

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

**Boštjan Tratar**

# ANALIZA METOD POSPEŠENEGA STARANJA ELEKTRONSKIH KOMPONENT

DIPLOMSKO DELO NA VISOKOŠOLSKEM STROKOVNEM ŠTUDIJU

Mentor: prof. dr. Miha Mraz

Ljubljana, 2010



Št. naloge: 00492/2009

Datum: 15.12.2009

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Kandidat: **BOŠTJAN TRATAR**

Naslov: **ANALIZA METOD POSPEŠENEGA STARANJA ELEKTRONSKIH  
KOMPONENT**

**ANALYSIS OF ACCELERATED LIFE TEST METHODS OF  
ELECTRONIC COMPONENTS**

Vrsta naloge: Diplomsko delo visokošolskega strokovnega študija

Tematika naloge:

Kandidat naj v svojem delu preuči metode za pospešeno staranje elektronskih komponent. Pri tem naj se usmeri predvsem na temperaturno pogojene postopke ob vnaprej podanih tehničnih karakteristikah konkretnega primera temperaturne komore.

Mentor:

prof. dr. Miha Mraz



Dekan:

prof. dr. Franc Solina

# IZJAVA O AVTORSTVU

## diplomskega dela

Spodaj podpisani Boštjan Tratar,

z vpisno številko 63030012,

sem avtor diplomskega dela z naslovom:

### ANALIZA METOD POSPEŠENEGA STARANJA ELEKTRONSKIH KOMPONENT

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal samostojno pod mentorstvom (naziv, ime in priimek)

prof. dr. Mihe Mraza

in somentorstvom (naziv, ime in priimek)

/

- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela v zbirki »Dela FRI«.

V Ljubljani, dne: 10.02.2010

Podpis avtorja:

Tratar Boštjan

## **ZAHVALA**

Ko sem bil soočen z izbiro mentorja mojega diplomskega dela, nisem okleval. Prof. dr. Miha Mraz je s svojim načinom dela in predavanj vzbudil veliko zanimanja za predmete, ki jih poučuje in je med nami študenti pustil velik vtis. Vzrok, da sem ga izbral za mojega mentorja, je tudi področje, ki ga prof. pokriva s svojim delovanjem na fakulteti. Tako bi se ob tej priložnosti iskreno zahvalil mojemu mentorju, prof. dr. Mihi Mrazu za vse ideje, nasvete, smernice ter pomoč ob nastajanju diplomskega dela .

Seveda se zahvaljujem tudi sošolcem in prijateljem za pomoč in sodelovanje v času študija.

Velika zahvala gre pa tudi moji družini, ki me je v času študija podpirala in mi omogočila vse, da sem lahko uspešno končal vse izpite ter da sem prišel do diplome.

## **Povzetek**

Odpravljanje napak in čim večja zanesljivost komponent sta bistvenega pomena pri ustvarjanju brezhibnih izdelkov v današnjem času. V pričujočem diplomskem delu sem predstavil pospešeno staranje elektronskih komponent, analizo metod in vrste testov pospešenega staranja. Navedel sem namen testov in metod pospešenega staranja.

Kot sem ugotovil, je primarni namen testov ugotavljanje življenjske dobe različnih izdelkov in produktov. S testiranjem določimo tudi delež odpovedi teh produktov, ki jo imenujemo intenzivnost odpovedovanja. Predstavil sem vrste obremenitev, s katerimi se doseže pospešeno staranje, lotil sem se tudi aktivacijske energije, degradacijskih procesov ter podal primer.

Ko sem razjasnil pojme staranja in pospešenega staranja, so na vrsto prišli testi in fizikalni modeli pospešenega staranja. Poudariti velja bistvene lastnosti posameznih testov, saj na podlagi teh lahko izberemo pravo testno komoro za izvedbo testa. Pri fizikalnih modelih sem največ pozornosti posvetil Arrheniusovem, Coffin – Mansonovem in Eyringovem modelu.

Na koncu sem delo zaokrožil v poglavju, kjer sem naredil dva primera testov s pomočjo specifikacij testne komore *Vötsch Industrietechnik* in sicer modela WVC C 600-70 VIT. V ta sklop sem umestil tudi razdelitev komor ter nekaj pomembnejših proizvajalcev ter izvajalcev testov pospešenega staranja.

**Ključne besede:** Pospešeno testiranje življenjske dobe, vrste pospešenih testov, Arrhenius, Coffin – Manson, testne komore.

## Abstract

Trouble shooting and maximize the reliability of components are essential in creating a seamless product today. In this diploma thesis, I presented the accelerated life of electronic components, analysis methods and types of accelerated life tests. I have the purpose of tests and methods of accelerated life.

As I noted, is the primary purpose of the tests determining the life of different products. Tests determined the proportion of failure of these products, which we call the intensity of failure. I introduced species load, in order to achieve accelerated life, I also embarked on activation energy, degradation processes and make the case.

When I clarified the concepts of aging and accelerated life, are coming tests and physical models of accelerated life. Stressed the essential features of the individual tests, given on the basis of these we can choose the right test chamber for the test. In physical models, I have devoted most attention Arrhenius, Coffin – Manson and Eyring models.

Finally, I rounded the work in the section, where I did two examples of tests with the help of the specification test chamber *Vötsch Industrietechnik* namely model WVC C 600-70 VIT. In this series, I placed the chambers and the distribution of some major producers and providers of accelerated life tests.

Keywords: Accelerated life testing, types of accelerated tests, Arrhenius, Coffin – Manson, HALT test chambers.

## Kazalo

|       |                                                           |    |
|-------|-----------------------------------------------------------|----|
| 1.    | UVOD .....                                                | 1  |
| 2.    | POSPEŠENO TESTIRANJE ELEKTRONSKIH KOMPONENT .....         | 3  |
| 2.1   | INTENZIVNOST ODPOVEDOVANJA .....                          | 3  |
| 2.2   | VRSTE OBREMENITEV .....                                   | 4  |
| 2.3   | OPIS DEGRADACIJSKIH PROCESOV .....                        | 4  |
| 2.4   | STARANJE .....                                            | 5  |
| 2.5   | POSPEŠENO TESTIRANJE ŽIVLJENJSKE DOBE .....               | 6  |
| 2.6   | DOLOČANJE ŽIVLJENJSKIH DOB IN AKTIVACIJSKE ENERGIJE ..... | 7  |
| 2.6.1 | DOLOČITEV AKTIVACIJSKE ENERGIJE .....                     | 8  |
| 3.    | VRSTE POSPEŠENIH TESTOV .....                             | 9  |
| 3.1   | OSNOVNA DELITEV TESTOV .....                              | 9  |
| 3.1.1 | HLADNI KORAK .....                                        | 9  |
| 3.1.2 | VROČI KORAK .....                                         | 10 |
| 3.1.3 | KORAK Z EKSTREMNO SPREMINJAJOČO SE TEMPERATURO .....      | 10 |
| 3.1.4 | KORAK Z VIBRACIJAMI .....                                 | 11 |
| 3.1.5 | KOMBINIRAN OKOLJSKI STRES .....                           | 12 |
| 3.2   | MEJA UNIČENJA .....                                       | 13 |
| 4.    | FIZIKALNI MODELI POSPEŠENEGA TESTIRANJA .....             | 14 |
| 4.1   | ARRHENIUSOV MODEL .....                                   | 14 |
| 4.2   | COFFIN – MANSONOV MODEL .....                             | 15 |
| 4.3   | EYRINGOV MODEL .....                                      | 17 |
| 4.4   | DRUGI MODELI .....                                        | 18 |
| 5.    | SPLOŠNI KONCEPTI ZA UPORABO TEMPERATURNIH KOMOR .....     | 20 |
| 5.1   | OPISI KOMOR .....                                         | 20 |
| 5.2   | PRIMER TESTA "Vroči korak" .....                          | 23 |
| 5.3   | PRIMER TESTA "Hladni korak" .....                         | 25 |
| 5.4   | PRIMER TESTA "Coffin – Manson" .....                      | 27 |
| 6.    | ZAKLJUČEK .....                                           | 30 |
| 7.    | LITERATURA .....                                          | 31 |

