



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Teppo Juhani Allenius

SÄHKÖISTEN KOMPONENTTIEN TEKNISEN ELINIÄN TODENTAMINEN

Tekniikka ja liikenne

2013

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU

Sähkötekniikan koulutusohjelma

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Teppo Allenius
Opinnäytetyön nimi	Sähköisten Komponenttien Teknisen Eliniän Todentaminen
Vuosi	2013
Kieli	suomi
Sivumäärä	58+2
Ohjaaja	Vesa Verkkonen

Työn tavoitteena oli selvittää, millä tavoin tuotteet ikääntyvät, mitkä asiat siihen vaikuttavat ja miten ikääntymistä voidaan mitata. Tavoitteena oli luoda alustava katsaus ikääntymisen mekanismeihin sekä luoda laskentaohjelmat muutamien eri ikääntymistapojen laskemiseen.

Menetelminä käytettiin sekä laskennallista tapaa että kokemuseräistä testausta. Laskennalliset menetelmät ovat helpompia toteuttaa käyttäen taulukkolaskentaohjelmistoja, mutta kokemuseräiset testaukset vaativat aikaa rahaa sekä laitteistoja, joten ei voida olettaa olevan mahdollista suorittaa ikääntymiskokeita kaikille laitteille, vaan on kannattavampaa keskittyä kriittisiin komponentteihin. Tässä opinnäytetyössä keskityttiin testien osalta vain eri lämpötilojen vaikutuksiin testiolosuhteissa.

Menetelmiä verrattiin myös lopuksi, jolloin voitiin määrytyiltä osin todeta sekä laskennallisten tapojen että kokeellisten testien olevan riittävän lähellä. Testikappaleiden vähyydestä sekä aikataulullisista syistä johtuen ei täysin luotettavaa tilastoa voida pitää, mutta voitiin todeta sen olevan mahdollista. On huomioitava eri tilanteet testauksissa mitkä voivat aiheuttaa poikkeamia sekä häiriötilanteita sekä eliminoidava ne mahdollisimman hyvin.

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES VAASA

Technology and communication

ABSTRACT

Author	Teppo Allenius
Title	Ageing Classification For Electrical Components
Language	Finnish
Pages	58+2
Name of supervisor	Vesa Verkkonen

The purpose of this thesis was to study, how a different products age, what causes the ageing and how we can measure aging. The purpose was also to make an initial review of the mechanism of ageing and to create a few ready calculators to calculate aging in different materials

The methods were calculating and experimental testing. The calculating methods were easier to implement, using spreadsheet software, but experimental tests need time, money and hardware, so it was not possible to perform aging tests for all devices, but it was more profitable to focus on critical components. In this thesis I focused only on the effects of different temperature in the test conditions.

The methods were also compared, and the conclusion of this was that the calculated methods and experimental tests are close enough to each other. This seems to be case but because of the lack on test items, and due the time limitations we could get reliable statistics, but it seems to be possible. Various situations, which may cause differences and interference, should be taken into account in testing, and they should be eliminated as much as possible.

Keywords

ageing, inspection, components, testing

LYHENTEET JA KÄSITTEET

°C	lämpötila Celsius-asteina
°K	lämpötila Kelvineinä
ΔT	lämpötilan muutos, °K
A	väsymiskerroin
AF	suhteellinen elinkaarikerroin
Cycles/day	jaksoja päivässä
e	Neperin luku
E	aktivaatioenergia, [eV]
EDG	Emergency Diesel Generator, hätädieselgeneraattori
g	sinimuotoisen värinän taso , $g=9.81\text{m/s}^2$
HALT	Highly Accelerated Life Test, testaustapa
K	Bolzmännin vakio ($0,8617 \cdot 10^{-4}$ [eV/K])
n	eksponentti eri materiaalille
T	lämpötila [°K, °C]
t	aika
w	satunnaismuotoisen värinän taso
RH	suhteellinen kosteus
TI	Temperature Index, lämpötilaindeksi
HIC	Halving interval, puoliintumislämpötilaväli

SISÄLLYSLUETTELO

1 YHTIÖN ESITTELY	8
1.1 Ship Power.....	8
1.2 Power Plants.....	8
1.3 Services.....	9
1.4 Wärtsilä Industrial Operations (WIO)	9
1.5 Toimittajaverkosto	9
1.6 Wärtsilän missio, visio ja strategia	10
1.6.1 Missio	10
1.6.2 Visio	10
1.6.3 Strategia	10
1.7 Ympäristövastuu.....	13
1.8 Sosiaalinen vastuu	13
2 JOHDANTO.....	14
3 HÄTÄDIESELGENERATTORI	17
4 IKÄÄNTYMINEN.....	18
5 LUOTETTAVUUS	19
6 IKÄÄNTYMISTÄ AIHEUTTAVIA RASITUKSIA.....	20
6.1 Sähköinen ikääntyminen.....	20
6.2 Diffuusio.....	21
6.3 Hajavirrat.....	21
6.4 Lämpöikäntyminen, -haurastuminen	21
6.5 Mekaaninen ikääntyminen.....	23
6.6 Hapettuminen	23
6.7 Kosteus	24
6.8 Säteily.....	24
6.9 Whiskerit	25
6.10 Ympäristö	25
6.11 Yleistä.....	25
7 ERISTYSVIAT	26
8 MENETELMÄT	28
8.1 Analyysi	28
8.2 Kiihdytetty ikärasitustestaus.....	28

8.3 Käyttökokemukset	29
9 MATEMAATTINEN ANALYYSI.....	30
9.1 Lämpövanheneminen	30
9.2 Tärinä-ikäntyminen.....	32
9.3 Lämpövuorottelu	33
10 ANALYSOITU KOMPONENTTI.....	35
10.1 IP-muuntimet.....	35
10.2 Teoreettiset lasketut tulokset eri materiaaleille.....	36
11 LASKENNALLISIA TULOKSIA	38
12 MATERIAALITESTAUKSET LABORATORIOSSA	40
12.1 Laboratoriojärjestelyn kuvaus	40
12.2 Häiriösuojaus.....	41
12.3 Testin toteutus	42
12.4 Testausjärjestelyt	43
12.5 Saadut tulokset ja johtopäätelmät	47
13 LASKENTA- JA TESTAUSTULOSTEN VERTAILU.....	53
14 YHTEENVETO	55
LÄHDELUETTELO	57
LIITTEET.....	58

Tämä opinnäytetyö on omistettu isälleni Eino Alleniukselle, joka nukkui pois kesken opintojeni. Aina ei asiat mene kuten odottaa...

Työssä valvojana toimi Wärtsilän puolesta Application Manager Juha Kerttula ja Vaasan ammattikorkeakoulun puolelta yliopettaja Vesa Verkkonen.

Erityiskiitokset ansaitsevat myös laboratorioinsinööri Timo Rinne ja chief test engineer Risto Koivisto laboratoriotestien onnistumisesta ja toteutuksesta.

Lopuksi kiitokset myös kaikille muille, jotka ovat olleet mukana tämän lopputyön tekemisessä.

Vaasa 11.01.2013

Teppo Allenius

1 YHTIÖN ESITTELY

Wärtsilä on kansainvälisesti johtava merenkulun ja energiamarkkinoiden voimaratkaisujen toimittaja, joka tukee asiakasyrityksiä tuotteiden koko elinkaaren ajan. Wärtsilä maksimoi alusten ja voimalaitosten ympäristötehokkuutta ja taloudellisuutta keskittymällä teknologisiin innovaatioihin ja kokonaisyötysuhteeseen.

Vuonna 2011 Wärtsilän liikevaihto oli 4,2 miljardia euroa ja henkilöstömäärä oli noin 19 000 henkeä. Yrityksellä on lähes 170 toimipistettä 70 maassa. Wärtsilän osakkeet on listattu NASDAQ OMX Helsingissä. /6/

1.1 Ship Power

Wärtsilällä on vahva asema kaikilla merenkulun pääsegmenteillä arvostettujen laivakoneistojen ja järjestelmien toimittajana. Ship Power-ratkaisut sisältävät tuotteita, järjestelmiä ja palveluita.

Kysyntätekijöinä Ship Power-yksiköllä on öljyn korkea hintataso, joka lisää investointeja Offshore-alalla, raaka-aineiden ja energian kuljetuksen kysyntää kehittyvillä markkinoilla. Kysyntää lisää myös ympäristömääräykset sekä keskittyminen energiatehokkuuteen ja ympäristömyötäiseen suorituskykyyn. /6/

1.2 Power Plants

Wärtsilä on nykyaikaisten, ympäristösuorituskyvyltään pitkälle kehitettyjen, tehokkaiden ja dynaamisten voimalaitosratkaisujen johtava toimittaja.

Kysyntätekijöinä Power Plantsilla on BKT:n kasvu, sähköistäminen ja elintason kohoaminen, keskittyminen kestäväan kehitykseen ja ilmastonmuutokseen sekä epäsäännöllisen, uusiutuvaan energiaan perustuvan voimantuotannon kasvu ja suuremmat vaihtelut voimajärjestelmissä johtuen muuttuvasta kysynnästä ja tarjonnasta. /6/

1.3 Services

Services-liiketoiminta tukee sekä Power Plants- että Ship Power -asiakkaita kattavimmalla huoltotarjonnalla ja toimialan laajimmalla huoltoverkostolla. Services-liiketoiminnan osuus Wärtsilän liikevaihdosta vaihtelee 35 % ja 45 % välillä ja se tasoittaa kohdemarkkinoiden suhdanneherkkyyttä.

Kysyntätekijöinä Services-yksiköllä on kasvava kaasun käyttö polttoaineena, ympäristömääräykset, keskittyminen kustannustehokkuuteen ja tekninen kehitys. /6/

1.4 Wärtsilä Industrial Operations (WIO)

WIO vastaa myyntidivisioonien myymien tuotteiden T&K:sta ja tuotannosta. WION tuotanto keskittyy pääasiassa tuotteiden kokoonpanoon, koeajoon ja viimeistelyyn. Toimintamalli perustuu vahvasti laajaan toimittajaverkostoon, joka takaa kapasiteetin joustavuuden. WIO toimittaa moottoreita sekä Ship Power- että Power Plants -liiketoiminnoille samoilta kokoonpanolinjoilta, joka mahdollistaa synergioita tuotantoprosessissa ja T&K:ssa.

Keskinopeiden päämoottorien tuotanto on keskitetty kahteen toimituskeskukseen Suomessa ja Italiassa. Hidaskäyntiset päämoottorit ovat erittäin suurikokoisia ja siksi vaikeita kuljettaa, minkä vuoksi ne valmistetaan lisenssillä lähellä telakoita Aasiassa, Euroopassa ja Etelä-Amerikassa. /6/

1.5 Toimittajaverkosto

Wärtsilällä on maailmanlaajuisesti noin 200 keskeistä toimittajaa ja toimittajaverkosta kehitetään jatkuvasti. Hankintastrategiana on keskittää yhteistyö huolellisesti valituille toimittajille, joiden valinnassa pääkriteereitä ovat suorituskyky, innovatiivisuus ja sijainti lähellä valmistusyksiköitä. /6/

1.6 Wärtsilän missio, visio ja strategia

1.6.1 Missio

Wärtsilä missiona on toimittaa ratkaisuja, jotka tukevat asiakkaiden liiketoimintaa tuotteen koko elinkaaren ajan. Samalla tavoitteena on kehittää yhä parempia teknologioita, joista hyötyvät sekä asiakkaat että ympäristö. /6/

1.6.2 Visio

Wärtsilän visio on olla kaikkien asiakkaittensa arvostetuin kumppani. /6/

1.6.3 Strategia

Wärtsilän tavoitteena on olla johtava toimittaja koko elinkaaren kattaville voimaratkaisuille maailmanlaajuisilla merenkulun markkinoilla ja valituilla energiamarkkinoilla ympäri maailmaa. Wärtsilä näkee kasvumahdollisuuksia kaasuvoimalaitoksissa Smart Power Generation -konseptiimme perustuen sekä kaasukäyttöisissä moottoreissa ja niihin liittyvissä järjestelmissä merenkulun markkinoilla. Wärtsilä tavoittelee myös kasvua ympäristöratkaisuissa, rikkipesurit ja painolastiveden käsittelyjärjestelmät mukaan lukien. Vahvuutena on teknologinen johtajuus, integroitu tuote- ja huoltojen tarjoaminen, läheiset ja pitkäaikaiset asiakassuhteet sekä ylivertainen maailmanlaajuinen kattavuus. Tuotanto- ja toimitusketjun hallintotoiminto palvelevat molempia loppumarkkinoita ja tavoitteena on löytää jatkuvasti tapoja ylläpitää kustannustehokkuutta ja korkeaa laatua. Tämä tapahtuu usein yhteistyössä johtavien teollisuuspartnerien kanssa merkittävimmillä kasvumarkkinoilla. T&K-toiminto luo myös synergiaetuja ja auttaa Wärtsilää pysymään alan teknologian ja innovoinnin edelläkävijänä. Wärtsilä pyrkii hyötymään kasvumahdollisuuksista loppumarkkinoilla ja säilyttämään samalla vakaan kannattavuuden. /6/

1.6.3.1 Power Plants

Strateginen tavoite on kasvaa sähkölaitosten suurten kaasuvoimaloiden markkinoilla kehittämällä aktiivisesti valikoituja kohdemarkkinoita ja vaikuttamalla niihin, osoittamalla korkeimpaan hyötysuhteeseen sekä ylivoimaisen joustavaan käytettävyyteen perustuvan arvolupauksen ylivertauuden. Tavoitteena on säilyttää johtava asema raskasöljyvoimaloissa. Tavoitteeseen voidaan päästä vahvistamalla edelleen arvolupausta johon sisältyvät taattu suorituskyky, korkea hyötysuhde ja ainutlaatuinen joustavuus sekä polttoaineessa että operoinnissa. Power plants hakee kasvua myös öljy- ja kaasuteollisuuden voimantuotannon, pumppausasemien sekä kompressoriasemien markkinoilla sekä ydinvoimaloiden varavoimantuotannon sovelluksissa. Mahdollisuus käyttää monia eri polttoaineita moottoreissa tukee kasvua uusiutuvia polttoaineita käyttävien voimaloiden markkinoilla. Power plants keskittyy tuotteisiin ja projekteihin, jotka tuovat kiistattomia ympäristöetuja ja ovat taloudellisesti järkeviä. /6/

1.6.3.2 Ship Power

Wärtsilä Ship Power hakee kasvua orgaanisesti yritysostojen ja kumppanuuksien kautta. Tavoitteeseen voidaan päästä lisäämällä ratkaisujen suorituskyvyn ja käytettävyyden takaavien integroitujen elinkaariratkaisujen myyntiä varustamoille ja laivayhtiöille. Tämä kasvu voidaan toteuttaa tiiviisti Services-liiketoiminnan kanssa. Kasvua tukee olennaisesti myös johtavan aseman säilyttäminen laivanrakennusteollisuuden järjestelmäintegraattorina sekä aseman vahvistaminen offshore-asiakkaiden järjestelmäintegraattorina. Erittäin tärkeää on myös jatkaa panostuksia läsnäolon vahvistamiseen sekä tuotteiden ja myyntiprosessien kilpailukyvyn maksimointiin, etenkin tärkeimmillä laivanrakennusalueilla, kuten BRIC-maissa ja Etelä-Koreassa. /6/

1.6.3.3 Services

Services-liiketoiminnassa tavoitteena on maksimoida osuus merenkulun ja voimalaitosten huoltomarkkinoista. Palvelutarjontaa ja prosesseja kehitetään, jotta voidaan kustannustehokkaasti tarjota parempaa lisäarvoa asiakkaille. Yhteistyössä asiakkaiden kanssa luodaan elinkaarioptimoituja ratkaisuja, jotka tehostavat asiakkaiden toimintaa ja parantavat sen kannattavuutta. Asiakkaille tarjotaan syvälliseen osaamiseen perustuvia logistiikkapalveluja, teknistä tukea ja kenttähuoltopalveluja globaalisti 24 tuntia vuorokaudessa viikon jokaisena päivänä. Tarjontaan sisältyy myös pitkälle kehitetty valikoima erilaisia sopimuksia, ja asiakkaille pystytään toimittamaan muuttuviin tarpeisiin vastaavia huoltoprojekteja. Tarjontaa laajennetaan ja markkinaosuutta vahvistetaan myös yritysostojen kautta. Palveluratkaisut ja uusien laitteiden myynti yhdistetään asiakkaiden erityistarpeet täyttäväksi elinkaariratkaisuiksi. Kilpailuasemaa lujittaa merkittävästi se, että Services on markkinoiden ainoa toimija, joka pystyy yksinään tarjoamaan näin laajan ratkaisupalikoiman. /6/

1.6.3.4 Wärtsilä Industrial Operations

Wärtsilä Industrial Operations keskittyy pääasiassa tuotteiden kokoonpanoon, koeajoon ja viimeistelyyn. Toimintamalli perustuu vahvasti laajaan toimittajaverkostoon, joka takaa kapasiteetin joustavuuden. Keskeistä on toiminta lähellä asiakasta sekä teknologiajohtajuutemme jatkuva painottaminen T&K -toiminnassamme. /6/

Wärtsilä Industrial Operations suunnittelee ja valmistaa integroituina toimituksina moottoreita, generaattoriaggregaatteja, sähkö- ja automaatiojärjestelmiä sekä integroitua ympäristösuorituskykyä ja hyötysuhdetta parantavia tuotteita ja järjestelmiä, potkureita, vaihteistoja, tiivisteitä ja laakereita. /6/

1.7 Ympäristövastuu

Wärtsilän päätavoite on toimittaa voimaratkaisuja, joiden hyötysuhde on korkea ja ympäristökuormitus vähäinen. Wärtsilä pyrkii jatkuvasti parantamaan tuotteiden ja palvelujen ympäristösuorituskykyä sekä säilyttämään teknologiajohtajuuden hyödyntämällä uutta tekniikkaa ja tekemällä yhteistyötä asiakkaiden ja muiden sidosryhmien kanssa. Näin mahdollistetaan kansainvälisten ympäristövaatimusten ja -suositusten tiukentuminen. /6/

1.8 Sosiaalinen vastuu

Wärtsilä toimii hyvänä yrityskansalaisena kaikkialla missä yhtiö toimii. Liiketoiminta ja sidosryhmäsuhde perustuvat toimintaperiaatteisiin (Code of Conduct). Wärtsilä on vastuullinen työnantaja ja pyrkii tarjoamaan henkilöstölle mielenkiintoisen ja innostavan työpaikan, jossa vallitsevat avoimuus, toisten kunnioitus, luottamus, tasa-arvo sekä mahdollisuudet henkilökohtaiseen kehittymiseen. Tavoitteena on myös tarjota työolosuhteiltaan turvallinen työpaikka työntekijöille ja sopimuskumppaneille sekä minimoida tuotteiden ja palvelujen käyttöön liittyvät terveys- ja turvallisuusriskit. Toimitusketjun hallinta ja kehittäminen ovat olennainen osa toimintaa. /6/

2 JOHDANTO

Viime vuosina tapahtuneiden onnettomuuksien ja luonnonmullistuksien takia on ydinvoimaloissa alettu vaatia entistä parempaa turvallisuuden valvontaa ja toimintaa. Apulaitteet eivät saa missään tapauksessa heikentää ydinvoimalaitoksen turvallisuutta, vaan niiden tehtävänä on tukea laitoksen toimintaa myös huonoimmissa olosuhteissa ja edesauttaa laitoksen turvallista alasajoa tarvittaessa. Dieselgeneraattorit ja niiden apulaitteet ovat osaltaan avainasemassa varasähkön tuotannossa.

