerated life testing of a fuel supply system. Fuel (Guildford), 2016-10, Vol.182, p.340-351. Saatavilla: https://libkey.io/libraries/2233/articles/59076571/full-text-file?utm_source=api_1105

[9] Hirler, A., Alsioufy, A., Biba, J., Lehndorff, T., Lochner, H., Simon, S., Sulima, T., Thomas, W., Hansch, W. (2019). Effective and combined stressors from multi-dimensional mission profiles for semiconductor. Microelectronics and reliability, 2019-09, Vol.100-101, p.113323, Article 113323. Saatavilla: https://libkey.io/libraries/2233/articles/345021026/full-text-file?utm_source=api_1105

[10] Ulicna, S., Sinha, A., Springer, M., Miller, D. C., Hacke, P., Schelhas, L. T., & Owen-Bellini, M. (2021). Failure Analysis of a New Polyamide-Based

Fluoropolymer-Free Backsheet After Combined-Accelerated Stress Testing. IEEE Journal of Photovoltaics, 11(5), 1197–1205. Saatavilla: https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2021.3090152

[11] Chen, J. B., Li, C., & Wu, Y. P. (2012). Study on rapid thermal cycling by inducted heating for microstructure of single SnAgCu solder joint. *Science & Technology of Welding & Joining*, *17*(3), 237–243. Saatavissa: https://doi.org/10.1179/1362171811Y.0000000102

[12] Liu, C.-P., Chang, S.-J., Liu, Y.-F., & Su, J. (2020). Corrosion-induced degradation and its mechanism study of Cu–Al interface for Cu-wire bonding under HAST conditions. *Journal of Alloys and Compounds*, *825*, 154046-. Saatavilla: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154046

[13] Eto, M., Araki, N., Yamada, T., Sugiyama, M., & Fujimoto, S. (2021). Influence of post-bonding heating process on the long-term reliability of Cu/Al contact. *Microelectronics and Reliability*, *118*, 114058-. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114058

[14] Kang, Q., Lin, Y., & Tao, J. (2023). A Reliability Analysis of a MEMS Flow Sensor with an Accelerated Degradation Test. Sensors, 23(21), 8733. Saatavilla: https://doi.org/10.3390/s23218733

[15] Narcisi, V., Lorusso, P., Giannetti, F., Alfonsi, A., & Caruso, G. (2019). Uncertainty quantification method for RELAP5-3D© using RAVEN and application on NACIE experiments. Annals of Nuclear Energy, 127, 419–432. Saatavilla: https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.12.034

[16] Kumar, N. S. H., Choudhary, R. P., & Murthy, C. S. (2021). Reliability-based analysis of probability density function and failure rate of the shovel–dumper system in a surface coal mine. Modeling Earth Systems and Environment, 7(3), 1727–1738. Saatavilla: https://doi.org/10.1007/s40808-020-00886-8

[17] Montanari, G. C., Seri, P., Ghosh, R., Franchi Bononi, S., & Albertini, M. (2021). Testing cable system reliability after commissioning and during operation life: In medio stat virtus? High Voltage, 6(1), 34–41. Saatavilla: https://doi.org/10.1049/hve.2020.0017

[18] Dechgummarn, Y., Fuangfoo, P., & Kampeerawat, W. (2023). Predictive Reliability Analysis of Power Distribution Systems Considering the Effects of Seasonal Factors on Outage Data Using Weibull Analysis Combined With Polynomial Regression. IEEE Access, 11, 138261–138278. Saatavilla: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3340515

[19] Shoaib, M., Siddiqui, I., Amir, Y. M., & Rehman, S. U. (2017). Evaluation of wind power potential in Baburband (Pakistan) using Weibull distribution function. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 70, 1343–1351. Saatavilla: https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.037

[20] Hisada, K., & Arizino, F. (2002). Reliability tests for Weibull distribution with varying shape-parameter, based on complete data. IEEE Transactions on Reliability, 51(3), 331–336. Saatavilla: https://doi.org/10.1109/TR.2002.801845

[21] Gallagher, M. A., & Moore, A. H. (1990). Robust minimum-distance estimation using the 3-parameter Weibull distribution. IEEE Transactions on Reliability, 39(5), 575–580. Saatavilla: https://doi.org/10.1109/24.61314

[22] Jayatilleka, S., & McLinn, J. (2021). Practical Implications of Weibull Shape Parameter; Lessons & Pitfalls. 1–6. Saatavilla: https://doi.org/10.1109/RAMS48097.2021.9605732

[23] Yazdan Mehr, M., Toroghinejad, M. R., Karimzadeh, F., van Driel, W. D., & Zhang, G. Q. (2018). A review on discoloration and high accelerated testing of optical materials in LED based-products. Microelectronics and Reliability, 81, 136–142. Saatavilla: https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.12.023

[24] Uličná, S., Arnold, R. L., Newkirk, J. M., Sinha, A., Terwilliger, K., Schelhas, L. T., Pasmans, P., Thellen, C., & Miller, D. C. (2024). Material characterization of seven photovoltaic backsheets using seven accelerated test conditions. Solar Energy Materials and Solar Cells, 267, 112726-. Saatavilla: https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.112726

[25] Jeong, J.-S. (2013). Field failure mechanism and reproduction due to moisture for low-voltage ZnO varistors. Microelectronics and Reliability, 53(9–11), 1632–1637. Saatavilla: https://doi.org/10.1016/j.microrel.2013.07.080

[26] Mavinkurve, A., Martinez, J. L., van Soestbergen, M., & Zaal, J. J. M. (2016). Moisture absorption by molding compounds under extreme conditions: Impact on accelerated reliability tests. Microelectronics and Reliability, 64, 254–258. Saatavilla: https://doi.org/10.1016/j.microrel.2016.07.105

[27] Lei Zhang, & Kojima, H. (2016). An Advanced Study on Ion Impurities on Solder Resist and the Solutions for High-Temperature Reliability Performance. 1352–1358. Saatavilla: https://doi.org/10.1109/ECTC.2016.75