## Kazalo slik

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Slika 1:</i> Različne življenjske faze sistema [2].                                                   | 3  |
| <i>Slika 2:</i> Degradacija plastnega upora [3].                                                         | 5  |
| <i>Slika 3:</i> Pospešeno staranje za zagotavljanje zanesljivosti izdelkov [4].                          | 7  |
| <i>Slika 4:</i> Življenjski časi v odvisnosti od temperature [3].                                        | 8  |
| <i>Slika 5:</i> Prikaz testa hladni korak [9].                                                           | 9  |
| <i>Slika 6:</i> Prikaz testa vroči korak [9].                                                            | 10 |
| <i>Slika 7:</i> Prikaz testa spreminjajoče temperature [9].                                              | 11 |
| <i>Slika 8:</i> Prikaz testa z vibracijami [9].                                                          | 12 |
| <i>Slika 9:</i> Prikaz testa kombiniran okoljski stres [9].                                              | 13 |
| <i>Slika 10:</i> Prikaz testa meja uničenja [9].                                                         | 13 |
| <i>Slika 11:</i> Prikaz vpliva višine paste za spajkanje na $N_f$ [16].                                  | 16 |
| <i>Slika 12:</i> Temperaturna in klimatska komora <i>Vötsch Industrietechnik</i> serije VT3 in VC3 [24]. | 21 |
| <i>Slika 13:</i> Komora za hitre temperaturne spremembe <i>Espec TCC</i> [25].                           | 22 |
| <i>Slika 14:</i> Vibracijska testna komora <i>Vötsch Industrietechnik</i> serije VTV [26].               | 23 |
| <i>Slika 15:</i> Test vroči korak za naš primer – stopnica.                                              | 24 |
| <i>Slika 16:</i> Test vroči korak do zgornje temp. limite komore.                                        | 25 |
| <i>Slika 17:</i> Test hladni korak do spodnje temp. limite komore - stopnica.                            | 26 |
| <i>Slika 18:</i> Test hladni korak do spodnje temp. limite komore.                                       | 27 |

## Kazalo tabel

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Čas do odpovedi mehanizma pri nižjih temperaturah [15]. .....  | 16 |
| Tabela 2: Vrednosti temperature za sliko 15.....                         | 24 |
| Tabela 3: Specifične delovne temperature nekaterih komponent [21]. ..... | 25 |
| Tabela 4: Vrednosti temperature za sliko 17.....                         | 26 |

## **Seznam kratic**

**ALT** – Accelerated Life Test,

**HALT** – Highly Accelerated Life Test,

**HASS** – Highly Accelerated Stress Screen,

**Ea** – Activation Energy,

**GRMS** – G Root Mean Square,

**IEC** – International Electrotechnical Commission.

## 1. UVOD

Vsebina teme za diplomsko delo, ki se navezuje na analizo metod pospešenega staranja elektronskih komponent, je bila zame pojem, za katerega nisem velikokrat slišal. Že sam pojem "pospešeno staranje", sam po sebi za laika zveni malo čudno. Zakaj bi sploh nekdo želel uspešno uporabljati pospešeno staranje? Če na ta pojem gledamo z očmi širše množice, si mogoče predstavljamo predvsem staranje ljudi, predmetov ali česar koli v vsakdanjem življenju. Vendar temu ni tako, v mojem primeru pospešenega staranja gre za predvsem druge stvari.

Pospešeno staranje je testna metoda, ki se uporabi za oceno uporabne življenjske dobe izdelka, ko dejanski podatki o življenjski dobi niso na voljo. To so izdelki, ki ne obstajajo dovolj dolgo, da bi šli skozi svojo celotno uporabno življenjsko dobo. Ali drugače povedano, to so izdelki, ki prihajajo na tržišče in nimajo še podatkov o tem, koliko dolgo izdelki brezhibno delujejo. Za primer lahko vzamemo nov tip motorja avtomobila, ki še ni v ponudbi.

Ko pogledamo v zgodovino področja pospešenega staranja [1], je bila že 1899 leta omenjena tehnika umetno pospešeno propadanje papirja s pomočjo toplote, ki jo je opisal W. Herzberg. Pospešeno staranje se je na Švedskem in v Združenih državah Amerike dodatno izpopolnilo v letu 1920 s testi, ko so s pomočjo sončne svetlobe in povišane temperature razvrščali trajnost različnih dokumentov. Leta 1929 je bila pogosto uporabljena metoda, pri kateri je bilo 72 ur pri 100 stopinjah Celzija enakovredno 18 – 25 let naravnega staranja. Leta 1950 so raziskovalci začeli na vprašanje veljavnosti testov pospešenega staranja, ki se sklicujejo na suho toploto in eno temperaturo, poudarjati, da relativna vlažnost vpliva na kemijske procese, ki proizvajajo degradacijo papirja in da imajo reakcije, ki povzročijo razgradnjo, različne aktivacijske energije. To je vodilo raziskovalce, kot sta Bear in Lindström, da se zavzemajo za pospešeno staranje z uporabo tehnike Arrheniusove enačbe in realne relativne vlažnosti.

Ko gre za staranje elektronskih komponent, se ne moremo izogniti dejstvu, da se elektronske komponente starajo lahko na več smiselnih načinov. Tako danes ni nič nenavadnega, ko si nekdo kupi nov računalnik in bo ta lahko čez leto že zastarel. Vzrok tega je, da se tehnologija hitro razvija in ko pride določen izdelek na trg, se mogoče v podjetju že razvija zmogljivejši ali uporabnejši nadomestek oz. posodobljena verzija izdelka. Na trgu hkrati na določenih področjih vlada velika konkurenca, zato je za proizvajalce bistvenega pomena, da se njihovi izdelki dobro prodajajo. Pogoj dobri prodaji pa je seveda zanesljivost izdelka. Podjetja morajo veliko pozornost posvetiti odpravljanju napak, od tistih, ki se pojavijo skozi proizvodnjo izdelka in vse tja do tistih začetnih – poporodnih napak, ko izdelek pride iz proizvodnje. Seveda morajo poskrbeti tudi za odpravo čim več tistih napak, ki se pojavijo pri uporabi izdelka skozi njegovo življenjsko dobo. Pri tem se pojavi tudi najbolj možni črni scenarij, to je pa odpoved izdelka. Cilj vsega tega je imeti čim manj odpovedi izdelka in reklamacij, kar pripomore k zadovoljstvu strank. Sploh, če vemo, kako hitro se sliši slab glas od ust do ust ter da konkurenca nikoli ne počiva. Podjetja si ne smejo privoščiti, da izgubljajo tržni delež, zato stremijo k odpravi vseh teh napak ter k doseganju čim večje zanesljivosti izdelka.

Tukaj pride na površje pospešeno staranje elektronskih komponent in metode oz. testi pospešene življenjske dobe izdelka. Vrste testov in metod bom razložil v naslednjih poglavjih,

saj je teh kar nekaj in se bomo posvetili vsakemu posebej. Omenim naj le, da gre pri testih za različne vplive temperature, vlage, vibracij ter drugih dejavnikov in obremenitev na komponento, ter si tako ustvarimo okolje, ki simulira hitrejše staranje. Če komponento tudi izpostavimo ekstremnim razmeram, lahko določimo tudi mejne obremenitve, s katerimi določimo meje delovanja komponente. S tem podjetja na nek način zagotovijo nemoteno uporabo komponent v določenem oziroma dovoljenem območju, vsaka uporaba izven tega območja in posledična odpoved komponente, pa je krivda uporabnika samega, ker ni upošteval mejnih obremenitev.

Za izvajanje teh testov in razmer potrebujemo testne komore (angl. *test chambers*). Komore so zasnovane tako, da nam omogočajo spremembe temperatur, vlage, vibracij, količine zraka itd. Obstaja veliko vrst komor. Ogledali si jih bomo v nadaljevanju. Kot zanimivost naj povem, da je možno dobiti prav vse možne velikosti komor, tako tiste mini komore, za testiranje čipov vse do tistih velikih komor, skozi katere lahko zapeljemo avto ali celo tovornjak in ga izpostavimo obremenitvam (angl. *walk-in chamber*). Rezultate testov in ugotovitev se spremlja monitorsko na priloženih monitorjih komor, merjenja in odčitavanja pa temeljijo na senzorski tehniki. Komore, ki so namenjene vibracijskim testom, simulirajo vibriranje s pomočjo hidravličnih, mehanskih ali elektro – dinamičnih vibratorjev. Simuliranje vibracij v kombinaciji s spreminjanjem temperature in klimatskimi učinki na materialih in sestavnih delih, npr. na vozilih, je danes bolj pomembno kot kdajkoli prej. Upoštevati moramo bremena, ki se pojavijo med prevozom z železnicami ali ladjami, kakor tudi v letalskem prometu, saj se letalske nesreče še vedno dogajajo.