Hätädieselgeneraattoreiden (EDG) valmistusta valvotaan huomattavasti tiukemmin ja tarkemmin kuin tavallisten moottoreiden. Pelkästään dokumentaatio ja toiminta on oltava hyvin selkeä alkaen toimittajien auditoinneista, jatkuen valmistuksessa jatkuvaan laadun tarkkailuun sekä päättyen koeajoon ja toimitukseen. Mitään poikkeamia sovitusta asioista ei suoraan sallita, vaan ne on aina ennalta hyväksyttävä loppuasiakkaalla. Tämä aiheuttaa tiettyjä muutoksia valmistuksessa ja asenteissa. Tämä onkin osa tuotteen valmistuksen ongelmaa, koska eri toimijoilla ja eri maissa on usein eri käsitys laadun ja laadunhallinnan vaatimuksista. Ydinvoimalatoiminnassa on kuitenkin oltava varma tuotteen toiminnasta ja laadusta, joten pyrkiminen ja varmistaminen tuotteen toimimiseen ja pitkäikäisyyteen on huomioitava alusta asti.

Ydinvoimalalaitoksissa on otettava huomioon myös tuotteiden sijainti. Hätädieselgeneraattorit itsessään eivät sijaitse ydinvoimalan päärakennuksessa, vaan ne on sijoitettuna laitoksen ydintilan ulkopuolisiin rakennuksiin (mild environment), joita on eri puolilla ydinvoimalaitoksen aluetta. Hätädieselgeneraattoreita on yleensä 2–4 erillistä yksikköä. Näiden ympäristöolosuhteet poikkeavat niin, ettei radioaktiivisen säteilyn aiheuttamaa vanhenemista tarvitse ottaa huomioon. Auringon aiheuttama säteily sekä muut ulkoiset rasitukset, kuten kosteus, lämpötila, pakkanen ja tärinä sen sijaan vaikuttavat rakennuksen vanhenemiseen, joten myös itse generaattorirakennuksenkin kunnossapito on oltava ajan tasalla. Normaalisti lämpötilan kyseisissä tiloissa arvioidaan olevan enintään +50 °C. /9/

Ydinvoimalan luvanhaltijalla on oltava ikääntymisen hallintaa varten ohjeistetut menettelytavat, jotka perustuvat laitoksen johtamisjärjestelmään. On määritettävä ikääntymisen hallintaohjelma ja organisaatio, johon on katettava turvallisuudelle tärkeät laitokset koko laitoksen eliniän ajan. Luvanhaltijan on pidettävä tallessa alkuperäiset suunnitteluasiakirjat, kelpoistustiedot, valmistuksen dokumentit, käyttöhistoriatiedot, kunnossapitohistoria sekä tiedot tehdyistä muutoksista. Luvanhaltijan toimia valvoo myös säteilyturvakeskus. /9/

Ikääntymisen testaamisessa ei voida ottaa huomioon pelkästään yhtä osa-aluetta, vaan yleensä ikääntymiseen liittyy käytetty teknologia sekä useita eri rasituksia yhtä aikaa, kuten lämpötila, värinä ja säteily. Näiden hallitseminen yhdessä on hankalaa, jopa osin mahdotonta. Onkin pyrittävä löytämään kompromissi sille, mikä on heikoin osa-alue käytössä ja pyrittävä käyttämään sitä tietoa hyväksi. On myös hyvä tehdä tuotteelle kestoikätestauksia siten, että tuote itsessään ei hajoa, vaan voidaan myös siten todeta tuotteen kestävyys ja toiminta käytettävässä maksimilämpötilassa. Näin voidaan luoda toimiva ylläpitojärjestelmä ja huoltosuunnitelma, jolla turvataan tuotteiden toiminta oletetun elinkaaren ajan.

On oletettu, että alle 10 asteen lämpötilan nousu puolittaa materiaalin kestoiän. Samoin lämpötilan lasku alle 10 asteella kaksinkertaistaa materiaalin kestoiän. Määrätyillä materiaaleilla, esimerkiksi eristemateriaaleilla, tämä pitääkin paikkansa melko hyvin. Voidaanko yleisesti tätä laskentatapaa kuitenkin täysin noudattaa? Yleisenä alkutietona orgaanisille materiaaleille voidaan kyllä, synteettisille materiaaleille harkinnan mukaan.

Ydinvoimalaitosten varavoimajärjestelmien suunnitteluperusteena käytetään tyypillisesti 20...60 vuoden teknistä elinikää, johon vaikuttavat sekä komponentit että vallitsevat olosuhteet. Koska uusia tuotteita harvoin on voitu koestaa koko elinikää vastaavaa aikaa, on tuotteiden tekninen elinikä jotenkin kyettävä muulla tavalla mallintamaan tai todistamaan.

Osana varasähköjärjestelmän prosessia on arvioitava myös edellä mainittuihin järjestelmiin kuuluvien komponenttien elinikää joko kokeellisesti, analysoimalla tai käyttökokemuksin. Mikään menetelmä yksinään ei tuota riittävää tietoa, vaan tietoa on hyvä saada usealla eri tavalla, jolloin voidaan varmistua tiedon oikeellisuudesta. Ikääntymiseen vaikuttavat esimerkiksi lämpötila, jännite, säteily, kosteus ja värinä. Nämä asiat on hyvä ottaa huomioon arvioitaessa tuotteen kestoikä.

Analyysimenetelmää voidaan hyödyntää joko ikääntymiskokeiden tulosten tai käyttökokemusten sovittamisessa käyttöympäristöä vastaaviin olosuhteisiin. Ikääntymiskokeilla on määritetty tuotteiden ja ympäristörasitusten välille ikääntymistä kuvaavia yhtälöitä, Arrheniuksen yhtälöt näistä tunnetuimpana.

Kestoiän arviointi on entistä tarpeellisempaa. Kesto- ja käyttöiän arviointia tarvitaan muun muassa silloin, kun suunnitellaan huoltojen ajoitusta ja myytäessä tuotetta. Loppuasiakas kuitenkin arvostaa pitkäikäistä tuotetta, jolla on selkeä huolto-ohjelma. Tämä auttaa heitä ymmärtämään kustannussuunnittelua paremmin. Tavoitteena on saada luotettavaa tietoa varavoimadieselmoottoreissa käytettävien komponenttien kestoikästä ja luoda menettelytavat sekä kirjallinen kuvaus matemaattisten mallien hyödyntämisestä myöhempää käyttöä varten.

3 HÄTÄDIESELGENERATTORI

Vaatimuksena ydinvoimaloiden osalta on usein se, että tuotteiden on oltava vakiotyyppisiä, joilla on jo viranomaisista riippuva riittävä ja dokumentoitu historia takanaan. Tällä pyritään varmistamaan tuotteen luotettavuus sekä huollon toiminta ja varaosien saanti koko elinkaaren ajan. Uusien innovaatioiden mukaantuloa ei usein hyväksytä, vaikka ne olisivatkin hyviä, samasta syystä johtuen. Tämä helpottaa osaltaan tuotteen valmistusta, koska usein on jo olemassa varmennettua ja dokumentoitua tietoa tuotteista ja niiden kestävydestä. Dokumentointi onkin ala, johon on tulevaisuudessa panostettava enemmän.

Hätädieselgeneraattorit koostuvat dieselmoottorista sekä siihen liitetystä generaattorista apulaitteineen. Wärtsilä käyttää muun muassa 16V32EDG-mallia, jossa on 16 sylinteriä v-muodostelmassa, jossa jokaisen sylinterin halkaisija on 320 mm. Sähkötehoa moottori tuottaa olosuhteista ja viritysteesta riippuen noin 7100 kW, hyötysuhteen ollessa noin 45 %. Generaattori on tapauskohtainen ja sovitetaan yksilöllisesti dieselmoottoriin yhteisellä alustalla. Alustan on oltava rakennettu siten, että se resonoi eri taajuudella kuin moottori. Joissain tapauksissa asiakas voi halutessaan määrittellä generaattorin toimittajan, mikä saattaa aiheuttaa joitain ongelmia yhteensovittamisessa.

Kriittisiä osia ikääntymisen kannalta ovat kaikki orgaaniset ja polymeereistä valmistetut tuotteen osat, kuten tiivisteet, eristemateriaalit, piirikortit ja erinäisten tuotteiden runkomateriaalit. Verrattuna metalleihin näiden elinkaari on huomattavasti lyhyempi, joten seurantaan on syytä panostaa ja valvoa erityisesti tuotteiden laatua ja valmistusta. /7/

4 IKÄÄNTYMINEN

Tuotteiden teknisen eliniän voidaan katsoa olevan suoraan riippuvainen niiden materiaaleista, käyttölämpötilasta, käyttöympäristöstä, käytöstavasta ja käyttäjasta. Vääränlaisella käytöllä voi tuotteiden elinikä lyhentyä hyvinkin nopeasti johtuen materiaalien väsymisestä ennen aikojaan.

Ikääntyminen voidaan jakaa mekaaniseen, kemialliseen ja teknologiseen ikääntymiseen.

Fyysinen eli mekaaninen vanheneminen (physical degrading) tarkoittaa rakenteellisten tai toiminnallisten ominaisuuksien palautumatonta heikentymistä erilaisten mekanismien takia. /9/

Näitä ovat muun muassa jatkuva hidaskiteytyminen, korkeat lämpötilat sekä lämpötilanvaihtelut. Nämä aiheuttavat epäjatkuvuuskohtia materiaalin rakenteeseen, jotka puolestaan lisäävät materiaalin altistumisherkkyyttä erilaisille sähköisille vanhenemis- ja vaurioitumisprosesseille. Myös lämpötilan vaihtelun aiheuttamat lämpölaajenemiset aiheuttavat materiaalin sisäisiä jännityksiä. /8/

Kemiallinen vanheneminen voi aiheuttaa depolimerisaatiota ja siltautumista, joissa polymeeriketjut katkeilevat tai siltautuvat ketjureaktiomaisesti. Tämä muuttaa materiaalin ominaisuutta. /8/

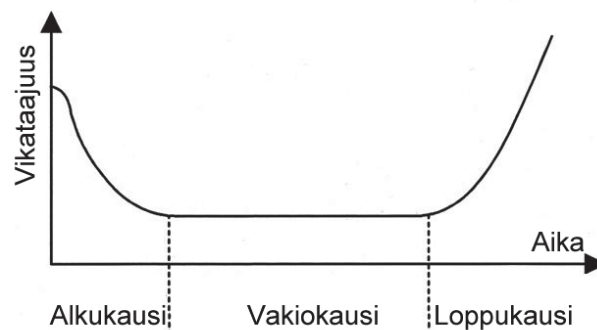
Useimmiten vanhenemiseen vaikuttaakin mekaanisten, kemiallisten ja sähköisten ilmiöiden yhteisvaikutus.

Teknologinen ikääntyminen (obsolescence) on osan tai tuotteen vanhenemistä siten, että se ei vastaa voimassa olevia turvallisuusvaatimuksia tai edusta vallitsevaa teknistä kehitystä. Tuen tai varaosien puute on myös osa teknologista ikääntymistä. /9/

5 LUOTETTAVUUS

Joillekin laitteille on luotu luotettavuusteorian avulla vikataajuuksia (**Taulukko 1.**). Kokonaisluotettavuus riippuu materiaaleista ja komponenttien lukumääristä tuotteessa. Mitä useampia samantyyppisiä komponentteja laitteessa on, sen korkeampi on sen vikaantumisaste.

Laitteella on 3 erilaista kautta vikaantumisessa (**Kuva 1.**). Ensimmäinen kuvaa aikaista vioittumista, joka ilmenee yleensä ensimmäisen vuoden aikana. Tänä aikana vikaantumistaajuus on tiheämpi, ja silloin ilmenevät juotosvirheet, materiaali- ja valmistusvirheet. Toinen vikaantumisjakso on vakiokausi, jona aikana ikä ei vaikuta vikataajuuteen vikaantumistaajuuden pysyessä vakiona. Tämän jakson pituus riippuu suunnittelun laadusta ja käyttöolosuhteista. Viimeisenä aikana käyttökelpoinen elinikä laskee, jolloin vikaantumistaajuus jälleen kasvaa johtuen laitteiden materiaalin vanhenemisesta. Tätä voidaan myöhäistää ja loiventaa hyvän ennakkoinnin ja huoltosuunnittelun avulla tai aikaistaa jättämällä huollot tekemättä. /3, 2/



Kuva 1. Kylpyammeikäyrä

Taulukko 1. Vikataajuudet, esimerkkejä

Komponentti	Tyyppi	Vikataajuus, $1/10^6\text{h}$
Vastus	Massa	0,05
Kondensaattori	Elektrolyytti	1,5
Puolijohde	Tehotransistori	0,8
Liitos	Juotos	0,01

6 IKÄÄNTYMISTÄ AIHEUTTAVIA RASITUKSIA

Sähköisissä komponenteissa on erilaisia ikääntymismekanismeja verrattuna tavanomaisiin materiaaleihin. Seuraavaksi käydään läpi muutamia yleisimpiä komponenttien ikääntymistä aiheuttavia rasituksia.

6.1 Sähköinen ikääntyminen

Jänniterasitus ja erityisesti nimellisjännitteestä poikkeava ylijännite aiheuttaa eristeen läpilyöntilujuuden alenemista, esimerkkinä elektrolyytti-kondensaattoreiden ennenaikainen vaurioituminen. Yhdessä lämmön vaikutuksen ja osittaispurkausten kanssa se aiheuttaa eristemateriaalien sähkölujuuden heikkenemisen. Samoin liian suuri oikosulkuvirta ikäännyttää vikatapauksissa eristemateriaalia nopean lämpötilan nousun ja mekaanisten rasitusten myötä. Kestoikä riippuu kuorman virrasta ja lämpenemästä. Suurempi kuorma rasittaa enemmän ja sitä kautta lyhentää tuotteen elinikää. Tämä on vältettävissä huolellisella suunnittelulla sekä jännitelähteiden ja tuotteiden valinnalla. Sähköisen ikääntymisen mekanismit ovat huonosti tunnettuja. Ilmiö esiintyy eristemateriaaleissa. Tutkittaessa materiaaleja, juuri läpilyönnin katsotaan tarkoittavan eristeen eliniän päättymistä. Varsinkin polymeerimateriaalien vanhenemisessä on kyseessä jänniterasitusten sähköinen vanheneminen. /8, 9/

Hyvä esimerkki on hehkulamppujen elinikä. Hehkulamput on aikanaan suunniteltu 220 V jännitteelle. Kun jännite sitten muutettiin 230 V tasolle yhteiseurooppalaiseen muotoon, laski lamppujen kestoikä puoleen, koska ylijännite nousi noin 5 %. Tämä muutos aiheuttaa hehkulampun kestoian lyhentymisen. Onko muutosta tehty valmistajien osalta sen jälkeenkään? Toisaalta onhan eräällä palolaitoksella hehkunut lamppu jo vuosikymmeniä, joten alijännite ei ikäännytä läheskään yhtä nopeasti kuin ylijännite.

6.2 Diffuusio

Diffuusio-ilmiössä molekyylit pyrkivät siirtymään väkevämmästä seoksesta laimeampaan tasoittaen pitoisuseroja. Esimerkiksi sokerin sulautuminen kahviin on esimerkki diffuusiosta. Sähkötekniikassa liitoksen kuumentamisen myötä diffuusion aiheuttama liitoksen mikrorakenteen muutos johtaa sekä liitoksen sähkönjohtavuuden että mekaanisten ominaisuuksien huononemiseen. Tällöin liitos löystyy eikä kykene enää johtamaan yhtä hyvin. Tämä ilmiö esiintyy useimmiten laitteiden juotoksissa. /9/

6.3 Hajavirrat

Hajavirrat aiheuttavat korroosioon verrattavien kulumisien lisääntymistä. Tästä hyvänä esimerkkinä on laakerivirtojen kuluttava vaikutus moottorikäytöissä, jotka ilmenevät useimmiten taajuusmuuttajakäyttöjen yhteydessä. Nopeasti nousevat jännitepulssit aiheuttavat suuritaajuisia virtapulsseja, jotka syövät laakerin runkopintaa kipinätyöstön tavoin. Tällöin ilmestyy laakerin rungon sisäpinnalle pyykkilautaa muistuttava kulumakuvio. Ilmiö esiintyy useimmiten moottoreissa ja teräsrakenteissa korroosiota lisäävänä ilmiönä. /9/

6.4 Lämpöikäntyminen, -haurastuminen

Lämpö aiheuttaa eristemateriaalin kemiallisten, sähköisten ja mekaanisten ominaisuuksien heikkenemistä. Lämpöhaurastumisen aiheuttajia ovat yleensä ympäristön korkea lämpötila, lämpövuorottelu ja paikalliset pistemäiset lämpöpaikat. Lämpötilan nousua aiheuttavat muun muassa häviöt ylimenovastuksissa, virtalämpöhäviöt sekä dielektriset häviöt. Yleensä normaalia huonelämpötilaa korkeammat lämpötilat aiheuttavat lämpöhaurastumista, varsinkin orgaanisissa materiaaleissa. Tämän vaikutuksia ovat muun muassa materiaalin haurastuminen, halkeilu, muutokset aineen ominaisuuksissa ja värin muutokset. Orgaaniset eristemateriaalit ovatkin helposti haurastuvia materiaaleja korkeissa lämpötiloissa. Terminen väsyminen, joka johtuu lämpötilan jatkuvasta vaihtumisesta, aiheuttaa myös vaihtokuormitusta, joka johtaa aineen väsymiseen. Ilmiö esiintyy useimmiten eristemateriaaleissa. /9/

Lämpövanhenemista tapahtuu tasaisesti laajoilla alueilla eristeessä. Orgaanisilla materiaaleilla tämä ilmenee hapettumisena hapen vaikutuksen vuoksi. Korkeissa lämpötiloissa reaktioiden todennäköisyys kasvaa. Synteettisissä aineissa polymeerit polymeroituvat lisää, mikä johtaa koon muutoksiin ja materiaalin haurastumiseen. Myös happoja tuottavia kemiallisia reaktioita voi tapahtua. /8/

Ilmajohdot on tunnettu esimerkki lämmön ja sen vaihtokuormituksen vaikutuksesta. Kesällä korkeassa lämpötilassa kaapelit roikkuvat hyvinkin löysinä, kun taas talvella, kovilla pakkasilla, kaapelit ovat melkein suorina. Tämä aiheuttaa räsitusta materiaaleihin, mikä on huomioitava sekä suunnittelu- että rakennusvaiheessa.

Sähkömoottorit on toinen hyvä esimerkki lämmön vaikutuksesta. Käyttö mitoitetaan yleensä jatkuvaan käyttöön normaalilämpötilassa. Varajärjestelmissä taas niiden käyttö saattaa olla hyvinkin poikkeuksellista, vaikka ne mitoitetaan normaaliin jatkuvaan käyttöön. Käynnistykset voivat olla hyvinkin säännöllisiä pitkillä käynnistysväleillä normaaleissa testikäynnistyksissä, mutta todellisessa tilanteessa on niiden toimittava poikkeuksellisessa ympäristössä yhtäjaksoisesti useita tunteja riippuen kohdemaan säännöksistä. Näin ollen on laskettava vastaava toiminta normaaliolosuhteissa, mutta myös vastaava jatkuva käyttö suurimmalla mahdollisella rasituksella, suurimmassa mahdollisessa ympäristön lämpötilassa, jolloin moottorin lämpötila voi nousta hyvinkin poikkeavaksi normaalikäyttöön verrattuna. Tällöin niiden eristyksien elinikä vastaavasti lyhenee.

6.5 Mekaaninen ikääntyminen

Mekaanista ikääntymistä lisäävät muun muassa värähtelyt, veto, vääntö, lämpölaajeneminen, lämpökutistuminen ja huolloista aiheutuva kuluminen. Lisäksi mekaanista ikääntymistä lisäävät kytkentä- ja katkaisuhetkellä tapahtuvat kytkentävirtasysäykset, jotka voivat normaalitilanteeseen verrattuna olla pahimmillaan moninkertaisia nimellisvirtaan verrattuna. Materiaalin sitkeys ja lujuus heikkenevät jatkuvan muutoksen seurauksena. Tärinä aiheuttaa myös muita vaaratilanteita. Liitokset löystyvät, mikäli niitä ei ole oikeaoppisesti tehty. Sähkömekaaniset releet kuluvat jokaisella kytkentä- ja katkaisukerralla. Niiden kestoiksi valmistajat ilmoittavat yleensä 10 000 ... 1 000 000 kytkentäkertaa nimelliskuormalla. Myös kolhut ja kovat iskut voivat aiheuttaa materiaaleihin halkeamia. Varsinkin keraamiset aineet ovat heikosti iskunkestäviä materiaaleja. Ilmiö esiintyy useimmiten eristemateriaaleissa ja kontaktoreissa. /9/

6.6 Hapettuminen

Hapettuminen on hallitseva ikääntymismekanismi polymeereissä. Näiden haurastuessa eristeen mekaanisen halkeamisen todennäköisyys lisääntyy, varsinkin mikäli samaan aikaan niihin vaikuttaa jokin mekaaninen vääntö tai muu vastaava ilmiö. Näin tapahtuessa kosteuden pääseminen eristyksen läpi helpottuu ja eristyskyky heikkenee. Kosketuspintojen hapettuminen aiheuttaa toisaalta omalta osaltaan ongelmia. Esimerkiksi, mikäli relettä tai muuta vastaavaa kytkintä ei käytetä pitkiin aikoihin, kuten varajärjestelmien kohdalla usein on, aiheuttaa metallipintojen hapettuminen impedanssin kasvua, joka saattaa aiheuttaa sen, etteivät ne välttämättä kykenekään toimimaan tarvittaessa, koska luotettavaa kytkentää ei saada syntymään. Ilmiö esiintyy eristemateriaaleissa sekä katkaisija- ja relekontaktoreissa. /9/

6.7 Kosteus

Kosteus aiheuttaa ikääntymistä oikosulkujen ja materiaalin kulumisen muodossa. Varsinkin vanhoissa eristeissä kosteus pääsee tunkeutumaan eri säröjen ja halkeamien kautta aiheuttaen vuotovirtoja. Kosteus edesauttaa täten vuotovirtojen siirtymisen maahan aiheuttaen maasulkuja sekä häiriöitä järjestelmissä. Kosteus on osatekijänä myös kemiallisessa ikääntymisessä ja korroosiossa. Kosteus yhdessä osittaispurkausten kanssa muodostaa typpihappoa, mikä lisää eristeen kulumista. Ilmiö esiintyy useimmiten eristemateriaaleissa. /9/

6.8 Säteily

Säteily voidaan jakaa kahteen kategoriaan; ionisoivaan ja ionisoimattomaan säteilyyn. Ionisoivaa säteilyä on ydinreaktiossa syntyvä radioaktiivinen säteily, joka pystyy atomiin osuessaan irrottamaan ionin ja siten aiheuttaa eristemateriaalien haurastumista. Ionisoimatonta säteilyä taas on muun muassa auringon aiheuttama ultraviolettisäteily, radioaallot ja infrapunasäteily. Säteily yleisesti katkoo polymeeriketjuja, jolloin polymeerit haurastuvat. Ultraviolettisäteilyä voidaan saada muun muassa loisteputkivalaisimista. Muoveissa voidaan käyttää UV-stabilointiainetta, jonka 0,5...3,5 painoprosentin osuus kasvattaa ulkotiloissa pidettävien muovien kestoikää. Materiaalin lujuus kasvaa ja sitkeys pienenee materiaalin altistuessa neutronisäteilylle. Materiaalin puhtaus vaikuttaa säteilyn haurastuttavaan vaikutukseen parantavasti. Haurastumista esiintyy useimmiten eristemateriaaleissa. /9/

6.9 Whiskerit

Whiskerit ovat tietyn tyyppisissä metalleissa, pääasiassa pehmeissä materiaaleissa (sinkki, tina, hopea) ilmenevä ilmiö, jossa metallien pinnoille kasvaa ohuita viiksimäisiä johteita, jotka johtavat oikosulkuun. **(Kuva 2.)**



Kuva 2. Mikroskooppikuva whiskereistä

Whiskereiden syntymekanismia ei vielä täysin tunneta. Whiskerit ilmenevät useimmin lämpötiloissa 50 °C...90 °C kosteusprosentin ollessa yli 75 %. Tämä voi ilmetä useimmiten sähkökaapeissa, kouruissa sekä suurissa releissä. /9/

6.10 Ympäristö

Ympäristö vaikuttaa myös materiaalien kestävyys. Kosteus, lika, pölyt, öljyt ja muut epäpuhtaudet aiheuttavat muun muassa sen, että materiaalien pinnalle kertyvä epäpuhtaus estää lämmön siirtymisen pois, jolloin materiaalien sisäinen materiaali lämpenee. Vanhoissa eristeissä epäpuhtaudet pääsevät tunkeutumaan eri halkeamien, huokosten ja säröytymien kautta aineen sisälle edesauttaen vuotovirtojen ja läpilyöntien syntymiseen.

6.11 Yleistä

Yleensä kaikki mekanismit, kuten lämpövanheneminen, sähköiset rasitukset ja mekaaniset rasitukset, vaikuttavat yhdessä eristeen ikääntymiseen. Laskennallisesti yhteisvaikutusta on vaikea määrittää. /8/

7 ERISTYSVIAT

Suurin osa vioista ilmenee eristyksen pettämisen yhteydessä. Seuraavassa kappaleessa hieman eristyksen ominaisuuksista.

Eristyksen tarkoituksena on tukea mekaanisesti jännitteisiä osia sekä luotettavasti eristää jännitteiset osat muusta laitteistosta. Näitä ominaisuuksista kutsutaan mekaaniseksi lujuudeksi sekä sähkölujuudeksi. Myös lämpötilan kesto on usein avainasemassa valittaessa oikeaa eristysmateriaalia. Lämpötilan kesto-ominaisuutta kutsutaan termiseksi lujuudeksi. /8/

Yleensä materiaaleille ilmoitetaan lämpötilaindeksi TI (Temperature index), jossa materiaali kestää määrätyn ajan, yleensä 20000 h. Toinen suure on puoliintumisaikaväli HIC (Halving interval). Näiden yhteenlaskettu arvo (TI+HIC) ilmoittaa lämpötilan, jossa eristeen kestoikä puolittuu siitä lämpötilasta, mikä on TI-lämpötilassa. Jokaisen eristeen määrättyä ominaisuutta, esimerkiksi mekaanista lujuutta, seurataan lämpövanhenemisen yhteydessä. On myös määritettävä, missä arvossa eriste katsotaan vanhentuneeksi. Suositeltu arvo on 50 % heikentyminen alkuperäisestä. /8/

Eristeet voidaan jakaa karkeasti orgaanisiin eristeisiin, epäorgaanisiin eristeisiin ja synteettisiin polymeereihin. Synteettisten polymeerien ryhmä kasvaa koko ajan. Eristyskyky ja lämpötilaindeksi riippuvat paljolti niin perusaineista kuin seosaineista, jolla kestävyyttä ja käyttäytymistä voidaan muokata. /8/

Orgaaniset materiaalit ovat yleensä helppoja käsitellä ja muokata, mutta haittapuolena ovat vanheneminen sekä nopea ominaisuuksien heikentyminen lämpötilan ylittäessä 100 °C. Orgaaniset materiaalit ovat huokoisia ja kyllästäytyvät helposti imiessään nesteitä itseensä. Esimerkiksi paperi kuuluu näihin materiaaleihin. Sitä käytetään laajalti muuntajien ja kondensaattorien eristeenä. /8/

Epäorgaaniset materiaalit kestävät paremmin yli 100 °C lämpötiloja, jopa 1000 °C asti. Näillä on myös paremmat sähköiset ja mekaaniset ominaisuudet. Haittapuolena on heikompi työstettävyys. Esimerkiksi lasi ja keraamit ovat näitä materiaaleja. Kiilteitä käytetään pyörivien koneiden uraeristyksissä osittaispurkausten hyvän sietokyvyn takia. /8/

Synteettisiä polymeerejä ovat kaikki teollisesti valmistetut kiinteät eristeet. Niillä on erinomaiset sähköiset ominaisuudet ja niitä on helppo muokata. Nämä materiaalit voidaan jakaa kesto- ja kertamuoveihin. Toisin kuin kertamuovit, kestopuovien sulamislämpötila on 100 °C...120 °C. Yleensä kaikki pehmeät muovit, kaapelit ja kondensaattorit valmistetaan kestopuovista. Kertamuovit muokkautuvat lopulliseen muotoonsa lämpökäsittelyssä, eikä niitä voida muovata enää uudelleen. Mittamuuntajat ja eristeet ovat kertamuovista valmistettuja. /8/

Läpilyönnissä materiaalin sähkölujuus riippuu lämpötilasta, rasitusajasta ja jännitteen muodosta. Varauksenkuljettajien määrä kasvaa niin suureksi, että eriste menettää eristysominaisuutensa. Myös muut asiat, kuten häviöiden aiheuttama lämpeneminen, varauksertymien aiheuttamat voimat, sähkökemialliset reaktiot ja eroosio aiheuttavat lujuuden heikkenemistä. Mallintaminen on täten hyvin monimutkaista ja hankalaa. Kiinteissä eristeissä läpilyönti aiheuttaa aina eristyskyvyn menettämisen. /8/

Läpilyöntimekanismeja on useita. Yleisimmät ovat sähköläpilyönti, sähkömekaaninen läpilyönti, lämpöläpilyönti, osittaispurkausläpilyönti ja sähköpuuläpilyönti sekä vesipuu. Myös kosteus, kaasut ja materiaalin epäpuhtaus heikentävät sähkölujuutta. Mekaaniset rasitukset, kuten värinä, vääntö ja puristus heikentävät myös materiaalia. /8/

Kiihdytetyssä testauksessa jännitettä tai taajuutta nostamalla sekä muita rasituksia hallitusti lisäämällä haetaan sitä pistettä, jossa läpilyönti tapahtuu osittaispurkausten muodossa. Yliaaltojen vaikutus on huomioitava testien aikana.

8 MENETELMÄT

Miten voidaan varmistaa tuotteiden toimivuus vielä useiden vuosien jälkeen? Ilmasto, lämpötilan muutokset, värinät ja muut fysikaaliset ilmiöt kuluttavat ja haurastuttavat tuotteita. Ikääntymisen mallintamiseen on useita menetelmiä, joita yhdessä käyttäen voidaan havainnollistaa ja saada tietoa tuotteissa tapahtuvista muutoksista. Ei kuitenkaan kannata keskittyä tuotteisiin, joiden toiminta ei vaaranna toimivuutta, vaan on keskityttävä kriittisimpiin komponentteihin.

8.1 Analyysi

Tuotteen muutoksiin ajan mukaan on olemassa useita erilaisia laskentatapoja. Toiset perustuvat käyttökokemuksiin ja niistä saataviin arviointeihin eri käyttötavoilla, ja toiset perustuvat materiaalin ominaisuuksiin ja käyttäytymiseen ajan kuluessa sekä haurastumisprosessin ymmärtämiseen. Matemaattisia laskentatapoja edustavat Arrheniuksen ja Coffin-Mansonin kaavat lämpötilan vaikutuksen laskemisessa sekä MIL-STD-810F (2000) - standardi värinän analysoinnissa. On huomattava, että heikoimpia osia tuotteissa ovat yleensä muovit, kumit ja muut vastaavat orgaaniset, epäorgaaniset ja polymeeripohjaiset materiaalit, joten metallien sijaan on keskityttävä laskemaan näiden ikääntymistä.

8.2 Kiihdytetty ikärasitustestaus

Ikärasitustesteissä pyritään simuloimaan oikeita käyttöolosuhteita altistamalla tuote vastaavaan, mutta huomattavasti vahvempaan rasitukseen kuin normaalikäytössä. Tästä voidaan vetää tiettyjä johtopäätöksiä tuotteen todellisesta kestosta. On vain otettava huomioon, että rasituksen, esimerkiksi lämpötilan testauksissa, ei lämpötilan saa antaa nousta niin korkeaksi, että materiaalin ominaisuudet muuttuvat merkittävästi. Esimerkiksi metallien liiallinen kuumentaminen aiheuttaa niiden sulamisen, jolloin kestoikää ei voida enää arvioida.

Elinikätestauksia tarvitsevat materiaalin valmistajat, laitteiden valmistajat sekä loppukäyttäjät. Valitettavasti kattavien testausten tekeminen on kallista ja aikaa vievää. On pyrittävä tekemään useita toistuvia testejä eri aikaväleillä oikean tuloksen saamiseksi. Onkin pyrittävä suunnittelemaan testit niin hyvin kuin mahdollista, jolloin mahdollisimman kattavasti saadaan luotettavia tuloksia mahdollisimman pienillä kappalemäärillä. Usein pelkästään testin aloituslämpötilan valinta voi olla vaikeaa. /8/

Koekappaleiden on vastattava käytännössä käytettäviä materiaaleja, oltava samankokoisia ja olosuhteiden on jäljiteltävä mahdollisimman hyvin käytettäviä olosuhteita ympäristön, lämpötilan ja muiden rasitusten osalta. Suositeltavaa on, että pyritään noudattamaan maksimissaan 20 000 tunnin ja minimissään 5 000 tunnin lämpötilaindeksiä. /8/

Ongelmia testauksessa on uunien lämpötilan vakiona pysymisessä, jolloin reaktionopeus koekappaleissa vaihtelee. Mittaamisen tarkkuus on myös hankalaa. Uunin kaasujen koostumus saattaa muuttua myös testin aikana, mikä osaltaan myös vaikuttaa lopputulokseen. /8/

8.3 Käyttökokemukset

Ainoa varma tapa todeta tuotteen kestoikä on altistaa se oikeaan käyttöön käyttäen samoja ympäristöllisiä tekijöitä. Tämän tavan huono puoli on se, että ei ole useinkaan mahdollista odottaa vuosia tuotteen julkaisemista. Käyttökokeita voitaisiin käyttää, mikäli esimerkiksi käynnissä olevalta peruskuormalaitokselta saataisiin 6 000 ajotunnin käyttökokemus verrattuna hätävoimadieselgeneraattorin 150 tuntiin. Mikäli on olemassa tietoa vastaavasta tuotteesta, on se oikea tapa seurata tuotteen ikääntymistä. Tämä asia on johtanut siihen, että hätäadieselgeneraattoreiden käytössä pyritään käyttämään tuotteita, joiden valmistus on jo ollut pitkään toiminnassa ja niiden käyttäytyminen tunnetaan.

9 MATEMAATTINEN ANALYYSI

9.1 Lämpövanheneminen

Lämpövanheneminen eli tuotteen ikääntyminen lämmön vaikutuksesta on kemiallinen prosessi. Reaktioihin osallistuvien molekyylien keskinäisten törmäysten taajuus kasvaa lämpötilan kasvaessa. Arrhenius-kaavaa voidaan käyttää ikääntymisen laskemiseen (**Kaava 1**). Kaavassa olevalla aktivaatioenergialla kuvataan sitä energian määrää, joka tarvitaan aiheuttamaan sellainen reaktio materiaalissa, jolla aine alkaa sitoa lämpöä ympäristöstään (endothermic reaction). Mitä korkeampi aktivaatioenergia, sen hitaammin haurastuva materiaali on kyseessä. Aktivaatioenergia E voidaan joko laskea, jos jo tunnetaan molemmat lämpötilat, tai se voidaan materiaaleista riippuen hakea liitteen 1 tapaisesta ominaisuustaulukosta. /1/ /9/

$$AF = e^{\frac{E}{K} * (\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2})} \quad (1)$$

- AF = suhteellinen elinkaarikerroin
- e = Neperin luku
- E = aktivaatioenergia [eV]
- K = Boltzmannin vakio ($0,8617 * 10^{-4}$ [eV/K])
- T_1 = vertailulämpötila, yleensä suosituslämpötila [°K]
- T_2 = käyttölämpötila, keskiarvo käyttö- ja valmiustila-ajassa [°K]
- riittävä tarkkuus saadaan kaavalla 2.

$$T_2 = \frac{T_v * t_v + T_k * t_k}{t_{kok}} \quad (2)$$

- t_{kok} = kokonaisaika
- T_v = valmiusajan lämpötila
- T_k = käyttöajan lämpötila
- t_v = valmiusaika
- t_k = käyttöaika

Laskusta saatavan kertoimen avulla voidaan siten määrittää tuotteen kestoikä käyttöolosuhteissa käyttäen valmistajan lupaamaa tai testeillä todettua todellista kestoikää apuna.

Esimerkki

- materiaalin aktivaatioenergia on 0,8 eV
- valmistajan suosittelema käyttölämpötila on 85 °C
- todellinen käyttölämpötilan keskilämpötila 115 °C.