V nadaljevanju se bomo posvetili predvsem definiciji staranja, vplivom obremenitev in intenzivnosti odpovedovanja. Največji poudarek bo na delitvi in opisu testov ter metod za analizo pospešenega staranja, predstavil pa bom tudi vrste komor in nekaj primerov metod in testov.

## 2. POSPEŠENO TESTIRANJE ELEKTRONSKIH KOMPONENT

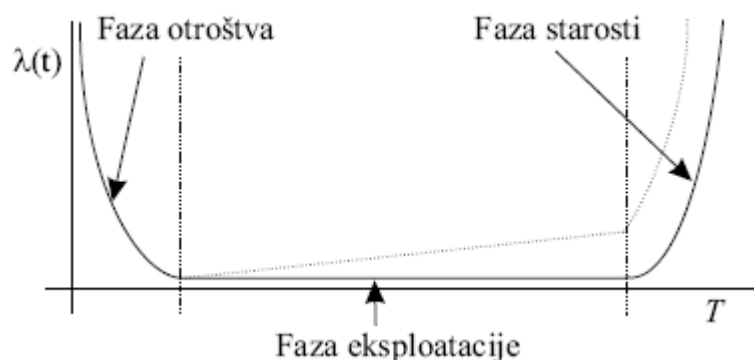
Primarni namen testov pospešene življenjske dobe je določitev življenjske dobe različnih izdelkov in produktov. S testiranjem določimo tudi delež odpovedi teh produktov, ki jo imenujemo intenzivnost odpovedovanja (angl. *failure rate* ali *hazard function*). Sekundarni namen izvajanja teh testov je iskanje šibkih točk dizajna ali uporabljenih komponent. Na tak način veliko prispevamo k izboljšanju produkta, predvsem na področju zanesljivosti. Med testiranjem produkta v komori so informacije o delovanju posameznih sestavnih delov izdelka nadzorovane monitorsko, ker le na tak način lahko identificiramo natančne časovne točke odpovedi.

### 2.1 INTENZIVNOST ODPOVEDOVANJA

Intenzivnost odpovedovanja, ki jo označujemo z  $\lambda$ , omogoča določanje števila napak, ki se pojavijo v opazovanem časovnem intervalu.

Življenjsko dobo posamezne komponente lahko razdelimo na tri faze:

- *faza otroštva*: v tej fazi intenzivnost odpovedovanja  $\lambda(t)$  v času hitro upada zaradi testiranja, ki iz populacije eliminira okvarjene komponente (če niso popravljive), ali pa se omenjene komponente popravi;
- *faza eksploatacije*: v tej fazi imamo opravka s konstantno ali večinoma počasi rastočo intenzivnostjo odpovedovanja  $\lambda(t)$ ;
- *faza starosti*: v tej fazi začne intenzivnost odpovedovanja  $\lambda(t)$  zelo hitro rasti predvsem pri strojnih komponentah, kjer pride do dotrajanosti materialov;



Slika 1: Različne življenjske faze sistema [2].

Glede na te faze imamo tudi različne relacije intenzivnosti odpovedovanja. Z vidika uporabnika je najzanimivejša intenzivnost odpovedovanja v eksploatacijski dobi.

Tako lahko intenzivnost odpovedovanja  $\lambda(t)$  zapišemo z relacijo

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}, \quad (1.1)$$

kjer je  $f(t)$  funkcija gostote verjetnosti časa odpovedi,  $R(t)$  pa funkcija zanesljivosti in odpovedovanja.

Poznamo različne vrste  $\lambda(t)$  v eksploatacijski dobi [2]:

- konstantna intenzivnost odpovedovanja (tipična predvsem za elektronske komponente, kot so tranzistorji, upori, kondenzatorji in integrirana vezja),
- linearno rastoča intenzivnost odpovedovanja (pojavlja se predvsem pri obrabljivih komponentah mehanske narave, od elektronskih komponent so to predvsem releji),
- linearno padajoča intenzivnost odpovedovanja v otroški dobi (tipična za pozno otroško dobo tako za mehanske kot elektronske komponente),
- Weibullov model intenzivnosti odpovedovanja (v primerih, ko intenzivnost odpovedovanja ne moremo ponazoriti s konstanto ali linearno funkcijo);

## 2.2 VRSTE OBREMENITEV

V industriji srečamo različne načine obremenitev, s katerimi se doseže pospešeno staranje. Navedimo nekaj osnovnih primerov:

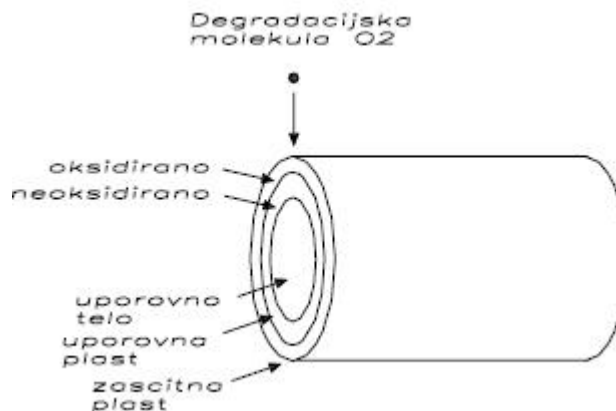
- temperaturna obremenitev (povišana, znižana temperatura elementa),
- električna obremenitev (povišana napetost oz. tok na elementu),
- klimatska obremenitev (povišana vlaga v ambientu elementa),
- korozijska obremenitev (povišana slanost – slana para v ambientu elementa),
- mehanska obremenitev (udarci, pospeški, vibracija, rotacija...);

Pogosto se v praksi uporabijo zaradi večjega učinka istočasne kombinacije teh obremenitev. Znan primer iz industrije je npr. standardna klimatska obremenitev [3], ki je obremenitev oz. test s povišano temperaturo, vlago in slanostjo v dogovorjenem trajanju.

## 2.3 OPIS DEGRADACIJSKIH PROCESOV

Degradacijski procesi so škodljivi, počasni fizikalni ali kemijski procesi, ki potekajo v elementu kot posledica vplivov iz okolice ali iz elementa samega. Tako med te procese lahko uvrstimo počasne kemijske reakcije zaradi prisotnih agresivnih snovi iz okolice ali iz elementa samega (npr. korozija metalizacijske linije v tiskanem ali integriranem vezju) in pa npr. mehanske razpoke v strukturi zaradi temperaturnih šokov pri segrevanju in ohlajanju elementa med delovanjem.

Degradacijski procesi potekajo počasi, vendar lahko med dolgoletnim delovanjem privedejo do bistvenih sprememb v strukturi in s tem v lastnostih komponent. Kaj se dogaja s strukturo in kake razmere so med degradacijo, ponazorimo na primeru upora, prikazanega na sliki 2.



Slika 2: Degradacija plastnega upora [3].

Degradacijske molekule, npr. kisika  $O_2$ , ki pridejo do površine elementa iz ambienta, zaradi povišane temperature v obremenjenem uporu tekom let počasi difundirajo v globino strukture. Ko neka molekula  $O_2$  prodre do uporovne plasti, tam reagira z materialom uporovne plasti ter jo oksidira in s tem uporovni material spremeni v izolator. Znan tak primer je npr. degradacija ogljenoplastnega upora, kjer pri oksidaciji uporovne plasti nastaja plin, ki stalno izhaja. Omenjeni pojav zapišemo s simboličnim kemijskim izrazom (2.1).



Uporovna plast se torej med dolgoletnim procesom staranja stalno tanjša in zato upornost upora s časom stalno raste. Tako spremembo upornosti imenujemo degradacija upora  $\Delta R$ . Ko upornost upora med dolgoletnim delovanjem preseže od proizvajalca predpisano maksimalno dopustno vrednost upornosti  $R_{max}$ , element ni več zanesljiv in ga je potrebno zamenjati z novim. Temu pravimo *odpoved* elementa.

Pogoj za odpoved se torej glasi:

$$R > R_{max}. \quad (2.2)$$

## 2.4 STARANJE

Staranje je po definiciji počasno spreminjanje strukture elementa zaradi degradacijskih procesov med dolgoletnim delovanjem.

Staranje (angl. *aging*, *ageing*) elektronskih elementov in sistemov ima velik vpliv na njihovo pravilno dolgoročno delovanje. Pospešimo ga lahko z intenziviranjem različnih parametrov,

ki pospešujejo degradacijske procese. V praksi običajno proces intenziviranja takega parametra imenujemo *obremenitev*, posledico tega postopka pa *pospešeno staranje*.

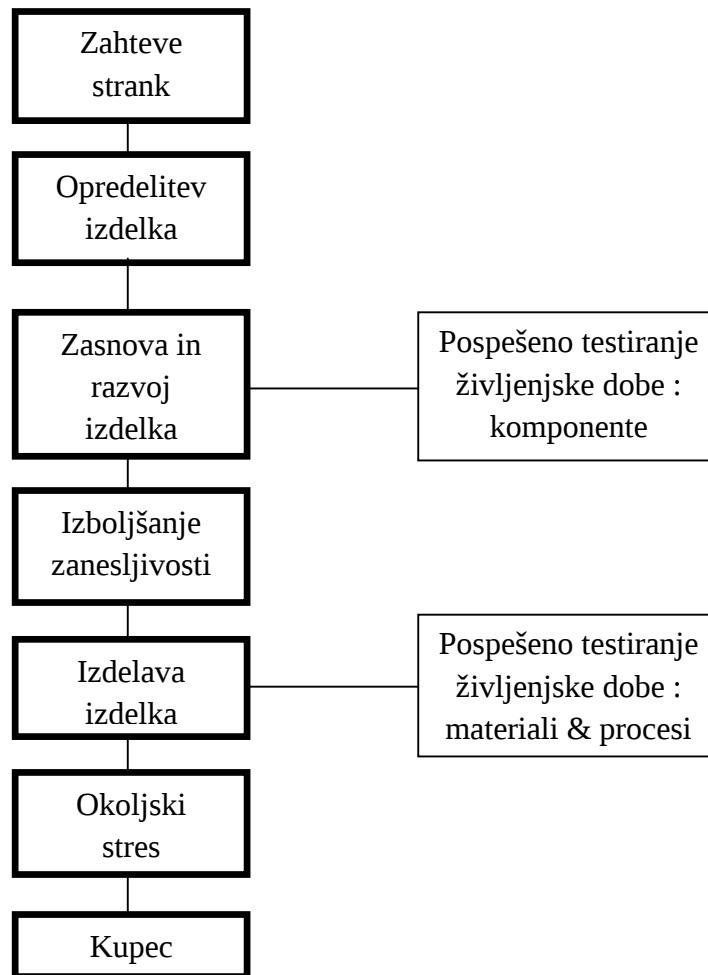
## 2.5 POSPEŠENO TESTIRANJE ŽIVLJENJSKE DOBE

Pospešeno staranje (angl. *accelerated life*) proizvajalci izkoriščajo zato, da proizvedeni elementi čim hitreje preživijo začetno otroško obdobje visokih odpovedi v tovarni. Slabi elementi tako odpovedo že v tovarni in jih izločijo, na tržišče pa pridejo le dobri elementi z višjo zanesljivostjo. Pospešeno staranje se uporablja tudi za določitev življenjskih časov elementov in sistemov ter za določitev aktivacijske energije degradacije.

Slika 3, povzeto po viru [4], prikazuje, kako pospešeno staranje, preizkus izboljšanja zanesljivosti in okoljski stres prilagajajo oblikovanje izdelkov, razvoj in cikel proizvodnje. On-line procesi, ki so prikazani kot pravokotniki so tisti procesi, ki so del načrtovanja izdelkov in proizvodni cikel. Ti se izvajajo z vzorci iz dejanskega proizvoda.

Off-line procesi so tisti, ki niso del oblikovanja proizvodov in proizvodnega cikla. Običajno se ne izvajajo na dejanskih vzorcih proizvoda, ampak na splošnih vzorcih, ki jih predstavljajo materiali in sestavni deli ali postopki, ki se uporabljajo za sestavo izdelka. Pospešeni testi se izvajajo na sestavnih delih, materialih in proizvodnih procesih z namenom, da se določi življenjska doba uporabe izdelka. Njihov namen ni izpostavljanje napak, ampak identifikacija in količina napak, ter odpovedi mehanizmov, ki jih povzročajo proizvodi in obraba ob koncu njihove življenjske dobe.

Pospešene teste življenjske dobe navadno poimenujemo kvalifikacijski testi, ker jih uporabljajo za razvrstitev komponent, materialov ali postopkov za vse funkcijske vloge. Bolj realističen pristop je zbiranje podatkov o hitrem pospešenem testu življenjske dobe za določene skupine preizkusnih razmer in nato za ekstrapolacijo teh rezultatov za vsako vlogo.



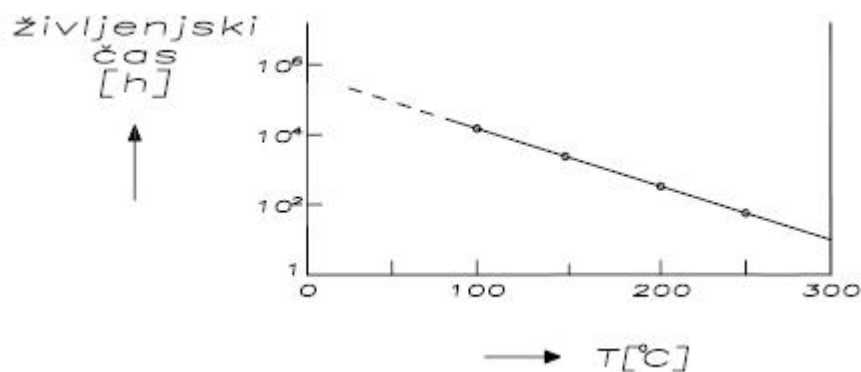
Slika 3: Pospešeno staranje za zagotavljanje zanesljivosti izdelkov [4].

## 2.6 DOLOČANJE ŽIVLJENJSKIH DOB IN AKTIVACIJSKE ENERGIJE

Življenjska doba je povprečni čas, ki ga nek element ali sistem preživi od začetka svojega delovanja do odpovedi. Eksperimentalno ugotavljanje življenjskih časov nekega elementa ali sistema bi v normalnih pogojih delovanja pri sobni temperaturi trajalo predolgo za praktično uporabo, saj tipične življenjske dobe sistemov znašajo 10 let in več, posameznih elementov pa še mnogo več. Zato degradacijo oz. staranje skušamo pospešiti z intenziviranjem nekega parametra, ki pospešuje degradacijske procese ter tako skrajšamo življenjske čase in s tem čas meritev.

Ker z višanjem temperature poteka staranje hitreje, bomo pogledali, kako določimo življenjske čase s povišano temperaturo [3].

Merimo povprečne čase do odpovedi oz. življenjske čase pri različnih povišanih temperaturah, tako da časi meritev niso predolgi. Rezultat prikazuje slika 4 (polna črta). Z ekstrapolacijo na nižje temperature (črtkana črta) dobimo oceno za pričakovane življenjske čase na nižjih temperaturah, katerih sicer zaradi dolgotrajnih meritev ne bi mogli določiti.



Slika 4: Življenjski časi v odvisnosti od temperature [3].