Suhteellinen elinkaarikerroin saadaan täten laskettua kaavalla 1.

$$AF = e^{\frac{E}{k} * (\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2})} = e^{\frac{0,8}{0,8617 * 10^{-4}} * (\frac{1}{85+273,15} - \frac{1}{115+273,15})} = 7,41$$

Kertoimeksi saadaan 7.41. Mikäli valmistaja lupaa tuotteen kestävän 500 tuntia lämpötilassa 85 °C, kestää se 115 °C lämpötilassa täten $\frac{500h}{7,41} = 67,4 h$.

Tämä laskutoimitus on suoritettava jokaiselle laitteen materiaalille, jolloin voidaan siten verrata, millä tuotteen osalla on heikoin kestoikä.

Arrheniuksen yhtälö perustuu alankomaalaisen kemistin Jacobus Henricus van Hoff:n vuonna 1884 esittämään kaavaan,, jonka ruotsalainen Svante Arrhenius selitti viisi vuotta myöhemmin.

9.2 Tärinä-ikäntyminen

MIL-STD-810F(2000)-standardissa on tapa laskea tärinän vaikutus tuotteen kestoikään joko käyttäen sinimuotoista tärinää kaavan 3 mukaan tai satunnaismuotoista tärinää kaavan 4 mukaan. /1/

$$\frac{g_1}{g_2} = \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^{\frac{1}{6}} \quad (3)$$

- g_1 = sinimuotoisen värinän taso 1 (g)
- g_2 = sinimuotoisen värinän taso 2 (g)
- t_1 = altistuksen kesto 1 (tunteja)
- t_2 = altistuksen kesto 2 (tunteja).

$$\frac{W_1}{W_2} = \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

- W_1 = satunnaistärinän taso 1 (g^2/Hz)
- W_2 = satunnaistärinän taso 2 (g^2/Hz)
- t_1 = altistuksen kesto 1(h)
- t_2 = altistuksen kesto 2 (h).

Esimerkki

Jos tiedetään tuotteen kestävän satunnaista 3*g tärinä-altistusta 60 tuntia, voidaan kaaviosta todeta tuotteen kestävän, kaavan 4 mukaan, 6*g tärinä-altistuksessa vain 3,75 tuntia.

$$\frac{3}{6} = \left(\frac{t_2}{60h}\right)^{\frac{1}{4}} \Rightarrow \sqrt[4]{\frac{3 \cdot 60^4}{6}} = 3,75 \text{ h}$$

9.3 Lämpövuorottelu

Coffin-Manson-malli laskee tuotteelle väsymiskäkerointa joko lämpövuorottelusta tai lämpöshokista. Tavoitteena on laskea kerroin tuotteelle, jota voidaan käyttää vertailtaessa tuotteen kestoikää eri taajuisissa ja eri lämpötilaisissa, toistuvatyypisissä käyttöympäristöissä kaavan 5 mukaan. Taulukossa 2 on esimerkkejä eri materiaalien materiaalienkohtaisista eksponenteista.

/1/

$$A = \frac{\text{Cycles/day}_{\text{Test}}}{\text{Cycles/day}_{\text{Use}}} * \left(\frac{\Delta T_{\text{test}}}{\Delta T_{\text{use}}} \right)^n \quad (5)$$

- A = väsymiskerroin
- Cycles/day_{Test} = jaksojen määrä testauksessa / päivä
- Cycles/day_{Use} = jaksojen määrä käytössä / päivä
- ΔT_{test} = lämpötilan vaihteluväli
- ΔT_{Use} = lämpötilan muutos käytössä
- n = materiaalienkohtainen eksponentti.

Taulukko 2 Materiaalieneksponentti (JEDEC; 122G)

Materiaali	n
sitkeät metallit, esimerkiksi juotosaine	1...3
kovat metalliseokset /yhdisteet	3...5
hauraat aineet (SI, eristeet SiO ₂ ja Si ₃ S ₄)	6...9

Esimerkki

Tuotteen kestoikää testataan jaksollisesti 25 kertaa päivässä 20 °C alkulämpötilassa, jolloin lämpötila nousee lämpötilaan 32 °C. Tällöin muutos, ΔT_{test} , on 12 °C.

Tuotetta käytetään normaalisti 2 kertaa päivässä 40 °C alkulämpötilassa, jonka aikana lämpötila nousee 55 °C lämpötilaan. Tällöin muutos, ΔT_{use} , on 15 °C

Mikä on saatu väsymiskerroin, kun tutkitaan juotosaineen kestävyyttä, jonka materiaalikerroin on 2. Se saadaan laskemalla kaavan 5 mukaan.

$$A = \frac{\text{Cycles/day}_{\text{Test}}}{\text{Cycles/day}_{\text{Use}}} * \left(\frac{\Delta T_{\text{test}}}{\Delta T_{\text{use}}} \right)^n = \frac{25}{2} * \left(\frac{12}{15} \right)^2 = 8$$

Tämä kerroin kertoo rasituksen kasvavan monikertaiseksi alkuperäiseen olosuhteisiin verrattuna.

Lämpötilan muutos suuremmaksi muuttaa siten kestävyyttä melko voimakkaasti. Samoin taajuuden muutos tiheämmäksi pudottaa myös kestoikää huomattavasti.

10 ANALYSOITU KOMPONENTTI

Tässä tarkastelussa otettiin lähempään tarkasteluun ainoastaan IP-muunnin / säätöyksikkö sekä sen osien ikääntyminen lämpötilan muuttuessa.

10.1 IP-muuntimet

IP-muunnin (**Kuva 3.**) on laite, joka säätelee pneumaattisen paineen virtaohjeen mukaisesti. Annettava virta-arvo on tyypillisesti 4...20 mA ja mitattava ilmanpaine on välillä 0,2...1,0 bar. Testissä käytetään Fairchild TEXI7800-421EN-mallia. Laitteen käyttötarkoitus on ohjata painetta moottorin pakopuolella. Taulukossa 3 on listaus IP-muuntimessa esiintyvistä materiaaleista.



Kuva 3. IP-muunnin ja sen säätöyksikkö

Taulukko 3. Materiaalit IP-muuntimessa

komponentti	materiaali
runko ja kotelo	kromilla käsitelty alumiini
aukko	alumiini ja safiiri
varusteet	ruostumaton teräs messinki sinkkipäällysteinen teräs
sintratut elementit	ruostumaton teräs
elastomeerit	Nitriili, Viton
viimeistely	epoksijauhemaalaus
kaapeli	johdin - kupari eriste - PVC

10.2 Teoreettiset lasketut tulokset eri materiaaleille

Lämpövanhenemisen osalta lasketaan tulokset nitrilistä tai Vitonista tehdyille tiivisteelle sekä PVC-eristeille, koska näiden voidaan olettaa olevan tuotteen heikoimmat osat ikääntymisen kannalta. Oletetaan tuotteiden olevan käytössä siten, että tuote on valmiustilassa 100 tuntia 85 °C lämpötilassa ja ajossa 200 tuntia 95 °C lämpötilassa. Keskiarvoksi saadaan 91,67 °C.

Viton on hiilipohjainen elastomeeri, johon on lisätty fluoria. Lämpötilan kestoa on saatu parannettua täten huomattavasti. Viton-tuotteita on useita, joiden yleisin käyttölämpötila-alue on -20...205 °C / 230 °C. Mikäli sekoitukseen lisätään vetyä, saadaan alhaisen lämpötilan kestävyyttä parannettua entisestään. /5/

Vitonin aktivaatioenergia on liitteen 1 mukaan 1,1 eV.

Vitonin lämpötilakertoimeksi (AF) saadaan kaavan 1 mukaan 1,92. Mikäli valmistajan ilmoittama tuotteen kestoikä on 500 tuntia lämpötilassa 85 °C, kestää se käytetyssä keskilämpötilassa täten $\frac{500h}{1.92} = 260,68 h$

Nitriili on kopolymeeri, joka koostuu butadieenista ja akryloniitista. Nitriilituotteiden yleisin käyttölämpötila-alue on -35...120 °C. Nitriilien hyviä puolia on hyvä öljynkesto, puristuskesto sekä kulumiskestävyys. Huonoa taas on heikompi auringonkestävyys, otsoninkestävyys sekä säänkestävyys. /4/

Nitriilin aktivaatioenergia on liitteen 1 mukaan 0,86 eV.

Nitriilin lämpötilakertoimeksi (AF) saadaan kaavan 1 mukaan 1,66. Mikäli valmistajan ilmoittama tuotteen kestoikä 500 tunnin lämpötilassa on 85 °C, kestää se käytetyssä keskilämpötilassa täten $\frac{500h}{1.66} = 300,49 h$

PVC (polyvinyylchloridi) on teollisuudessa laajalti käytetty muovi. PVC:n hyviä puolia on hyvät mekaaniset lujuusominaisuudet, iskunkestävyys, työstettävyys, kemiallinen kestävyys, vesitiiveys ja säänkestävyys. PVC:n maksimi käyttölämpötila on 60 °C, kuormitettuna 45 °C. Sähkön eristyskyky on hyvä, mutta dielektrisyyshäviö on suuri.

PVC:n aktivaatioenergia on liitteen 1 mukaan 0,26 eV.

PVC:n lämpötilakertoimeksi (AF) saadaan kaavan 1 mukaan 1.17. Mikäli valmistajan ilmoittama tuotteen kestoikä 500 tunnin lämpötilassa on 85 °C, kestää se käytetyssä keskilämpötilassa täten $\frac{500h}{1.17} = 428,66 h$

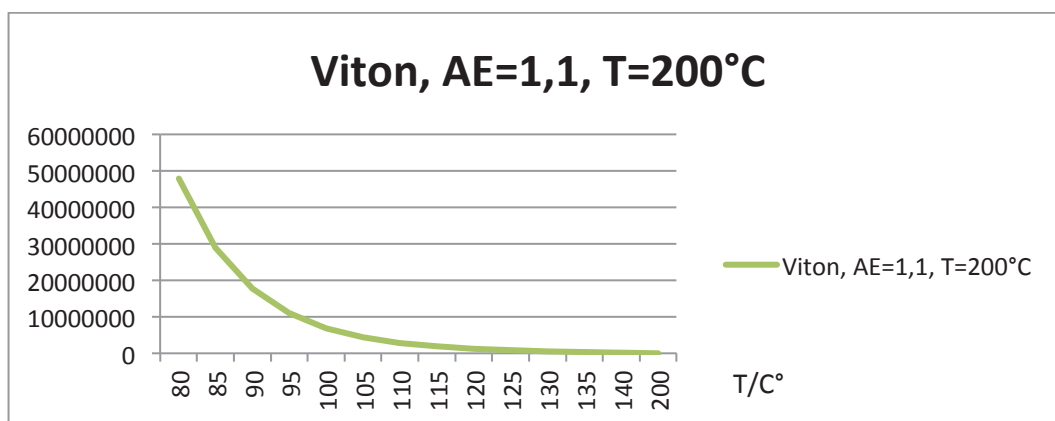
Kaikissa edellä mainituissa materiaaleissa on otettava huomioon, että ominaisuuksia voidaan vielä muuttaa eri seossuhteilla. Nämä ovat yleispäteviä tietoja. Jokaisen materiaalin kohdalla on vielä varmistettava viimeisimmät ominaisuudet valmistajilta.

11 LASKENNALLISIA TULOKSIA

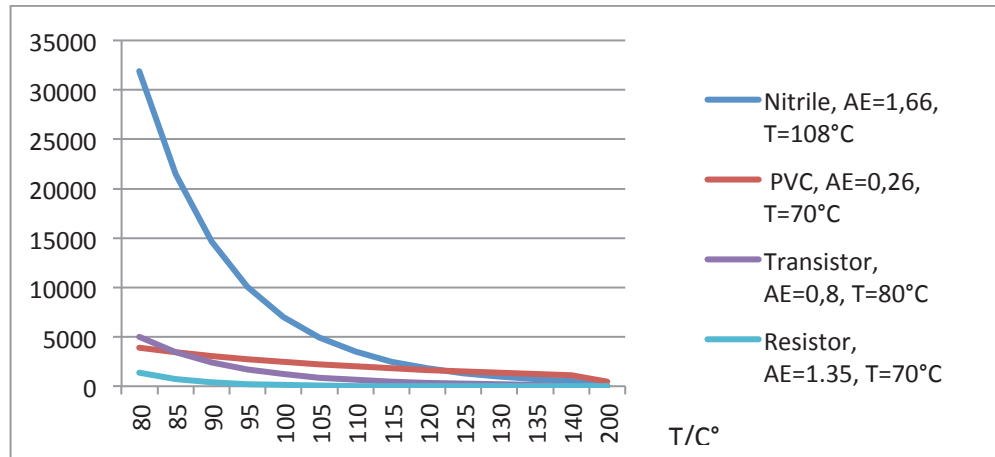
Laskennallisessa analyysissä huomataan eroavaisuuksia eristemateriaalien välillä. Yllättävintä on, että lämpötilan kasvaessa ikääntyminen hidastuu. Näissä laskennallisissa tuloksissa, (**Taulukko 4.**) joissa on haettu vain eroavaisuuksia eri materiaalien välillä, eikä todellista kestoikää, voidaan huomata eroavaisuuksia eri aineiden välillä. Viton kestävyys lämpötilan noustessa heikkenee nopeammin Nitriliin verrattuna, vaikkakin käytössä tuote on todettu kestävämmäksi. PVC käyttäytyy tasaisemmin ja reagoi hitaammin lämpötilan muutokseen edellisiin verrattuna.

Taulukko 4. laskennalliset tulokset

T	Nitrile, AE=1,66, T=108°C	PVC, AE=0,26, T=70°C	Viton, AE=1,1, T=200°C	Transistor, AE=0,8, T=80°C	Resistor, AE=1.35, T=70°C
80	17718,51	3898	47892560,16	5000	1372,57
85	21493,86	3459,73	28914460,59	6464,07	738,88
90	14645,18	3080,84	17700963,8	2424,33	404,6
95	10083,26	2752,1	10981650,77	1713,19	225,2
100	7012,15	2465,88	6900722,04	1221,97	127,33
105	4923,49	2215,85	4389926,36	879,42	73,09
110	3489,02	1996,74	2825835,26	638,36	42,57
115	2494,52	1804,13	1839777,14	467,21	25,14
120	1798,77	1634,31	1210944,74	344,68	15,05
125	1307,77	1484,16	805462,92	256,23	9,12
130	958,35	1351,02	541201,71	191,88	5,6
135	707,66	1232,67	367200,88	144,72	3,48
140	526,39	1127,18	251492,84	10,89	2,19
200	24,6	446,49	5000	6,36	0,02



Kuva 4. Vitonin elinikä-odotukset (h) käyttölämpötilan funktiona



Kuva 5. Elinikäodotukset eri materiaaleilla (h) käyttölämpötilan funktiona

Edellä esitettynä laskennalliset tulokset graafisesti. Viton eriytettiin omaksi kaaviokseen muista huomattavasti poikkeavamman lämmönkestävyyden johdosta.

(Kuvat 4. ja 5.)

Valmistajan antamia kestoikää on mahdoton saada luotettavasti, joten laskut tehtiin oletetulla 5000 tunnin kestoikäällä maksimilämpötilassa lukuun ottamatta nitriitille annettua 4000 tunnin kestoikää ja vertaamalla lämmön vaikutusta siihen. Normaalilla tiivisteellä kestoiksi voidaan luvata esimerkiksi 5 vuotta... rajaton elin-ikä, mutta ei ole tietoa saatavilla, missä lämpötilassa tämä saavutetaan. Elektroniikkakomponenteilla eliniäksi luvataan esimerkiksi 7 000 tuntia kondensaattoreilla tai 100 000 kytkentää releillä. Suoraa ajallista tietoa on vaikea saada. Lisäksi tuotteiden seossuhteet muokkaavat myös teknistä elinikäkäyrää.

12 MATERIAALITESTAUKSET LABORATORIOSSA

Jotta voidaan varmistua laskujen oikeellisuudesta, on mahdollisuuksien mukaan tehtävä vertailevia testauksia myös laboratorio-olosuhteissa. Testaus tehdään tällä kertaa vain käyttölämpötilasta perustuen Arrheniuksen kaavoihin.

12.1 Laboratoriojärjestelyn kuvaus

Laboratoriotesteissä määritellään materiaalin kestävyys kiihdytetyissä olosuhteissa (HALT). Näitä testejä voi olla esimerkiksi mekaanisella puolella murtovenymä, vetolujuus, kimmokerroin sekä sähköisellä puolella eristyskestävyys, eristyshäviö tai eristeen resistanssi. Keskitymme seuraavaksi vain lämmön erillisvaikutuksiin.

Laboratorio sijaitsee Technobotnian tiloissa, jossa käytettiin Fineron maahantuomaa ja King son technologyn valmistamaa Labtester THS COL 150 -lämpökaappia (**Kuva 6.**).



Kuva 6. Lämpökaapin käyttöliittymä

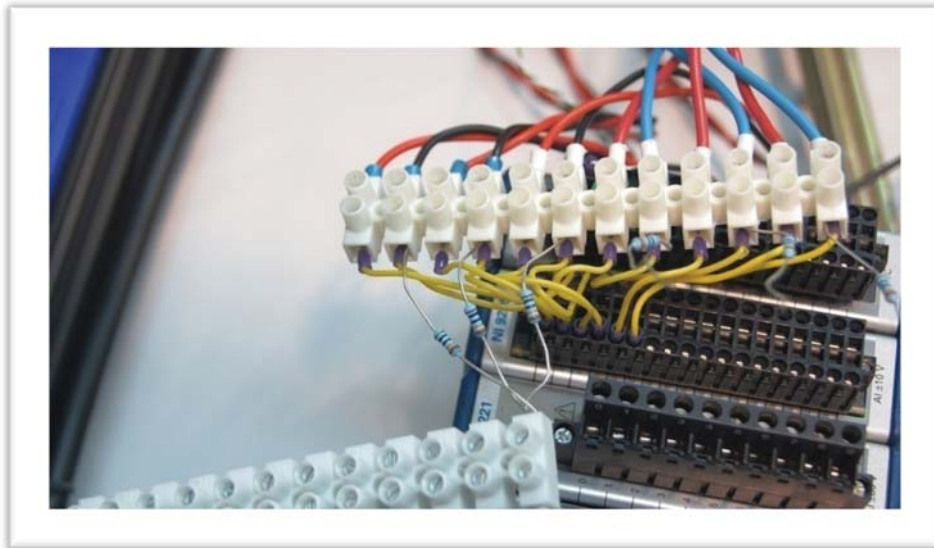
Lämpökaapin arvot:

- lämpötila-alue: $-60\text{ °C} - 150\text{ °C}$
- kosteus: 20...98 RH
- tarkkuus: $\pm 0,2\text{ °C}, \pm 2\text{ \% RH}$

12.2 Häiriösuojaus

Mittauksissa on huomioitava myös häiriösuojauksen tarve. Laitteisto saattaa toimia alussa jonkin aikaa hyvin, mutta myöhemmin alkaa tulla häiriöitä mittauksiin. Yksi häiriön aiheuttaja on lokitiedostoa kirjoittava PC, jonka ollessa akkukäytöllä mittaus on luotettava, mutta kytkettäessä virtalähde laitteeseen, on nähtävissä heti piikki mittaustuloksissa. Tietokone onkin kytkettävä erikseen maadoitettuun pistorasiaan. Myös kaikki virransäästöominaisuudet on syytä poistaa kirjaushäiriöiden välttämiseksi.