### 2.6.1 DOLOČITEV AKTIVACIJSKE ENERGIJE

Aktivacijska energija  $E_a$  je najmanjša količina energije, ki je potrebna, da kemijska reakcija steče. Pojem aktivacijske energije je uvedel švedski kemik Svante Arrhenius.  $E_a$  si lahko predstavljamo kot višino ovire ali praga, ki ločuje dva minimuma potencialnih energij reaktantov in produktov kemijske reakcije. Da bi imela kemijska reakcija omembe vredno hitrost, mora imeti dovolj veliko število molekul energijo, ki je enaka ali večja od aktivacijske energije. Določitev aktivacijske energije [3] lahko izvedemo s pomočjo slike 4. Zaradi eksponencialne odvisnosti degradacijskih procesov od temperature in aktivacijske energije  $E_a$  lahko iz naklonskega kota premice določimo aktivacijsko energijo  $E_a$  danega degradacijskega procesa.

### 3. VRSTE POSPEŠENIH TESTOV

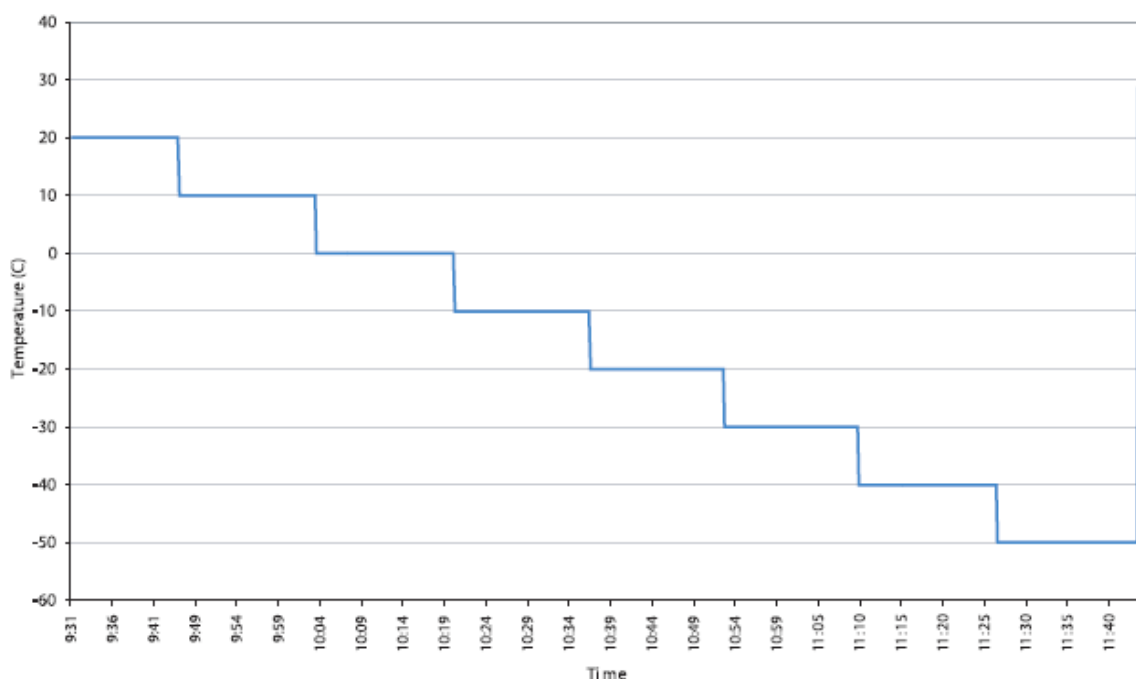
#### 3.1 OSNOVNA DELITEV TESTOV

Test pospešene življenjske dobe po [5] običajno sestavlja pet neodvisnih faz:

*hladni korak* (angl. *cold step*), *vroči korak* (angl. *heat step*), *korak z ekstremno spreminjajočo se temperaturo* (angl. *rapid temperature cycling*), *korak z vibracijami* (angl. *stepped vibration*) in pa *kombiniran okoljski stres* (angl. *combined environment stress*).

##### 3.1.1 HLADNI KORAK

S tem korakom se običajno določi najnižja temperatura delovanja naprave in posledično tudi temperatura, od katere naprej sistem ne deluje več. Odkrivajo se napake ob nizkih temperaturah, kot tudi strukturno celovitost ob nižjih ekstremnih temperaturah.

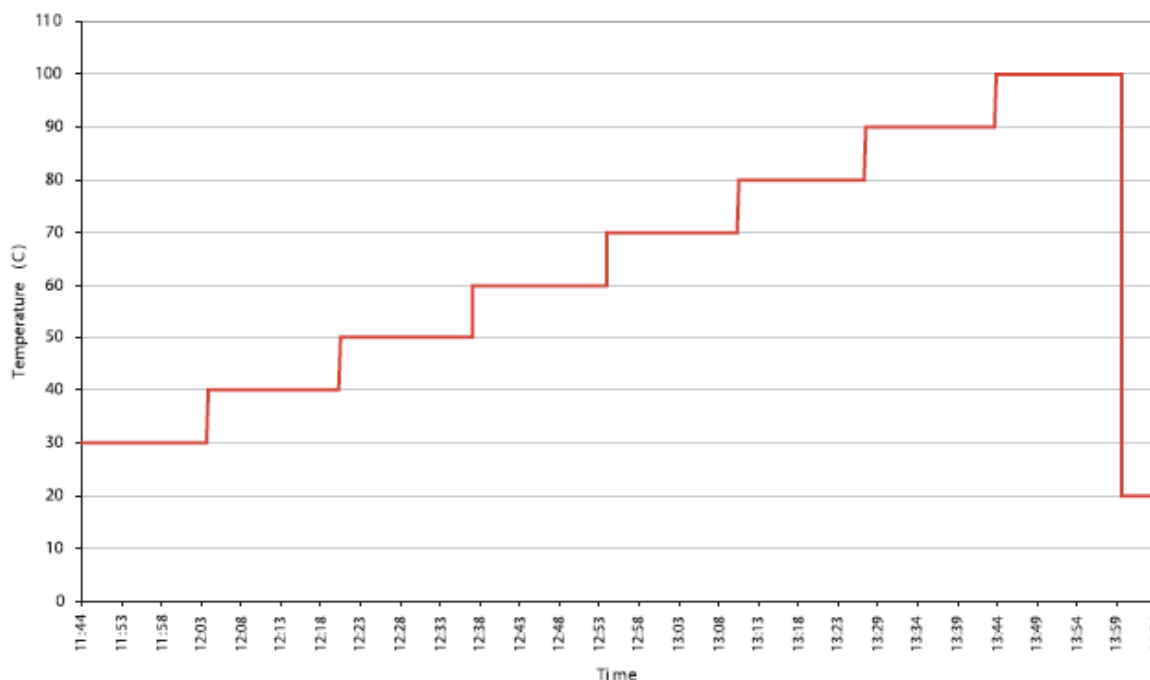


Slika 5: Prikaz testa hladni korak [9].

Testirana enota se nahaja v notranjosti komore HALT (angl. *highly accelerated life test*), kjer bo prejela pritok zraka. Testiranje se izvaja na končnem proizvodu, da se zagotovo doseže popolna funkcionalnost. Preizkus se običajno začne na sobni temperaturi, kateri mora biti testna enota izpostavljena najmanj 15 minut (angl. *dewell time*). Ko poteče prva perioda mirovanja 15 minut, se temperatura zmanjša za 10°C in preidemo na naslednjo periodo čakanja 15 minut [6]. Tako se taki koraki ponavljajo, dokler se ne določi spodnja temperaturna limita delovanja. Identificira se tudi napake, ki jih je povzročila nizka temperatura.

### 3.1.2 VROČI KORAK

Ta test preveri funkcionalnost naprave ob visokih temperaturah. Cilj je določanje zgornje temperature, pri kateri naprava še deluje in tudi določanje temperaturne meje, od katere dalje sistem ne deluje več. Ta korak se pogosto izvaja v kombinaciji s testom vlage, da bi videli, ali atmosferska voda vpliva na napravo.

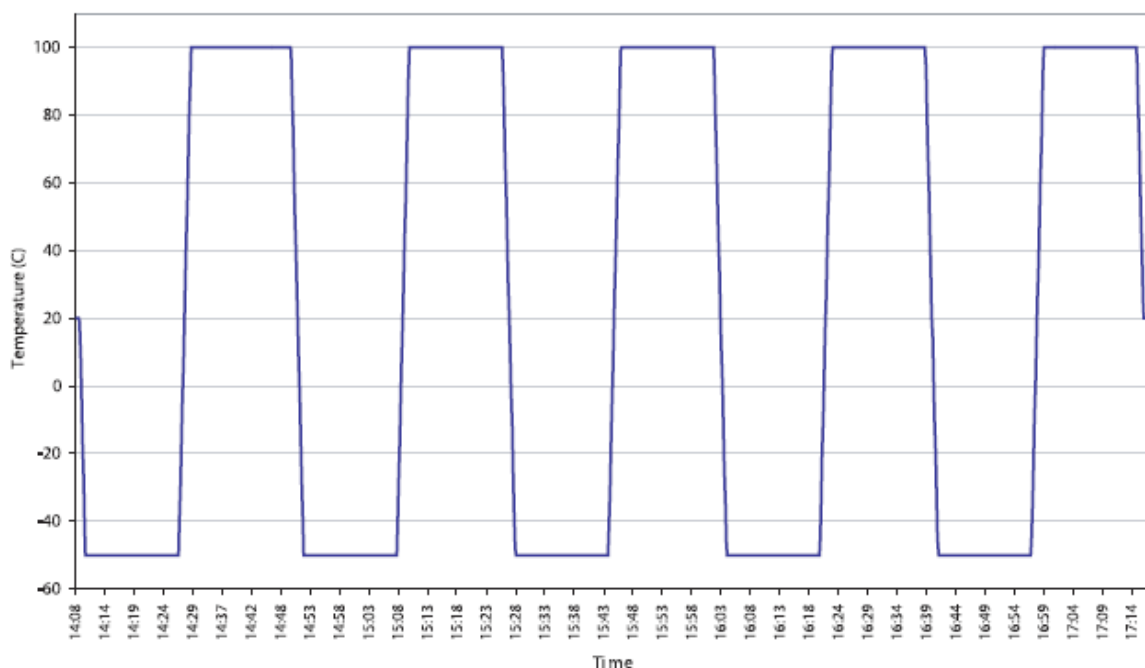


Slika 6: Prikaz testa vroči korak [9].

Testna enota se ponovno nahaja v komori, kjer bo prejela pritok zraka. Test se začne pri sobni temperaturi z najmanjšim časom zadrževanja 15 minut. Čas zadrževanja pomeni, da je enota vsaj 15 minut izpostavljena določeni temperaturi. Ko ta čas poteče, se temperatura poveča za 10°C, kateri je enota zopet izpostavljena najmanj 15 minut. Koraki se ponavljajo, dokler se ne določi zgornja temperatura, pri kateri proizvod še deluje. Prav tako se identificirajo napake, ki jih je povzročila visoka temperatura [7].

### 3.1.3 KORAK Z EKSTREMNO SPREMINJAJOČO SE TEMPERATURO

Ta korak (angl. *rapid temperature cycling*) običajno testira življenjsko dobo izdelka, ko je ta izpostavljen zelo visoki temperaturi. Spremembam temperature oz. stopnjam temperature se strokovno pravi "temperature rate". Sistem ustvari hitre spremembe temperature, vsaj 45°C na minuto [5]. Temperatura se hitro giblje med dvema skrajnostnima, da vidimo, če ta nima nobenega vpliva na napravo.

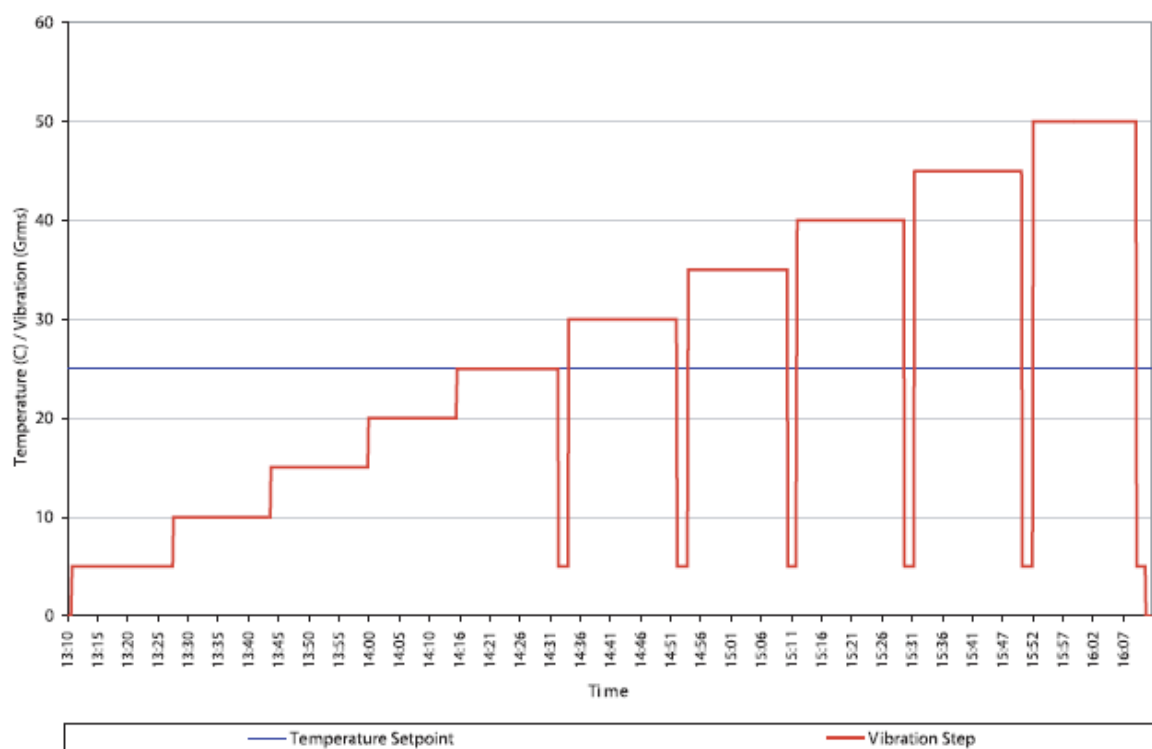


Slika 7: Prikaz testa spreminjajoče temperature [9].

Temperaturne meje so določene, temeljijo pa na spodnji in zgornji obratovalni temperaturi, ki sta bili doseženi z hladnim in vročim korakom. Test se ponovno prične pri sobni temperaturi, nato se preusmeri na spodnjo mejo, v nadaljevanju pa niha med obema ekstremnima vrednostima. Pri tem je sprememba temperature vsaj 60°C na minuto [8]. Temperatura se zadrži vsaj 10 minut na vsaki meji preden se cikel nadaljuje. Test funkcionalnosti proizvoda se opravlja skozi celoten cikel. Izvede se pet ciklov temperature med zgornjo in spodnjo mejo s stalnim nadzorom izdelka skozi testiranje [8].