Järjestelmän maadoitus ja oikea kytkentä ovatkin avainasemassa mittauksissa. Tuotteiden eristäminen lämpökaapin rungosta on yksi tapa poistaa häiriöitä. Myös mittalaitteiden jännitetulojen nollajohtimien kytkeminen maahan 100 k Ω vastuksien kautta (**Kuva 7.**) auttaa poistamaan häiriöitä, jotka johtuvat jännitteen nollakohdan kellumisesta ja aiheuttavat mitta-alueen potentiaalieroalueen osumisen mitta-alueen laitaan ja mitta-arvojen nollautumisen. Vastuksien tavoite on saada potentiaalieroalue pysymään lähempänä todellista nollaa.



Kuva 7. Häiriönpoistovastukset

On myös otettava huomioon se seikka, että tehtäessä pitkäkestoisia testejä, on aina huomioitava myös sähkökatkosten ja muiden katkosten mahdollisuus. Testilaitteisto ja vähintään mittauslaitteisto (**Kuva 8.**) kannattaa, mahdollisuuksien mukaan, kytkeä UPS-laitteiston taakse. Näin voidaan välttyä muilta mahdollisilta ongelmilta sähkönjakelun aiheuttamien häiriöiden ja katkosten osalta. Samaten lämpökaapissa tapahtuva kosteuden mittaus tarvitsee tässä laitteistossa tislattua vettä kosteuden mittaamiseen. Sen loppuminen aiheuttaa lämpökaapissa sen, että lämpötila laskee normaaliin huonelämpötilaan turvallisuussyistä. Kosteusprosentti nousee mittausteknisistä syistä jopa lähelle 60 % arvoa.

Näistä edellämainituista systä johtuen on erittäin tärkeää paitsi asettaa mittauslaitteisto häiriösuojatusti, myös valvoa sen toimintaa riittävän usein mahdollisten häiriöiden aiheuttamien poikkeamien minimoimiseksi. Yksi hyvä tapa on asettaa ohjattavissa olevä web-kamera testitilaan, jolloin toimintaa ja tuloksia voidaan valvoa, esimerkiksi kotoa tai muualta käsin mobiiliverkkoa hyödyntäen.

12.3 Testin toteutus

Lämpötila nostettiin tarkkailulämpötilaan kaikissa testauksissa 1 000 tunnin ajaksi. Yhden tai kahden kappaleen hajoaminen ei antanut aiheutta keskeyttää koetta, vaan kaikkien tuli hajota. Lämpötila nostettiin 10 minuutissa haluttuun lämpötilaan. Lämpötilan lasku tapahtui vapaasti.

12.4 Testausjärjestelyt

IP-muuntimet kytkettiin siten, että voidaan seurata painetta, virtaa ja lämpötilaa samanaikaisesti (**Liite 3.**). Virran tulee pysyä 4...20 mA ja paineen 0,2...1 Bar välissä. Kaapelien ja ilmaletkujen tuli olla lämmönkestävää materiaalia, esimerkiksi Teflon-letkut paineilmalle (**Kuva 9.**).



Kuva 8. Mittausjärjestelmä

Mittaus suoritettiin 5 minuutin rampeilla. Tulokset kirjattiin myös ylös 1 minuutin välein virran ja paineen osalta, jolloin voitiin seurata muutosta helpommin mittaustulosten ollessa yhtenäisiä. Mittauksissa seurattiin arvoja omilta näytöiltä.



Kuva9. IP-muuntimet ja niiden teflon-letkut

Tarkastettavia mittalaitteita ei ole erikseen sarjanumeroitu, joten yksilöinti suoritettiin merkitsemällä jokainen tuote erikseen omalla tunnusnumerolla. Näin vältettiin turhat mittauspoikkeamat mitattaessa samaa tuotetta uudestaan. Maalarinteippi ja tussi ovat huono yhdistelmä merkitsemiseen, koska lämpötilan ollessa jatkuvasti yli 100 °C, ei viikon kuluttua merkkejä enää näkynyt. Olisi haettava pysyvämpi ratkaisu jatkossa.

Vikaantumiskriteereinä voidaan pitää sitä hetkeä, jolloin yksittäisen laitteen antamat toiminta-arvot poikkeavat muista identtisistä yksilöistä.

Tuotteet testattiin kolmen ryhmässä lämpötiloilla 100 °C, 130 °C ja 140 °C, jolloin saatiin vikaantumiskäyrä aikaiseksi näiden keskiarvoista.

IP-muuntimille suoritettava testi mittasi vain tuotteen toiminnallisuutta poikkeavissa lämpötiloissa. Toimintatestaus suoritettiin myös lämpötilatestauksen jälkeen, mikäli tuote ei ollut täysin hajonnut ennen testijakson päättymistä.

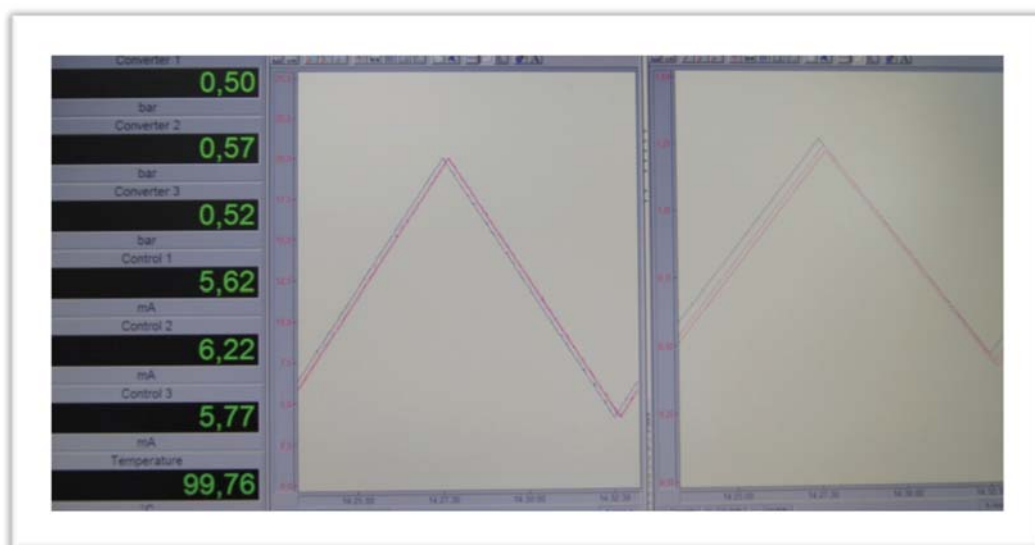
Mittauslaitteistona käytettiin seuraavia laitteita; Tuloksien kirjaamiseen kannettavaa tietokonetta ja virran syöttämiseen BeamexMC10-kalibraattoria (**Kuva 10.**). Laitteeseen ohjelmoitiin aika millisekunnin välein sekä nouseva ja laskeva tapa virran osalta. Tämä virta muutettiin jännitemuotoon rinnan kytkettyjen vastuksien avulla. Paineen syöttönä käytettiin normaalista verkosta 6 barin painetta paineentasaajan kautta. Lisäksi paineanturit mittasivat painetta ja muuttivat tiedon virtaviestiksi, jonka jälkeen virtaviestit muutettiin jänniteviesteiksi Kistler 4603A-virtavahvistimessa/muuntimessa, joka pystyttiin lukemaan ja muutettiin tietokoneen ymmärtämään muotoon national Instrumentsin rajapinnassa (**Kuva 11.**) joka oli liitetty usb-kaapelilla kannettavaan tietokoneeseen. Tallennus- ja mittausohjelmana oli DasyLab. (**kuva 12.**)



Kuva 10. Virtalähde / kalibraattori



Kuva 11. Jännite / USB-muunnin

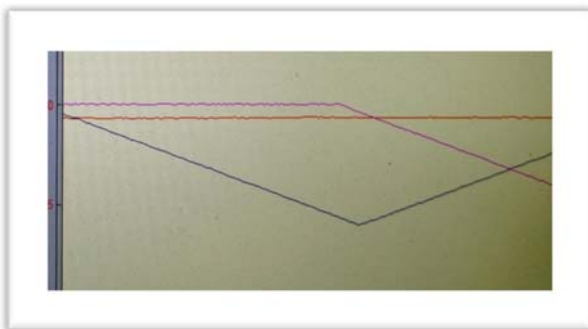


Kuva 12. Mittauksien seuranta

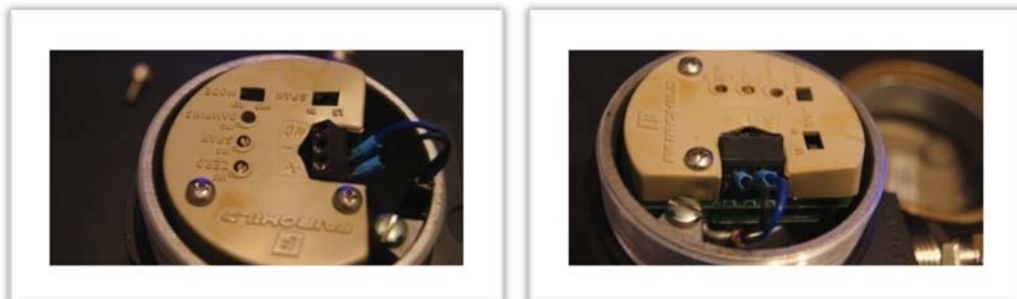
12.5 Saadut tulokset ja johtopäätelmät

100 °C

100 °C lämpötilassa tunnin oleilu yllämpötilassa aiheutti noin 20 % prosentin heiton ylöspäin mittaustuloksissa, jolloin voitiin jo olettaa tuotteiden olevan epäluotettavia. Laitteissa on kuitenkin säädöt, joilla tuote voidaan kalibroida antamaan oikeaa tulosta. Tätä ei testeissä suoritettu. 100 °C lämpötila ei kuitenkaan aiheuttanut hajoamista tuotteille. On tosin otettava huomioon häiriöt testin aikana sähköjakelussa ja laitteistossa, jotka vaikuttavat mittaustuloksiin. Yhden tuotteen toiminta palasi täysin normaaliksi, kun lämpötila laski normaaliin huonelämpötilaan. Kahden tuotteen kohdalla tapahtui hajoaminen lämpötilan laskutilanteessa 1 000 h testin päättyessä. (**Kuva 13.**) Paineen yläarvo jäi puoleen normaalista. Tuotteessa ei havaittu kuitenkaan mainittavia mekaanisia tai fyysisiä poikkeamia lämmityksen aikana vaan IP-muuntimet toimivat täysin normaalisti koko 1 000 tuntia kestävä testin ajan. Ainoastaan suojamuovit kärsivät testissä (**kuva 14.**). Mittaustulokset ovat liitteessä 4.



Kuva 13. Poikkeama lopetustilanteessa



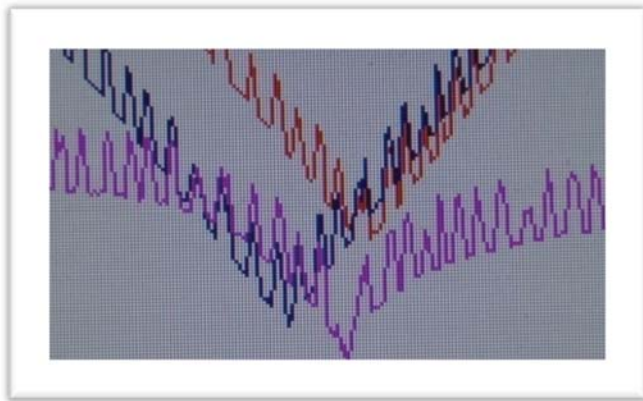
Kuva 14. Suojamuovit

130 °C

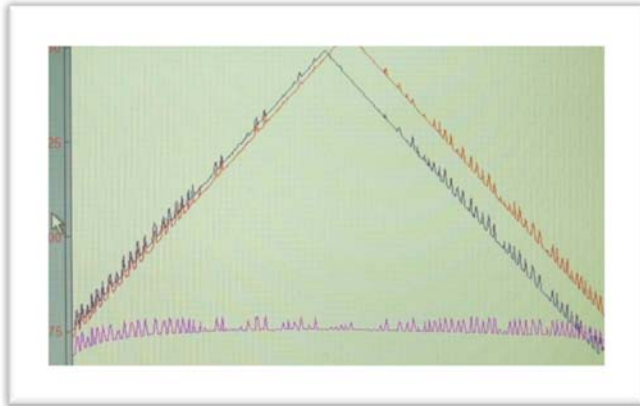
0,4 Bar poikkeama ylöspäin paineen osalta 130 °C tarkkailulämpötilassa saavutettiin noin tunnin kohdalla. Maksimipaine oli keskimäärin 1,5 Bar. Ensimmäisen IP-muuntimen katsottiin alkaneen hajota 191 tunnin 30 minuutin kuluttua käynnistyksestä. Toinen laite kesti 206 tuntia 21 minuuttia. Kolmas tuote kesti 278 tuntia 39 minuuttia. Keskiarvoksi saadaan 225 tuntia 30 minuuttia. Mittaustulokset ovat liitteessä 6

140 °C

0,5 barin poikkeama ylöspäin paineen osalta 140 °C tarkkailulämpötilassa saavutettiin noin tunnin kohdalla. Yksi muunnin antoi alarajassa piikin alaspäin tunnin lämmityksen jälkeen. Laite jäi 10 minuuttia myöhemmin alarajaan. 3 tuntia myöhemmin laite palasi edeltävään tilaan ja 4 tunnin kohdalla laite toimi normaalisti. 3 vuorokauden jälkeen paine ei muuttunut enää lineaarisesti, vaan alkoi ilmetä repeilymäistä poikkeamaa (**Kuva 15.**) kaikissa laitteissa. 104 tunnin ja 42 minuutin jälkeen 1 laite alkoi hajota ja jäi 0,4 bar-tilaan. (**Kuva 16.**) Noin 8 tuntia myöhemmin (112 tuntia sekä 112 tuntia 12 minuuttia) hajosivat 2 muuta, jotka jäivät 6 bar-tilaan. Keskiarvoksi saadaan 109 tuntia 42 minuuttia. Lämmityskaappi sammutettiin ja tuotteiden annettiin jäähtyä vuorokausi. Mittaustulokset ovat liitteessä 5.



Kuva 15. Repeilymäistä poikkeamaa



Kuva 16. Hajonnut yksikkö

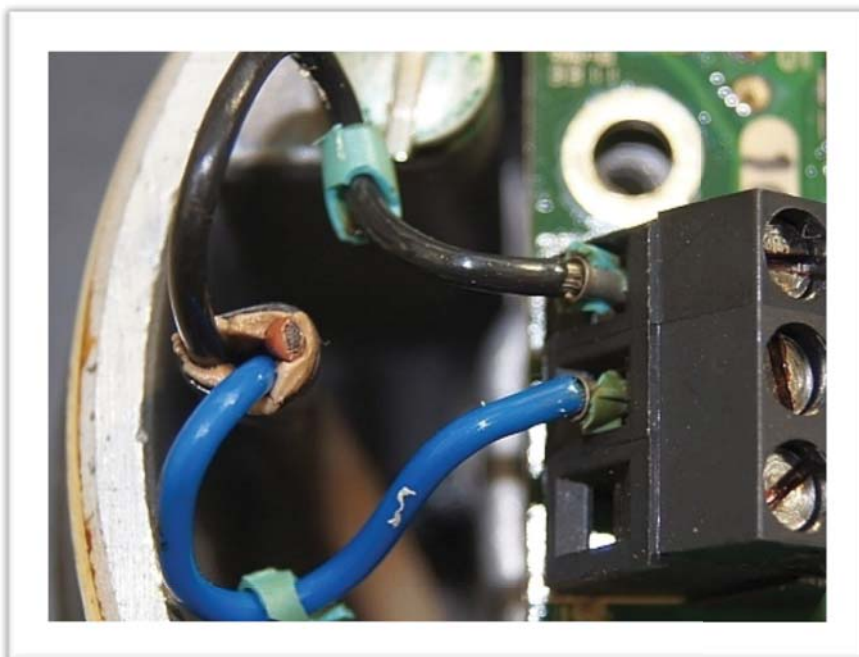
Tarkasteltaessa IP-muuntimen piirilevyä lähemmin 140 °C lämpötilan vaikutuksen jälkeen, voitiin todeta 2 komponentin, transistorin ja tarkkuusvastuksen hajonneen ja kytkimien kytkinvipujen murentuneen. (**Kuva 17.**) Samoin Viton-tiiviste oli muuttanut muotoa (**kuva 18.**). Liitäntäjohtimien liittimien suojat samoin olivat murentuneet. (**kuva 19.**).