### 3.1.4 KORAK Z VIBRACIJAMI

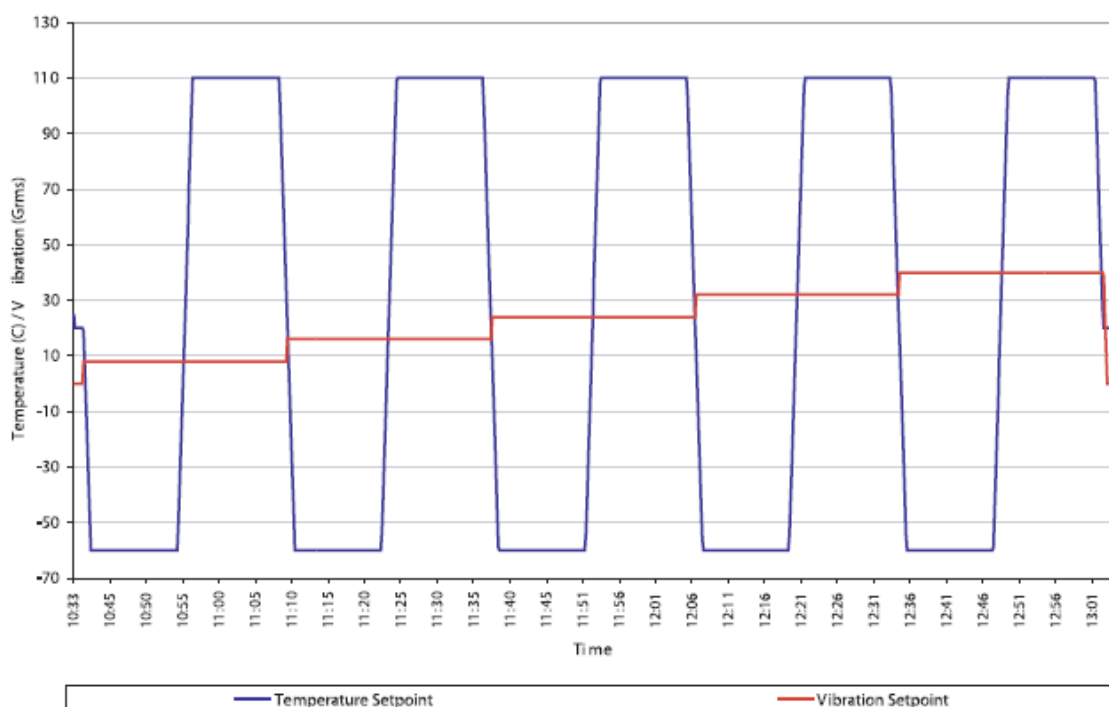
Korak z vibracijami (angl. *vibration step stress*) vključuje zvišanje stopnje vibracij v ciklu za 5 enot GRMS (angl. *g root mean square*) in se zvišuje do limite delovanja testne enote. Ta je fiksno nameščena na vibracijsko mizo. Na testno enoto sta pritrjena merilca pospeška za spremljanje odziva na vibracije. Preizkus se izvaja pri sobni temperaturi zraka in se začne pri 5 GRMS na kateri se zadrži 15 min. Potem se GRMS poveča za 5 enot in se ponovi čas zadrževanja za 15 minut. Rezultat tega testa nam odkrije potencialne okvare kot so zlomljene komponente in vodila, toleranca, razpoke, prekinitve med priključki itd. [10].



Slika 8: Prikaz testa z vibracijami [9].

### 3.1.5 KOMBINIRAN OKOLJSKI STRES

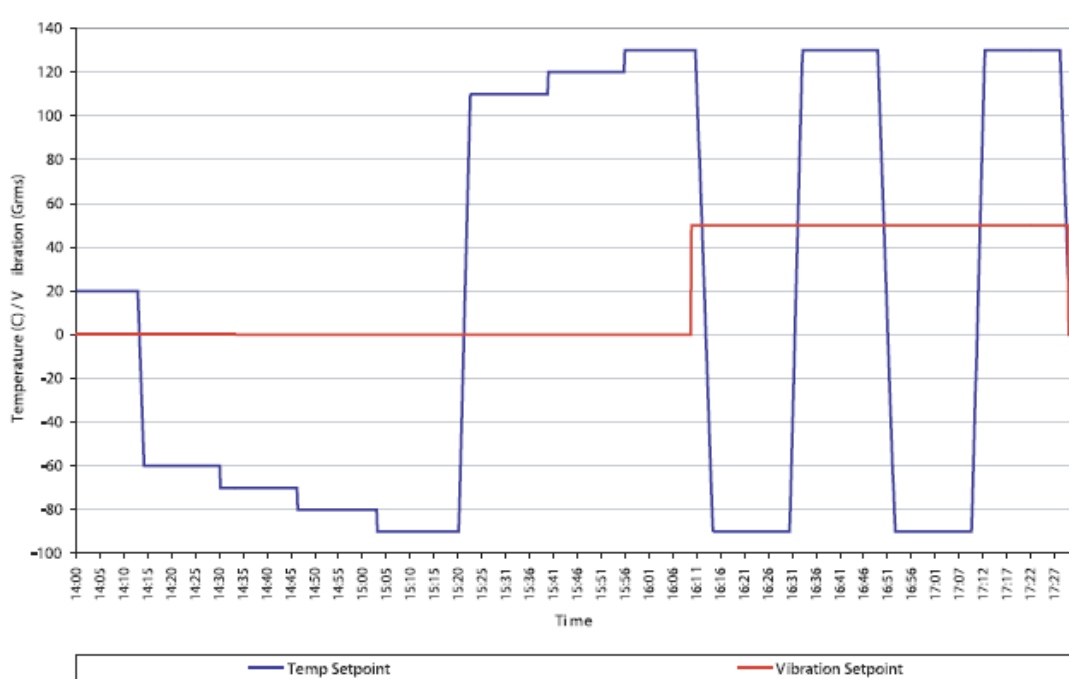
Kombiniran okoljski stres je zadnji in najtežji test pospešenega staranja. Uporabi se profil testa spreminjajoče temperature v kombinaciji s testom vibracije. Tako dobimo izjemen test s toplotnimi in vibracijskimi situacijami. Raven nihanja je običajno določena na eno petino limite delovanja dosežene v testu korak z vibracijami. Takrat se začne potek prvega toplotnega cikla. Sprememba temperature je običajno večja od 60°C, stopnja vibracije se povečuje za petino limite delovanja pri prejšnjem testu z vibracijami. Čas posameznega koraka je ponovno 15 minut [11].



Slika 9: Prikaz testa kombiniran okoljski stres [9].

### 3.2 MEJA UNIČENJA

Limita delovanja je opredeljena kot točka, pred katero vzorec ustavi delovanje, vendar se vrne v operacijo, ko se je stopnja stresa zmanjšala. Meja uničenja je raven, na kateri se ustavi delovanje izdelka in ostane neuporaben po izključitvi testnih pogojev [12].



Slika 10: Prikaz testa meja uničenja [9].

#### 4. FIZIKALNI MODELI POSPEŠENEGA TESTIRANJA

Izbrati pravi fizikalni model pospešenega testiranja življenjske dobe ni lahko, ker je izbira modelov velika. Najprej moramo ugotoviti primere okvar in na katerih stresnih situacijah je največ poudarka.

Vsi fizikalni modeli (razen Coffin - Mansona) se uporabljajo za kemične ali elektronske mehanizme, kjer je temperatura pomemben okoljski dejavnik teh mehanizmov. Coffin – Mansonov model pa se izkaže kot dober za mnoge mehanizme povezane z utrujenostjo materiala. Arrheniusov model ima pomembno vlogo v izrazih drugih splošnih fizikalnih modelov.

##### 4.1 ARRHENIUSOV MODEL

Eden prvih in najbolj uspešnih modelov pospešenih testov napoveduje, kako se spreminja čas do odpovedi s spremembo ambientalne temperature. Ta empirično podprt model je izražen z Arrheniusovo enačbo. Kot sem že omenil v 2. poglavju, je Arrheniusova enačba poimenovana po švedskem znanstveniku Svanteju Arrheniusu.

Enačba predstavlja pravilo, da se pri zmernih temperaturah z vsakim zvečanjem temperature za 10 °C, hitrost kemijske reakcije podvoji [13]

$$t_f = A \exp \left\{ \frac{\Delta H}{kT} \right\}, \quad (4.1)$$

kjer je s  $T$  označena temperatura, izmerjena v stopinjah Kelvina ( $273,16 +$  stopinj Celzija) na točki, ko proces poteka in  $k$  Boltzmannova konstanta ( $8,617 \times 10^{-5}$  elektronvolt/K). Konstanta  $A$  je skalirni faktor pri izračunu dejavnikov pospeševanja, z  $\Delta H$  ( $E_a$ ) pa označimo aktivacijsko energijo, ki je kritičen parameter v modelu. Vrednost  $\Delta H$  je odvisna od neuspeha mehanizma in vključenih materialov in se giblje od 0,3 ali 0,4 do 1,5 ali celo več.

Pospešitveni faktor staranja med višjo temperaturo  $T_2$  in nižjo temperaturo  $T_1$  je podan z izrazom

$$AF = \exp \left\{ \frac{\Delta H}{kT} \left[ \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right] \right\}. \quad (4.2)$$

Z uporabo vrednosti zgoraj navedene Boltzmannove konstante  $k$  lahko zapišemo  $T$  v stopinjah Celzija in tako dobimo izraz

$$AF = \exp \left\{ \Delta H \cdot 11605 \cdot \left[ \frac{1}{(T_1 + 273.16)} - \frac{1}{(T_2 + 273.16)} \right] \right\}. \quad (4.3)$$

Ob predpostavki, da je edini neznan parameter v tej formuli  $\Delta H$ , se po zgledu [13] giblje pospešitveni faktor med 25°C in 125°C je 133, če je vrednost  $\Delta H = 0,5$  in 17.597, če je  $\Delta H = 1,0$ .