Kuva 17. Piirilevy

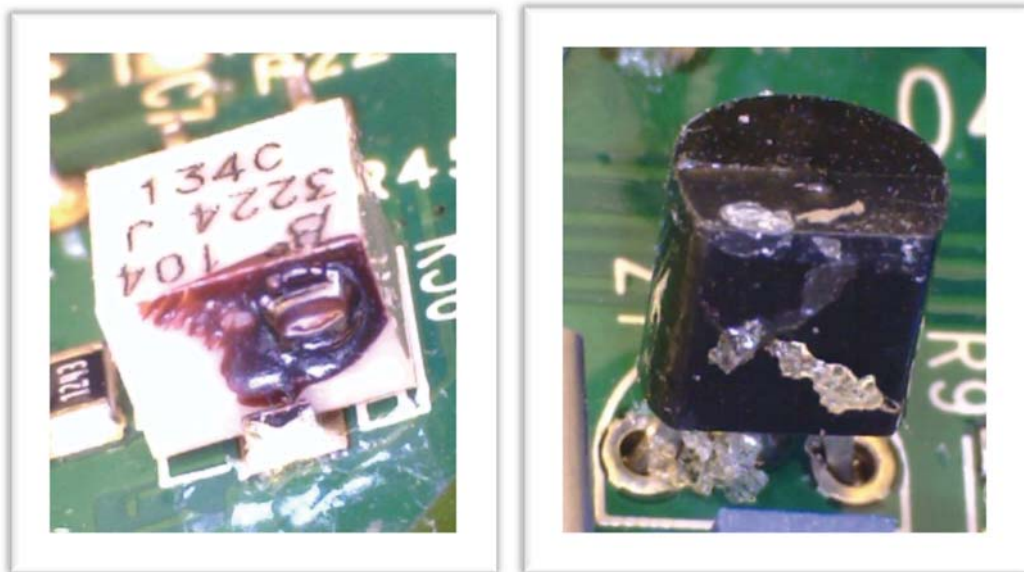


Kuva 18. Viton-tiiviste



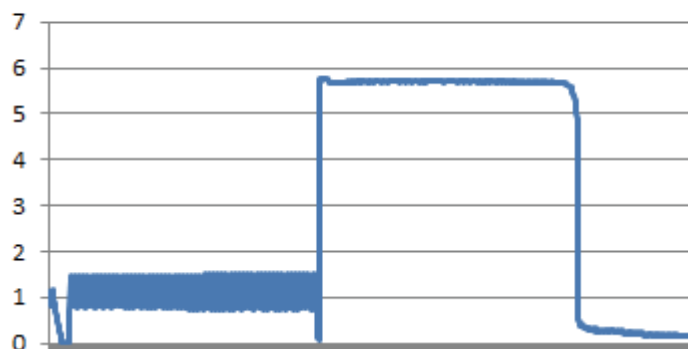
Kuva19. Liittimien suojat

Tarkkuusvastuksessa oli (**Kuva 20.**) havaittavissa tummunut ja sulanut kuoppa päädyssä. Transistorissa taas voitiin havaita eristeaineiden valuneen ulos sekä kyljestä että pohjasta.

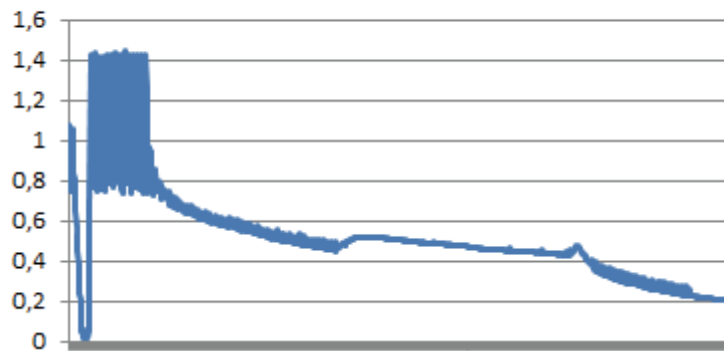


Kuva 20. Tarkkuusvastus ja transistori

Tuotteet, joissa ulostulopaine nousi hajoamisvaiheessa (**Kuva 21.**), kestivät vähemmän aikaa kuin tuotteet, jotka hajosivat pienemmän ulostulopaineen tilaan (**Kuva 22.**). Tämä antaa aiheen olettaa, että kyseessä on eri komponentin osan hajoaminen, joka on otettava huomioon todennettaessa tuotteen hajoamista.



Kuva 21. hajoaminen yläpaineeseen 140 °C



Kuva 22. Hajoaminen alapaineeseen 140 °C

Testeissä on myös oltava useita testattavia kappaleita luotettavan hajonnan saamiseksi. Liian vähillä komponenteilla testattaessa on muiden muuttujien osuus helposti liian suuri, eikä voida olla täysin varmoja tulosten oikeellisuudesta.

13 LASKENTA- JA TESTAUSTULOSTEN VERTAILU

Testaus- ja laskentatuloksille voidaan suorittaa vertailu, jolloin voidaan joko varmistua molempien tapojen samanmukaisuudesta tai todeta niiden eroavaisuus, jolloin on tarpeen suorittaa analysointi siitä, miksi tavat eroavat.

Testeissä käytettiin saatua tietoa ja näiden tuotteiden aktivaatioenergiatietoja hyväksi laskettaessa tuotteiden hajoamista eri lämpötiloissa. Oletettiin hajoamisen 140 °C tapahtuneen noin 110 h ajassa.

Vaikka ennakkoon odotuksena oli tiivistemateriaalien hajoaminen, on selvää näiden testien jälkeen, että tarkasteltaessa laitteiden toimivuutta tuli elektroniikan merkitys esiin selvempänä, joten tarkasteluissa keskityttiin näiden komponenttien hajoamiseen.

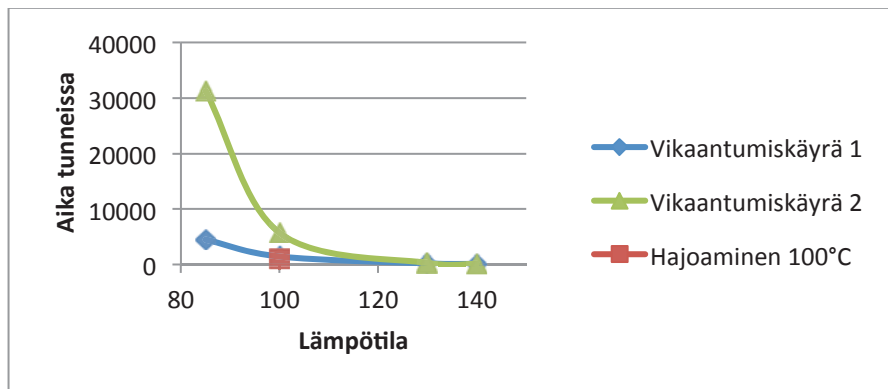
Koska tuotteet testattiin seuraavaksi 130 °C lämpötilassa, saatiin siinä lämpötilassa tarkkuusvastuksen kestoiksi laskettua noin 282 tuntia ja transistorin kestoiksi noin 192 tuntia.

Tuotteiden katsottiin hajonneen, kun joko maksimi normaalin käytön ulostulopaine oli alkanut pudota ja pudonnut 0,2 Bar, tai kun toisissa laitteissa ulostulopaine nousi yli maksimiarvon, näissä tapauksissa noin 6 Bar-tasolle.

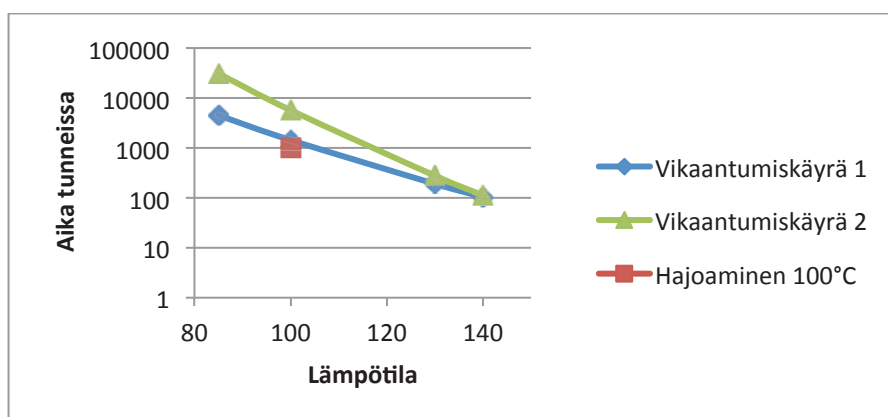
Kahden tuotteen hajoaminen 130 °C lämpötilassa tapahtui noin 200 tunnin kuluttua testin alkamisen jälkeen sekä yhden noin 279 tunnin kohdalla. Tässä tapauksessa voidaan arvella transistorin hajonneen kahdessa ja vastuksen yhdessä tuotteessa. Täten voidaan todeta laskujen ja todellisuuden pitäneen paikkansa sillä tarkkuudella, mikä voidaan olettaa ottaen huomioon sen, että testaus tehtiin kokonaisuuksille eikä yksittäisille komponenteille. Tätä havaintoa tukivat myös visuaaliset havainnot hajonneissa laitteissa.

100 °C lämpötilassa ei tuotteille tapahtunut hajoamista testin aikana vaan heti testin jälkeen. Näiden ei sen vuoksi voida suoranaisesti katsoa hajonneen lämpötilan vaikutuksen ansiosta.

85 °C ja 100 °C hajoamispiste voidaan kuitenkin laskea, kun tiedetään hajoamispisteet sekä 130 °C ja 140 °C kohdilla. Käyttämällä Arrheniuksen kaavaa käänteisesti saadaan sillä laskettua aktivaatioenergia, missä yhtälö toteutuu. Tätä voidaan siten käyttää arvioitaessa todennäköistä kestoikää eri lämpötiloissa. Kun otetaan huomioon, että osa tuotteista hajosi samalla tavalla jättäen laitteen täysin auki ja osa jätti tuotteen kiinni-asentoon, voidaan näistä päätellä eri komponentin hajoamiseen, toisen aktivaatioenergian ollessa laskennallisesti 0,872 ja toisen 1,305. Näistä piirrettiin kaavio. (**Kuvat 23. ja 24.**) Kun asetetaan vielä piste, missä kaksi komponenttia hajosi 100 °C lämpötilassa, saadaan jollain tasolla määritettyä myös todellisen hajoamisen suhde laskennalliseen käyrään, joka on hyvin lähellä oikeaa arvoa.



Kuva 23. Vertailu laskennan ja hajoamisen välillä



Kuva 24. Vertailu laskennan ja hajoamisen välillä logaritmisesti

14 YHTEENVETO

Ikääntymisen laskeminen on hyvin hankalaa johtuen siitä, että ei ole olemassa tilannetta, jossa vain jokin elementti, kuten lämpö, värinä, jännite tai muu vastaava yksinään vaikuttaa tuotteeseen, vaan useimmiten on kyseessä useamman eri rasituksen yhteisvaikutus. Näiden laskeminen muuttaakin elinkaaren analysoinnin huomattavasti hankalammaksi ja haastavammaksi.

Vertailtaessa laskujen ja testausten tuloksia on huomattava, että usein testit tehdään kokonaisuuksille, kun taas laskut suoritetaan yksittäisille materiaaleille. Tällöin vertailu on joskus hyvinkin hankalaa ja usein myös epäluotettavaa, koska miten voitiin olla varmoja siitä, miten tuotteen eri komponentit vaikuttavat toisiinsa niiden ollessa kiinni tai muuten toistensa läheisyydessä. On hyvä tehdä testit ensin kokonaisuuksille, sen jälkeen testata hajonneet komponentit erikseen.

On huomattava, että aina ei ole tarpeen tuhota tuotetta täysin vaan on tärkeää tietää, milloin tuotteen ominaisuudet muuttuvat esimerkiksi lämpötilan vaikutuksesta niin paljon, ettei niihin voida luottaa. Usein huomataan tuotteiden toimivan jälleen normaalisti lämpötilan laskiessa normaaliin suosituslämpötilaan. Kuitenkaan ei voida olla täysin varmoja sen jälkeen luotettavuudesta.

Laskemisissa on aina tiedettävä jokin hajoamispiste, johon voidaan tuotteen elinikäodotuksia verifioida. On se sitten tuotteen valmistajan ilmoittama, käyttökokemuksilla saatu tai kiihdytetyillä testeillä havaittu elinikä. Mikäli tämä tiedetään, voidaan laskeminen suorittaa, muuten ei.

Tehtäessä ikääntymistutkintaa laskemalla, analysoimalla testejä tai seuraamalla käyttökokemuksia, niihin on varattava hyvin paljon aikaa. Tämän lopputyön aikana ehdittiin tekemään vain pintapuolinen läpileikkaus aiheesta. On syytä tarkkaan miettiä, mitkä komponentit, millä laajuudella ja missä rasituksessa mitäkin komponentteja kannattaa lähteä tarkemmin tutkimaan.

Mikäli tutkimuksia halutaan jatkaa, on perustettava hyvin varustettu testilaboratorio, jossa on vahvat taustajärjestelmät sähkökatkosten ja muiden häiriöisen varalta. Hyvällä henkilökunnalla ja johtamisella varustetulla testauslaboratoriolla voidaan myös pitää yllä tehokasta toimintaa sekä tarvittaessa muuta testaus- ja kalibrointitoimintaa vähentämään turhaa tuotteiden palauttamistarvetta. Testaaminen on hyvinkin aikaa vievää, joten on kysyttävä onko tarvetta tehdä testejä itse vai vaatia toimittajia huolehtimaan asiasta.

LÄHDELUETTELO

- /1/ Accelerated Testing of Systems and Assemblies. Viitattu 21.11.2012.
<http://www.jedec.org/>
- /2/ Haikio T. 2010. ISBN 9789510260395. Analoginen Elektroniikka 1
- /3/ Demonstrating Reliability Requirements with Accelerated Testing by
Larry Edson. [Esitelmä]
- /4/ Nitrilin ominaisuudet. Viitattu 21.11.2012. <http://o-ring.info/en/products/by-compound/nitrile-nbr/>
- /5/ Vitonin ominaisuudet. Viitattu 21.11.2012. <http://o-ring.info/en/products/by-compound/viton-fkm/>.
- /6/ Wärtsilä internet. Viitattu 21.11.2012.
http://www.wartsila.com/fi_FI/etusivu
- /7/ OL3-Dieseltutkintaraportti STUK 2011. Viitattu 21.11.2012.
http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/paatokset/fi_FI/ydinlaitoksia_koskevat_paatokset/_files/86795264384893354/default/OL3-Dieseltutkintaraportti.pdf
- /8/ STKK/SVT Eristeiden kestävyysluento [Esitelmä]
- /9/ YVL A.8 YDINVOIMALAITOKSEN IKÄÄNTYMISEN HALLINTA
(luonnos2) . Viitattu 21.11.2012. <https://ohjeisto.stuk.fi/YVL/A.8-L2.pdf>

LIITTEET

- 1.** Aktivaatioenergiat
- 2.** Accelerated testings of systems and assemblines
- 3.** IP-muuntimien testikykentä
- 4.** Mittaustuloksia IP-muuntimet 100° C
- 5.** Mittaustuloksia IP-muuntimet 140° C
- 6.** Mittaustuloksia IP-muuntimet 130° C

Appendix B Activation Energies

B.1 TABULATION

Activation energies for a number of materials and components are tabulated in this appendix. As in Appendix D, no effort was made to produce an exhaustive tabulation; rather, it is a convenient recording of activation energy data obtained incidentally to preparation of this report. It is essential that the cited data sources be consulted to verify the relevance to the user's application.

B.2 HISTOGRAM

A graphical representation of the distribution of activation energies, for the materials and components included in the tabulation, is given by the histogram in Figure B-1.

The values of activation energy range from 0.09 eV for titanium-titanium dioxide, thin-film capacitors to 3.29 eV for Kraft paper. This range was divided into 0.2-eV increments, and the number of materials and components that have an activation energy within a given increment was counted (from the tabulation). These numbers were then used to plot the histogram. The large number of entries for magnet wire contributes substantially to the histogram over a broad range from 0.2 to 1.8 eV, except in the interval between 1.2 and 1.4 eV. Polymers and transistors make a major contribution to the peak between 1.0 and 1.2 eV.

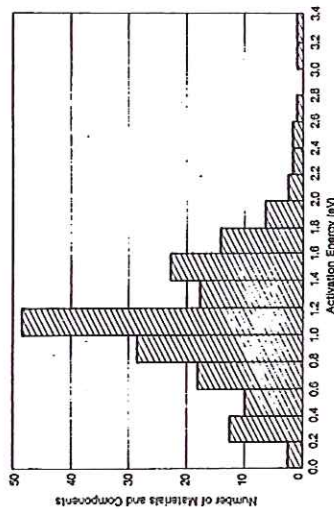


Figure B-1.
Histogram of Activation Energies

B-1

Activation Energies

NOTES FOR TABULATED ACTIVATION ENERGIES

- Notes:
1. Encapsulated with aliphatic amine cured bisphenol A-epichlorohydrin epoxide (epoxy cast). No impregnate.
 2. Encapsulated with aliphatic amine cured bisphenol A-epichlorohydrin epoxide (epoxy cast). Impregnated.
 3. Encapsulated with B staged aromatic amine cured bisphenol A-epichlorohydrin epoxide (epoxy transfer molded). No impregnate.
 4. Encapsulated with B staged aromatic amine cured bisphenol A-epichlorohydrin epoxide (epoxy transfer molded). Impregnated.
 5. Encapsulated with phthalic anhydride cured bisphenol A-epichlorohydrin epoxide (epoxy hot melt). No impregnate.
 6. Encapsulated with phthalic anhydride cured bisphenol A-epichlorohydrin epoxide (epoxy hot melt cast). Impregnated.
 7. Encapsulated with modified anhydride cured bisphenol A-epichlorohydrin epoxide. No impregnate.
 8. Encapsulated with mixed anhydride cured epoxy novolac. No impregnate.
 9. Failure criteria: cracking of insulation to expose conductor; dielectric breakdown leakage current > 300 μ A at 3000 V. All specimens tested to failure.
 10. Failure criterion: voltage stress of 3000 volts held for 15 seconds at 100% R.H. All specimens tested to failure.
 11. Based on graph of log (mean time to failure) vs. 1/T.
 12. Failure criterion: 3 A drawn at rated voltage. All samples tested to failure.
 13. Burned in @ 125°C, then powered during life testing @ 250°C. Main failure mode was high leakage currents.
 14. Calculated from Arrhenius-type plots.

Material/Component/Device	Activation Energy (eV)	Citation	Remarks
Alkyd, Grade 1500	1.71	1026	50% retention of flexural strength (Hooker Corp.). See Note 14.
Alkyd, Grade 1500	1.14	1026	50% retention of dielectric strength (Hooker Corp.). See Note 14.
Alken-imide, irradiated, insulation, 20 gauge wire	0.88	461	MIL-W-81044/17A. Mean time to failure. Notes 9 and 14.
Aromatic polyimide, insulation, 20 gauge wire	1.29	461	MIL-W-81381/12. Mean time to failure. Notes 9 and 14.
Butyl	1.08	603	40% loss of elongation. See Note 14.
Capacitors, chlorinated diphenyl. No stabilizers.	1.17	566	DC life. Stressed at 1000 volts per mil. See Note 14.
Capacitors, chlorinated diphenyl. 0.5% anthraquinone	1.53	566	DC life. Stressed at 1000 volts per mil. See Note 14.

B-2

Activation Energies

Material/Component/Device	Activation Energy (eV)	Citation	Remarks
Capacitors, chlorinated diphenyl, 0.5% azobenzene	2.00	566	DC life. Stressed at 1000 volts per mil. See Note 14.
Capacitors, chlorinated diphenyl Kraft paper	0.86	180	Dielectric stressed with dc potential, 10^6 V/in. See Note 14.
Capacitors, chlorinated diphenyl Kraft paper with 0.5% azobenzene	1.50	180	Dielectric stressed with dc potential, 10^6 V/in. See Note 14.
Capacitors, chlorinated diphenyl Kraft paper with 5.0% azobenzene	1.93	180	Dielectric stressed with dc potential, 10^6 V/in. See Note 14.
Capacitor; dielectric, tubular paper	2.42	717	10% capacitance increase. See Note 14.
Capacitors, metalized paper	1.32	180	Life defined as time required to regain original value of capacitance after initial increase. See Note 14.
Capacitors, titanium-titanium dioxide, thin film. @ 25°C-100°C	0.09	466	Formed by anodization. Tests with rate of temperature rise approximately $2\frac{1}{2}$ °C/min.
Chosel (Chomeric Inc.) (Silver filled conductive silicone)	1.04	765	Determined by thermogravimetric analysis. Heating rate of 10°C per minute.
Connectors: Thin gold (25-100 μ) electroplated over copper base material (250°C - 750°C) (50°C - 250°C)	1.02 0.50	433 433	$D = D_0 \exp(-E/RT)$, where $D =$ chemical interdiffusion coefficient and $D_0 = 1.5 \times 10^{-5}$ cm ² /s. Predominant degradation mechanism is defect diffusion along grain boundaries and dislocation pipes—dependent upon defect density.
Dacron, Parachute material (polyethylene glycol terephthalate, see see Ref. 124)	1.15	765	Determined by thermogravimetric analysis. Heating rate of 2°C per minute
Diallylphthalate, glass filled	1.04	765	Determined by thermogravimetric analysis. Heating rate of 10°C per minute.
Diodes, Si —general	1.13-2.77	340	
Diodes, Si (-1960)	1.14	340	

B-3

Activation Energies

Material/Component/Device	Activation Energy (eV)	Citation	Remarks
Diode, silicon, IN673 and IN696	1.80	339	50% failure. See Note 14.
Diodes, silicon, p-n-p-n	1.41	340	
Diodes, silicon, varactors	2.31-2.38	340	
Diodes, others	1.13-2.77	340	
Diodes, varactors	2.31-2.38	340	
Ethylene propylene, No. 8 lead wire with paper separator	0.71	374	See Note 14.
Ethylene propylene	1.28	51	20% loss in elongation. See Note 14.
Ethylene propylene base insulation	1.05	603	40% loss of elongation. See Note 14.
Ethylene propylene, No. 18 lead wire	0.90	374	Estimated average life. See Note 14.
Ethylene propylene, solid —with paper separator	0.70	374	10,000 h life @ 112°C
Ethylene propylene, solid	0.95	374	10,000 h life @ 132°C
Enamel, plain, insulation on magnet wire	0.35	610	See Notes 3, 11 and 14.
Enamel, plain, insulation on magnet wire	0.64	610	See Notes 2, 11 and 14.
Enamel, plain, insulation on magnet wire	1.61	610	See Notes 1, 11 and 14.
Enamel, plain, insulation on magnet wire	0.38	610	See Notes 4, 11 and 14.
Enamel, plain, insulation on magnet wire	0.45	610	See Notes 5, 11 and 14.
Enamel, plain, insulation on magnet wire	0.28	610	See Notes 6, 11 and 14.
Epon 828 (Shell Chemical)	1.34	765	Determined by thermogravimetric analysis. Heating rate of 10°C per minute.
Epoxy (epoxide film), insulation, magnet wire	0.71	368	See Note 14.
Epoxy, Grade 2000	0.98	1026	50% retention of flexural strength (Hooker Corp.). See Note 14.

B-4

Activation Energies

Material/ Component/Device	Activation Energy (eV)	Citation	Remarks
Epoxy, Grade 2000	1.24	1026	50% retention of dielectric strength (Hooker Corp.). See Note 14.
Epoxy insulation on magnet wire	0.99	610	See Notes 1 and 11.
Epoxy insulation on magnet wire	0.94	610	See Notes 2 and 11.
Epoxy insulation on magnet wire	0.87	610	See Notes 3 and 11.
Epoxy insulation on magnet wire	0.73	610	See Notes 4 and 11.
Epoxy insulation on magnet wire	0.73	610	See Notes 5 and 11.
Epoxy insulation on magnet wire	0.93	610	See Notes 6 and 11.
Epoxy, unvarnished, magnet wire	0.67	852	See Note 14.
Epoxy, phenolic varnished, magnet wire	0.66	852	See Note 14.
Formvar (Bondage), cementable insulation and Andover Corp. epoxy encapsulant	1.09	320	See Note 14.
Formvar, cementable insulation and epoxy encapsulant—solenoid coil	0.70	320	See Note 14.
Formvar insulation on magnet wire	1.61	610	See Notes 1 and 11.
Formvar insulation on magnet wire	0.23	610	See Notes 3 and 11.
Class, high lead	0.37	97	
Isonel—175 insulation and Acme 2008 epoxy encapsulant on solenoid coil.	0.68	320	Average coil life. See Notes 12 and 14.
Kraft paper in mineral oil.	1.39	838	50% of tensile strength. See Note 14.
Kynar, MIL-specification wires	1.95	374	See Note 14.

B-5

Activation Energies

Material/ Component/Device	Activation Energy (eV)	Citation	Remarks
Microcircuits, CMOS type CD 4024A	1.0	795	25h @ 250°C = 50% failure. See Note 13.
Microcircuits, CMOS type CD 4013A	1.1	795	42h @ 250°C = 50% failure. See Note 13.
Microcircuits, CMOS, type CD 4011A	1.4	795	90h @ 250°C = 50% failure. See Note 13.
Microcircuit, CMOS 4007 freak pop. main pop.	0.9	517	
	1.3	517	
ML #18 twist pairs	1.43	610	See Notes 7 and 11.
ML #33 coils	1.15	610	See Note 8. Failure criteria was shorted turn, open circuit and/or 2500 volt hipot failure of coil.
ML #18 twist pairs	2.44	610	See Note 8.
Mylar film	1.18	589	Data based on 50% electric strength failure. See Note 14.
Neoprene	0.87	401	70°C - 130°C.
Nitrile	0.86	401	70°C - 100°C.
Nyleze insulation on magnet wire	0.57	610	See Notes 6 and 11.
Nyleze insulation on magnet wire	0.99	610	See Notes 1, 11 and 14.
Nyleze insulation on magnet wire	0.75	610	See Notes 2, 11 and 14.
Nyleze insulation on magnet wire	0.68	610	See Notes 3, 11 and 14.
Nyleze insulation on magnet wire	0.59	610	See Notes 4, 11 and 14.
Nyleze insulation on magnet wire	1.04	610	See Notes 5, 11 and 14.
Nylon 6/6, glass-reinforced	1.14	530	Tested at 205 and 255°C. 50% reduction in tensile strength. See Note 14.
Nylon 6/6, glass-reinforced	1.29	530	Tested at 140 and 150°C. 50% reduction in tensile strength. See Note 14.

B-6

Activation Energies

Material/Component/Device	Activation Energy (eV)	Citation	Remarks
Operational Amplifier			
741			
-freak pop.	0.7	517	
-main pop.	1.6	517	
-mixed pop.	0.8	517	
-freak pop.	0.8	517	
-main pop. (1/2 voltage)	0.9	517	
Paper, manila, under oil	1.66	566	Reduction of tensile strength to 20% of original strength. See Note 14.
Paper, manila, under oil	1.56	566	Reduction of tensile strength to 70% original strength. See Note 14.
Phenolic, general purpose, Durez 791	1.36	1026	50% retention of impact strength (Hooker Corp.). See Note 14.
Phenolic, general purpose, Durez 791	1.05	1026	50% retention of flexural strength (Hooker Corp.). See Note 14.
Phenolic, Grade 666	0.96	1026	50% retention of flexural strength (Hooker Corp.). See Note 14.
Phenolic, Grade 666	1.11	1026	50% retention of flexural strength (Hooker Corp.). See Note 14.
Phenolic, Grade 649	1.16	1026	50% retention of flexural strength (Hooker Corp.). See Note 14.
Phenolic, Grade 649	1.43	1026	50% retention of flexural strength (Hooker Corp.). See Note 14.
Phenolic, Grade 685	1.27	1026	50% retention of flexural strength (Hooker Corp.). See Note 14.
Phenolic-Kraft laminate	1.47	573	75% retention of flexural strength. See Note 14.
Phenolic-Kraft laminate	1.50	573	50% retention of flexural strength. See Note 14.
Polyester, amide-imide overcoated, helical coil	1.54	943	See Note 14.

B-7

Activation Energies

Material/Component/Device	Activation Energy (eV)	Citation	Remarks
Polyester, amide-imide overcoated, wire, twisted pairs	1.25	943	See Note 14.
Polyester-overcoated, magnet wire and class 155 impregnating varnish	1.26	832	See Note 14.
Polyester-overcoated, magnet wire and class 155 impregnating varnish, in motorette systems	1.44	832	See Note 14.
Polyester-overcoated, unwarnished twists of magnet wire	1.67	832	See Note 14.
Polyester-overcoated, magnet wire twists with modified silicone varnish	1.86	832	See Note 14.
Polyester-overcoated, magnet wire twists with modified silicone varnish	1.04	832	See Note 14.
Polyester, phenolic varnished, magnet wire	0.87	358	
Polyester resins (unfilled) Heltron 24505, 853, 554 and Maro 670.	1.00	832	See Note 14.
Polyester, unwarnished, magnet wire	1.13	603	40% loss of elongation. See Note 14.
Polyethylene, cross-linked	1.23	51	20% loss in elongation. See Note 14.
Polyethelene, cross-linked	1.15	973	t ₁₀ induction periods. See Note 14.
Polyethylene, 0.92 density	1.51	973	Extrapolated induction periods. See Note 14.
Polyethylene, low density (below 97°C)	1.14	973	t ₁₀ induction periods. See Note 14.
Polyethylene, 0.96 density	1.35	973	(Above 110°C) extrapolated induction periods. See Note 14.
Polyethylene, low density	3.10	537	10% weight loss in vacuum. See Note 14.

B-8

Activation Energies

Material/ Component/Device	Activation Energy (eV)	Citation	Remarks
Polypropylene, isotactic	1.13	973	t_{10} induction periods. See Note 14.
Polyalkene-polyvinylidene fluoride, irradiated, insulation, 20 gauge wire.	1.10	461	MIL-W-81044/9. Mean time to failure. See Notes 9 and 14.
Printed circuit board material (1/32 in.), NEMA G-10 and FR-4	1.05	717	50% retention of electrical strength. See Note 14.
Printed circuit board material (1/32 in.), NEMA G-10 and FR-4	1.49	717	50% retention of flexural strength. See Note 14.
Polyimide, aromatic, TFE-banded and coated insulation, 20 gauge wire.	1.57	461	Meantime to failure. See Notes 9 and 14.
Polymethylmethacrylate	0.34	890	
Polytetrafluoroethylene	0.43	890	
Polytetrafluoroethylene	3.29	537	10% weight loss in vacuum. See Note 14.
Polythermaleze, heavy, insulation and 3M 241 epoxy encapsulant on solenoid coil.	0.95	320	Average coil life. See Notes 12 and 14.
Polythermaleze insulation and Acme 4027-A epoxy encapsulant on solenoid coil.	0.92	320	Average coil life. See Notes 12 and 14.
Polythermaleze insulation on magnet wire.	1.00	610	See Notes 1 and 11.
Polythermaleze insulation on magnet wire.	0.96	610	See Notes 2 and 11.
Polythermaleze insulation on magnet wire.	1.56	610	See Notes 3 and 11.
Polythermaleze insulation on magnet wire.	1.00	610	See Notes 4 and 11.
Polythermaleze insulation on magnet wire.	0.98	610	See Notes 5 and 11.
Polythermaleze insulation on magnet wire.	0.75	610	See Notes 6 and 11.

B-9

Activation Energies

Material/ Component/Device	Activation Energy (eV)	Citation	Remarks
Polythermaleze #33 on coils.	0.87	610	See Note 7. Failure criteria was shorted turn, open circuit and/or 2500 volt hipot failure of coil.
Polystyrene	0.26	890	
Polyurethane insulation on magnet wire.	0.49	610	See Notes 6 and 11.
Polyurethane insulation on magnet wire.	0.29	610	See Notes 4 and 11.
Polyurethane insulation on magnet wire.	0.32	610	See Notes 5 and 11.
Polyurethane insulation on magnet wire.	0.38	610	See Notes 2 and 11.
Polyurethane insulation on magnet wire.	0.28	610	See Notes 3 and 11.
Polyurethane insulation on magnet wire.	0.46	610	See Notes 1 and 11.
Polyvinylacetate	0.16	890	
Polyvinylchloride	0.26	890	
Polyvinyl formal, magnet wire twists, with phenolic alkyd varnish.	0.80	832	See Note 14.
Polyvinyl formal, magnet wire, with phenolic type varnish.	0.82	832	See Note 14.
Polyvinyl formal, with phenolic type varnish, magnet wire.	0.93	832	See Note 14.
Polyvinyl formal, with phenolic type impregnating varnish, magnet wire.	1.04	832	See Note 14.
Polyvinyl formal, unvarnished, magnet wire.	1.01	832	See Note 14.
Polyvinyl formal enamel and oil modified phenolic varnish, magnet wire.	0.98	368	See Note 14.
Polyvinyl formal, unphenolic type varnish, magnet wire.	0.84	832	See Note 14.

B-10

Activation Energies

Material/ Component/Device	Activation Energy (eV)	Citation	Remarks
Polyvinyl formal, im- pregnated with phenolic type varnish, magnet wire.	1.03	832	See Note 14.
PVC-nylon insulation, 20 gauge wire	1.40	461	MIL-W-5086/Z. See Notes 9 and 14.
PVC, irradiated, insulation, 20 gauge wire.	0.99	461	See Notes 9 and 14.
Resin-nica insulation, solventless	0.70	179	Loss factor in stator coils during 10-year field service increased in accordance with Arrhenius model to a peak.
Semiconductor devices, silicon.	0.9-1.4	86	Predominant value - 1.1 eV.
Silicon 6-110-6 (Dow Corning)	1.14	765	Determined by thermogravi- metric analysis. Heating rate of 10°C per minute.
Silicone, modified, wire enamel on copper with- out varnish.	1.56	566	1000 volt failure between twisted pairs. Average life. See Note 14.
Silicone, modified, wire enamel on copper with silicone varnish.	1.61	566	1000 volt failure between twisted pairs. Average life. See Note 14.
Silicon transistors and enamel on aluminum without varnish.	1.46	566	1000 volt failure between twisted pairs. Average life. See Note 14.
Silicon transistors and integrated circuits	1.1	184	Testing of transistors and integrated circuits based on Arrhenius model.
SML insulation and Jones-Dabney epoxy encapsulant.	0.72	320	See Note 14.
Termination, tinned round wire (Sn, Sn + SnPb, Au, Ag)	0.77	69	Present aging relation: 16 h @ 155°C = 5 yr @ room temp. Recommended relation: 4 h @ 155°C = 5 yr @ room temp. Failure caused by: high tempera- ture, high humidity, sulfur- dioxide.

B-11

Activation Energies

Material/ Component/Device	Activation Energy (eV)	Citation	Remarks
Thermalize "B" (epoxy polyester film), insulation magnet wire.	1.0	368	See Note 14.
Thermalize-F insulation and Jones-Dabney epoxy encapsulant.	1.10	320	See Note 14.
Thermalon, insulation and 3M 241 epoxy encapsulate on solenoid coil.	0.42	320	Average coil life. See Notes 12 and 14.
Transistors	0.66	123	
Transistor, Ge alloyed, OC 1972 (1964)	1.26	235	
(1966)	1.08	235	
Transistor, Ge alloy LT123 (1958).	1.25	670	
Transistor, bipolar, p-n-p-n	1.65	340	
Transistors, CMOS	1.18	334	Eyring model.
Transistor, diffused- geronium	0.87	340	Step-stress tests without moisture getter. Median life. See Note 14.
Transistor, diffused- germanium	1.24	340	Constant stress tests with moisture getter. Median life. See Note 14.
Transistor, Ge gettered	1.24	340	
Transistor, Ge mesa, AF106 (1969)	1.00	235	
Transistor, Ge mesa, 2N559 (1958)	1.17	671	
(1959)	0.95	671	
(1960)	1.14	671	
Transistor, Ge MADT, 2N501 (1958)	1.07	673	MADT = Micro alloy diffused
Ge MADT, 2N501 (1959)	1.07	674	transistor
Transistor, Ge MAT, 2N393 (1960)	1.0	673	MAT = Micro alloy transistor
Transistor, Ge MAT, 2N393 (1959)	1.00	673	MAT = Micro alloy transistor
Transistor, Ge ungettered	0.88	340	

B-12

Activation Energies

Material/Component/Device	Activation Energy (eV)	Citation	Remarks
Transistor, silicon, bipolar	1.77	340	With metal penetration into Si.
Transistor, silicone mesa, ZN560	2.16	339	50% failure. See Note 14.
Transistors, silicon, typical	0.96	340	t_{10} lifeline. See Note 14.
Transistors, silicon, typical	1.11	340	t_{50} lifeline. See Note 14.
Transistors, submarine-cable	1.30	157	0.025% failure. See Note 14.
Transistors, submarine-cable	1.24	129	50% failure. See Note 14.
Transistors, ZN559, vacuum baked.	0.89	750	Median life based on failure criteria of collector breakdown voltage and reverse current, and emitter breakdown voltage. See Note 14.
Transistor, Vycor gettered germanium, ZN559.	1.02	339	50% failure. See Note 14.
Viton A (DuPont)	1.11	765	Determined by thermogravimetric analysis. Heating rate of 10°C per minute.
Wire, aircraft, Type I, Size 14	1.66	360	MIL-W-5086A. Average life. See Notes 10 and 14.
Wire, aircraft, Type II, Size 8	1.77	368	MIL-W-5086A. Average life. See Notes 10 and 14.
Wire, aircraft, Type II, Size 14.	1.56	368	MIL-W-4086A. Average life. See Notes 10 and 14.
Wire, aircraft, Type III, Size 14.	1.57	368	MIL-W-5086A. Average life. See Notes 10 and 14.
Wire, aircraft, Type III, Size 8.	1.96	368	MIL-W-5086A. Average life. See Notes 10 and 14.

Activation Energies

Material/Component/Device	Activation Energy (eV)	Citation	Remarks
Transistor, germanium @ 60°C.	0.99-1.26	136 (Appendix)	
Transistors, germanium	0.17	236	Near and below room temperature
Transistor, germanium, ungettered	0.88	340	
Transistors, germanium, gettered with vycor or molecular sieve	1.24	340	
Transistor, Si, mesa, ZN269 (1961)	0.38	677	Conditions not specified.
Transistor, Si, mesa, ZN560 (1959) (1960)	0.58	677	Constant stress.
Transistor, Si, mesa, ZN1051 (1960)	1.12	672	
Transistor, modern submarine cable	1.50	672	
Transistor, MOS	1.12	671	
Transistors, MOS	1.4	129	
Transistors, MOS	1.2	129	
Transistors, MOS	1.10	157	Median life for failure criterion of 1.0-V shift. See Note 14.
Transistors, MOS	1.10	157	Median life for failure criterion of 0.5-V shift. See Note 14.
Transistor, power, MSC 1330	0.81	125	Median time to failure. See Note 14.
Transistors, Si main pop. (1960)	1.02	340	
Transistor, Si planar, BFY 33 (1969)	1.12	235	
Transistor, Si planar, 4A-2(1967) (1963)	1.18	675	Step stress.
Transistor, Si, p-n-p-n	1.50	675	Constant stress.
Transistors, silicon, (All) -before wearout -at wearout	1.29	676	Constant stress.
Transistor, Si, p-n-p-n	1.65	340	
Transistors, silicon, (All) -before wearout -at wearout	1.12	235	
Transistor, silicon, bipolar	1.46	235	
Transistor, silicon, bipolar	1.02	340	With surface inversion failures.
Transistor, silicon, bipolar	1.02-1.04	340	With Au-Al bond failures.



System Reliability Center
201 Mill Street
Rome, NY 13440-6916
888.722.8737
or 315.337.0900
Fax: 315.337.9932

Accelerated Testing of Systems and Assemblies

Accelerated testing is a powerful tool that can be effectively used in two very different ways: in a qualitative or in a quantitative manner. Qualitative accelerated testing is used primarily to identify failures and failure modes while quantitative accelerated testing is used to make predictions about a product's life characteristics (e.g., MTTF, B10 life, etc.) under normal use conditions. In accelerated testing the quantitative knowledge builds upon the qualitative knowledge. Using accelerated testing in a quantitative manner requires a Physics-of-Failure approach i.e., a comprehensive understanding and application of the specific failure mechanism involved and the relevant activating stress(es).

The RAC is frequently asked the question, "How can I accurately estimate the reliability of a new system or assembly using an accelerated test?"

It is sometimes suggested that a Highly Accelerated Life Test (HALT) might be used. Used as a qualitative tool i.e., to identify design or component weaknesses and manufacturing process problems, HALT testing can be very effective. The results of the tests are then used to increase the margin of strength of the design. However, HALT is not an effective quantitative tool i.e., to predict the life or reliability of the product. Correlation of this type of test data to actual use is extremely difficult, some of the failure modes exposed may not even occur in the normal operating or non-operating envelope.

Unfortunately, there is no single magic analytical model that can accurately estimate the life of complex assemblies or systems. Each life analytical model describes physical change mechanisms associated with specific material characteristics.

Constructing an accurate quantitative accelerated test requires the following steps:

1. Define the anticipated failure mechanisms in terms of the materials used in the product to be tested. Remembering, of course, that the majority of "electrical failures" are basically mechanical or chemical in nature.
2. Determine the environmental stresses to which the product will be exposed when operating and when not operating or stored.
3. Based on the failure mechanisms that are anticipated to limit the life of the product; choose a test, or combination of tests, that will accelerate that failure mechanism(s).
4. Relevant acceleration models that should be considered include:
 - Arrhenius Temperature Acceleration for temperature and chemical aging effects
 - Inverse Power Law for any given stress
 - Miner's Rule for linear accumulated fatigue damage
 - Coffin-Manson non-linear mechanical fatigue damage
 - Peck's Model for temperature and humidity combined effects
 - Eyring/Black/Kenney models for temperature and voltage acceleration

Table 1 describes each of these models, their relevant parameters and frequent applications of each.

Accelerated Testing of Systems and Assemblies (Cont'd)

Table 1. Frequently Used Acceleration Models, Their Parameters and Applications

Model Name	Description/Parameters	Application Examples	Model Equation
Arrhenius Acceleration Model	Life as a function of Temperature or Chemical Aging	Electrical Insulation and Dielectrics, Solid State and Semiconductors, Intermetallic Diffusion, Battery Cells, Lubricants & Greases, Plastics, Incandescent Lamp Filaments	$\text{Life} = A_0 e^{-\frac{E_a}{kT}}$ <p>where: Life = median Life of a population A_0 = scale factor determined by experiment e = base of natural logarithms E_a = Activation Energy (Unique for each failure mechanism) k = Boltzmann's constant = 8.62×10^{-5} eV/K T = Temperature (degrees Kelvin)</p>
Inverse Power Law	Life as a function of any given stress	Electrical Insulation and Dielectrics (Voltage Endurance), Ball & Roller Bearings, Incandescent Lamp Filaments, Flash Lamps	$\frac{\text{Life at normal stress}}{\text{Life at accelerated stress}} = \left(\frac{\text{Accelerated stress}}{\text{Normal stress}} \right)^N$ <p>where: N = Acceleration factor</p>
Miner's Rule	Cumulative Linear Fatigue Damage as a function of Flexing	Metal Fatigue (Valid only up to the yield strength of the material.)	$CD = \sum_{i=1}^k \frac{C_{Si}}{N_i} \leq 1$ <p>where: CD = Cumulative damage C_{Si} = Number of cycles applied @ stress S_i N_i = number of cycles to failure under stress S_i (determined from an S-N diagram for that specific material) k = number of loads applied</p>
Coffin-Manson	Fatigue Life of Metals (Ductile Materials) due to Thermal Cycling and/or Thermal Shock	Solder Joints and other connections	$\text{Life} = \frac{A}{(\Delta T)^B}$ <p>where: Life = Cycles to failure A = scale factor determined by experiment B = scale factor determined by experiment ΔT = Temperature change</p>
Peck's	Life as a combined function of Temperature and Humidity	Epoxy packaging	$\tau = A_0 (RH)^{-2.7} \exp\left[\frac{0.79}{kT}\right]$ <p>where: τ = median life (time-to-failure) A_0 = scale factor determined by experiment RH = Relative Humidity k = Boltzmann's constant = 8.62×10^{-5} eV/K T = Temperature (degrees Kelvin)</p>

Accelerated Testing of Systems and Assemblies (Cont'd)

Table 1. Frequently Used Acceleration Models, Their Parameters and Applications (Cont'd)

Model Name	Description/Parameters	Application Examples	Model Equation
Peck's Power Law	Time to Failure as a function of Relative Humidity Voltage and Temperature	Corrosion	$TF = A_0 * RH^N * f(V) * \exp[E_a / kT]$ where: TF = Time-to-Failure A ₀ = scale factor determined by experiment RH = Relative Humidity N = ~2.7 E _a = 0.7-0.8 eV (appropriate for aluminum corrosion when chlorides are present) f(V) = an unknown function of applied voltage k = Boltzmann's constant = 8.62 x 10 ⁻⁵ eV/K T = Temperature (degrees Kelvin)
Eyring/Black/Kenney	Life as a function of Temperature and Voltage (or current density (Black))	Capacitors, Electromigration in Aluminum conductors	$\tau = \frac{A}{T} \exp\left[\frac{B}{kT}\right]$ where: τ = median life (Time-to-Failure) A = scale factor determined by experiment B = scale factor determined by experiment k = Boltzmann's constant = 8.62 x 10 ⁻⁵ eV/K T = Temperature (degrees Kelvin)
Eyring	Time to failure as a function of Current, Electric Field and Temperature	Hot Carrier Injection, Surface Inversion, Mechanical Stress	$TF = B(I_{sub})^N \exp(E_a/kT)$ where: TF = Time-to-Failure B = scale factor determined by experiment I _{sub} = peak substrate current during stressing N = 2 to 4 E _a = -0.1 eV to -0.2 eV (note the apparent activation energy is negative) k = Boltzmann's constant = 8.62 x 10 ⁻⁵ eV/K T = Temperature (degrees Kelvin)
Thermo-mechanical Stress	Time to failure as a function of change in Temperature	Stress generated by differing thermal expansion rates	$TF = B_0 (T_0 - T)^n \exp(E_a/kT)$ where: TF = Time-to-Failure B ₀ = scale factor determined by experiment T ₀ = stress free temperature for metal (approximate metal deposition temperature for aluminum) n = 2 - 3 E _a = 0.5 - 0.6 eV for grain-boundary diffusion, ~ 1 eV for intra-grain diffusion k = Boltzmann's constant = 8.62 x 10 ⁻⁵ eV/K T = Temperature (degrees Kelvin)

Further information on this topic may be found in a series of excellent documents published by JEDEC Solid State Technology (Source references 1-4) <http://www.jedec.org/>. They deal in depth with the topic of accelerated testing based upon a Physics-of-Failure approach that addresses specific failure mechanisms in electronic components.



System Reliability Center
201 Mill Street
Rome, NY 13440-6916
888.722.8737
or 315.337.0900
Fax: 315.337.9932

Accelerated Testing of Systems and Assemblies (Cont'd)

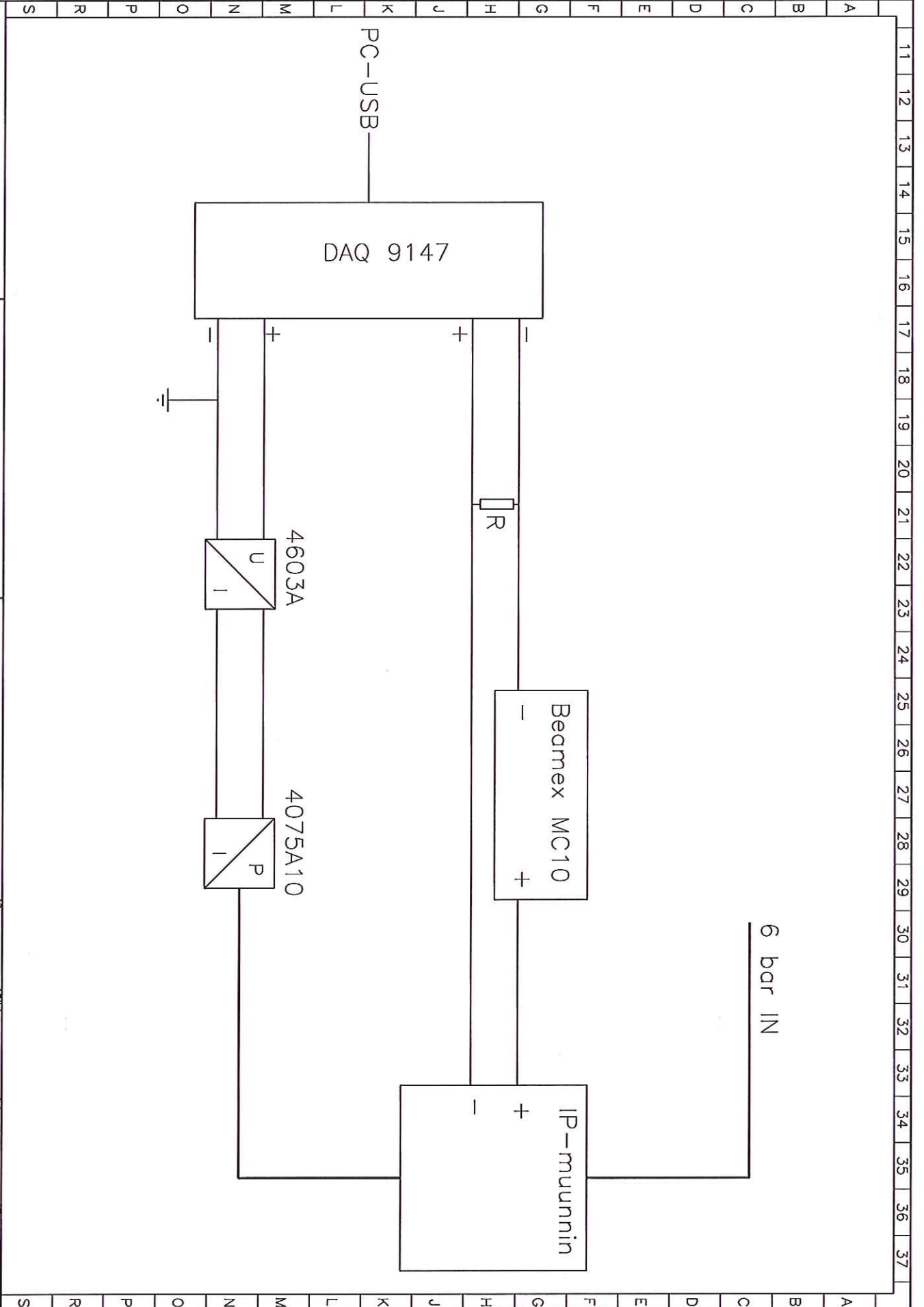
Source:

- JEDEC JEP143 Solid State Reliability Assessment and Qualification Methodologies (November 2001).
- JEDEC JEP122B Failure Mechanisms and Models for Semiconductor Devices (August 2003).
- JEDEC JESD91A Method for Developing Acceleration Models for Electronic Component Failure Mechanisms (August 2003).
- JEDEC JEP148 Reliability Qualification of Semiconductor Devices Based on Physics of Failure Risk and Opportunity Assessment (April 2004).
- Nelson, W., Accelerated Testing, John Wiley & Sons, 1990.

For More Information:

- Seager, J.D., A Method to Predict an Average Activation Energy for Subassemblies, IEEE, Transactions on Reliability, Vol. #37, No.5, 1988. *A search for a single test value, using a combination process to average the expected component activation energies.*
- Criscimagna, N.H., Accelerated Testing, RAC START Sheet 99-4, ACC. <http://rac.alionscience.com/pdf/acc.pdf>. *A brief primer on accelerated testing.*
- Vassiliou, P., Mettas, A., Understanding Accelerated Life-Testing Analysis, 2001 Reliability and Maintainability Symposium Tutorial. *A synopsis of problems and pitfalls of accelerated testing.*

A muutos		D muutos
B muutos		E muutos
C muutos		F muutos



Periaatteellinen kaavio
IP-muunnin
testauslaitteistosta

Suunn. Rk /	Piirittunnus	Keskus	Iyönro
Part. I Atteus	Lehti /	Piirustus no	
Tork.		SÄH	

DASYLab - V 11.00.00

Worksheet name: IP converters Tuotteen mittaus 100 °C Aloitussivu

Recording date : 26.6.2012, 11:21:12

Block length : 1

Delta : 1 sec.

Number of channels : 7

Measurement time	Converter 1 [bar]	Converter 2 [bar]	Converter 3 [bar]	Control 1 [mA]	Control 2 [mA]	Control 3 [mA]	Temperature [-C]
0:00	0,19	0,19	0,19	3,98	3,99	4,02	23,95
0:01	0,34	0,34	0,34	7,03	6,91	6,86	34,4
0:02	0,5	0,5	0,5	10,19	10,13	10,09	42,6
0:03	0,66	0,66	0,66	13,45	13,32	13,26	50,03
0:04	0,82	0,83	0,82	16,6	16,52	16,46	56,52
0:05	0,98	0,99	0,98	19,78	19,72	19,66	63,36
0:06	0,84	0,85	0,85	17,05	17,05	17,16	69,22
0:07	0,68	0,69	0,69	13,76	13,85	13,93	75,25
0:08	0,52	0,53	0,53	10,63	10,65	10,71	81,35
0:09	0,36	0,37	0,37	7,37	7,45	7,5	87,18
0:10	0,2	0,21	0,21	4,18	4,26	4,37	92,78
0:11	0,34	0,34	0,34	6,99	6,92	6,85	93,27
0:12	0,5	0,51	0,5	10,25	10,15	10,06	94,38
0:13	0,66	0,67	0,66	13,38	13,32	13,24	94,53
0:14	0,82	0,83	0,82	16,61	16,52	16,44	94,87
0:15	0,99	0,99	0,99	19,8	19,71	19,66	95,29
0:16	0,85	0,86	0,86	16,98	17,02	17,14	95,61
0:17	0,69	0,7	0,7	13,81	13,87	13,94	95,75
0:18	0,53	0,54	0,54	10,6	10,79	10,74	96,41
0:19	0,37	0,38	0,38	7,37	7,43	7,58	96,55
0:20	0,21	0,23	0,22	4,22	4,25	4,32	96,9
0:21	0,35	0,36	0,35	6,97	6,92	6,83	96,93
0:22	0,51	0,52	0,51	10,16	10,1	10,02	96,78
0:23	0,68	0,69	0,67	13,37	13,29	13,31	97,27
0:24	0,84	0,85	0,84	16,54	16,51	16,45	97,27
0:25	1	1,02	1	19,75	19,71	19,64	97,28
0:26	0,87	0,89	0,88	16,99	17,08	17,2	97,39
0:27	0,71	0,73	0,72	13,78	13,88	13,95	97,47
0:28	0,55	0,58	0,56	10,62	10,7	10,78	97,66
0:29	0,39	0,42	0,4	7,39	7,46	7,56	97,79
0:30	0,24	0,27	0,24	4,2	4,25	4,37	97,87
0:31	0,38	0,4	0,37	6,99	6,9	6,81	98,02
0:32	0,54	0,57	0,53	10,19	10,06	10,05	98,03
0:33	0,71	0,73	0,7	13,35	13,37	13,19	98,15
0:34	0,87	0,9	0,87	16,55	16,61	16,4	98,22
0:35	1,04	1,07	1,03	19,73	19,67	19,62	98,23
0:36	0,9	0,94	0,91	16,99	17,09	17,2	98,35
0:37	0,75	0,79	0,75	13,8	13,86	13,99	98,59
0:38	0,59	0,63	0,6	10,62	10,66	10,79	98,74
0:39	0,43	0,47	0,44	7,39	7,49	7,56	98,78
0:40	0,28	0,32	0,28	4,27	4,29	4,36	98,66
0:41	0,42	0,45	0,41	6,93	6,88	6,8	98,71
0:42	0,58	0,62	0,58	10,12	10,09	10,06	98,66
0:43	0,75	0,79	0,74	13,34	13,32	13,21	98,66
0:44	0,91	0,96	0,91	16,53	16,48	16,4	98,64
0:45	1,08	1,12	1,07	19,72	19,67	19,59	98,76
0:46	0,95	1	0,96	17,04	17,06	17,17	98,78
0:47	0,79	0,84	0,8	13,79	13,9	13,98	98,75
0:48	0,63	0,68	0,64	10,64	10,7	10,77	98,88
0:49	0,48	0,53	0,48	7,44	7,51	7,58	98,97
0:50	0,32	0,37	0,33	4,23	4,31	4,37	99,05
0:51	0,46	0,5	0,45	6,95	6,87	6,79	99,01
0:52	0,62	0,67	0,62	10,12	10,09	10	99
0:53	0,79	0,83	0,78	13,32	13,27	13,18	99
0:54	0,95	1	0,95	16,51	16,47	16,42	99,04
0:55	1,12	1,16	1,11	19,71	19,65	19,59	99,08
0:56	0,99	1,04	1	17,09	17,08	17,2	99,02
0:57	0,83	0,88	0,84	13,85	13,85	14,03	99,12
0:58	0,67	0,72	0,68	10,64	10,68	10,86	99,25
0:59	0,51	0,56	0,52	7,43	7,52	7,58	99,28
1:00	0,35	0,41	0,36	4,29	4,27	4,4	99,25