Arrheniusov model je uspešno uporabljen za neuspeh mehanizmov, ki so odvisni od kemičnih reakcij, difuzijskih procesov ali migracijskih procesov. To zajema veliko nemehanskih okvar (utrujenost materiala), ki povzročijo okvare elektronske opreme [13].

## 4.2 COFFIN – MANSONOV MODEL

Coffin – Mansonov model temelji na temperaturnih ciklih, zaradi katerih pride do pospešene utrujenosti materiala. Predvsem je to model za mehanske okvare, utrujenost materiala ali deformacijo materiala. Ti modeli imajo tipične izraze v zvezi s cikli ekstremnih razlik ali pogostost uporabe ali spremembe temperatur, med katere štejejo tudi priklopi/izklopi naprav. Model, s katerim izračunamo število ciklov do odpovedi, je podan po [14] z izrazom

$$N_f = A f^\alpha \Delta T^\beta G(T_{max}), \quad (4.4)$$

kjer je  $N_f$  število ciklov do odpovedi,  $A$  je konstanta,  $f$  ciklična frekvenca,  $\Delta T$  je podana sprememba temperature v ciklu,  $\alpha$  eksponent ciklične frekvence,  $\beta$  temperaturni eksponent,  $T_{max}$  pa največja dosežena temperatura.  $G(T_{max})$  je Arrheniusov izraz, ocenjen na najvišji temperaturi, doseženi v posameznem ciklu in napoveduje, kako se čas do odpovedi spreminja s temperaturo po izrazu

$$G(T_{max}) = \exp \left( \frac{E_a}{K} \cdot \frac{1}{T_{max}} \right). \quad (4.5)$$

Tipični vrednosti za eksponent ciklične frekvence  $\alpha$  in eksponent  $\beta$  (angl. *the temperature range exponent*) sta okoli  $-1/3$  za  $\alpha$  in 2 za  $\beta$ . Odvisni sta predvsem od neuspeha mehanizma in uporabljenih materialov (upoštevajte, da zmanjšanje ciklične frekvence zmanjša število ciklov do odpovedi). Vrednost aktivacijske energije  $E_a$  v izrazu  $G(T_{max})$  je okrog 1,25 [14].

Arrheniusova aktivacijska energija ( $E_a$ ) je kritičen parameter v modelu. Ko se vrednost energije poveča, pospešitveni faktor med dvema temperaturama narašča eksponentno. Ta primer lahko vidimo v tabeli št. 1, ki prikazuje čas do odpovedi pri nižjih temperaturah glede na 150°C, kot jo predvideva Arrheniusova enačba :

**Tabela 1:** Čas do odpovedi mehanizma pri nižjih temperaturah [15].

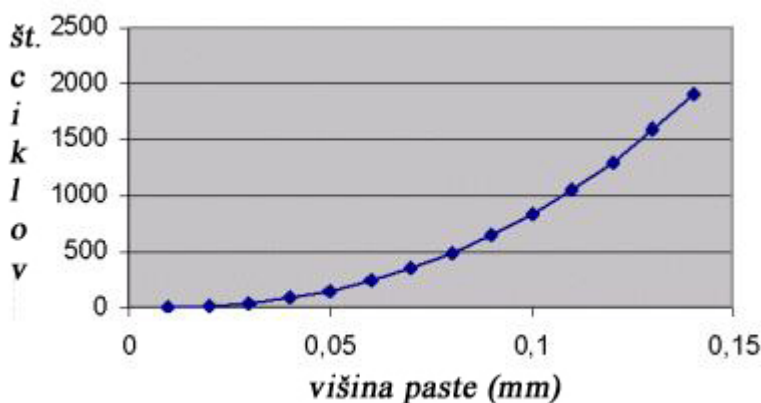
| Temp.<br>(°C) | E <sub>a</sub> (aktivacijska energija) |       |         |            |
|---------------|----------------------------------------|-------|---------|------------|
|               | 0,4                                    | 0,7   | 1,0     | 1,5        |
| 0             | 413                                    | 37815 | 3463487 | 6445703012 |
| 50            | 29,8                                   | 380   | 4844    | 337108     |
| 100           | 4,3                                    | 13,1  | 39,4    | 247        |
| 150           | 1                                      | 1     | 1       | 1          |

Splošne posledice navedenih dejstev so sledeče :

- če se vrh temperature povečuje, se število ciklov do odpovedi opazno zmanjšuje,
- če se ciklična frekvenca zmanjšuje, se zmanjšuje tudi število ciklov do odpovedi mehanizma (kar morda ni tisto, kar bi lahko pričakovali),
- če se temperaturno območje cikla poveča, se število ciklov do odpovedi hitro zmanjšuje;

Modeli, kot je Coffin – Manson so v veliko pomoč pri razvoju novih delov ter komponent v tiskanih vezjih. Izboljšanje zanesljivosti skozi en parameter pogosto vodi k manjšemu vplivu (npr. manjše neskladje v toplotnem razteznostnem koeficientu), vendar je lahko veliko dražje od izboljšanja zanesljivosti preko drugega parametra (npr. višine paste za spajkanje).

Coffin – Mansonov model omogoča preučitev vpliva različnih parametrov na povprečno število ciklov do odpovedi. Naslednji izračun prikazuje vpliv višine paste za spajkanje (višina paste za spajkanje med komponento pin in pad na tiskanem vezju) na povprečno število ciklov do odpovedi za določen sistem (glej sliko 11).



Slika 11: Prikaz vpliva višine paste za spajkanje na  $N_f$  [16].

Iz te študije vidimo, da podvojitev višine paste za spajkanje lahko poveča povprečno število ciklov do odpovedi za faktor 5 ali več [16].

### 4.3 EYRINGOV MODEL

Prispevek teorije Henry Eyringa za kemične reakcije je privedel do zelo splošnega in močnega fizikalnega modela za pospešeno testiranje življenjske dobe.

Naštejmo nekaj ključnih lastnosti tega modela [17]:

- ima teoretično osnovo iz kemije in kvantne mehanike,
- če kemični procesi (kemijske reakcije, korozija, migracije itd.) povzročajo degradacijo, ki pripelje do okvare, Eyringov model opisuje, kako se stopnja razgradnje spreminja s stresom ali kako se čas do odpovedi spreminja s stresom,
- model vključuje temperaturo in ga je mogoče razširiti na druga pomembna področja stresa,
- izraz za temperaturo je sam po sebi zelo podoben Arrheniusovem empiričnem modelu, ki pojasnjuje, zakaj je ta model tako uspešen pri vzpostavitvi povezave med  $\Delta H$  (aktivacijsko energijo) in pojmom kvantne teorije "aktivacijske energije, potrebne za čezmejne energetske ovire in sprožitev reakcije";

Model za merjenje temperature in dodaten stres ima splošno obliko po izrazu

$$T_f = AT^\alpha \exp \left\{ \frac{\Delta H}{kT} + \left( B + \frac{C}{T} \right) S_1 \right\}. \quad (4.6)$$

Za ta model je  $S_1$  lahko ena izmed funkcij napetosti ali trenutni oz. kateri koli drug pomemben stresni faktor, parametri  $\alpha$ ,  $\Delta H$ ,  $B$  in  $C$  pa določijo pospešek med kombinacijami stresa.

Prednosti Eyring modela so sledeče:

- premore veliko stresov,
- lahko se uporabi kot model za razgradnjo podatkov,
- parameter  $\Delta H$  ima fizični pomen in je bil raziskan in ocenjen za mnoge poznane odpovedi mehanizmov in materialov;

Slabosti Eyring modela

- vsak dodaten stres doda 2 neznana parametra,
- veliko parametrov ima lahko le učinek 2. reda : npr.: nastavitev  $\alpha = 0$  deluje precej dobro, saj temperaturni izraz postane enak kot v modelu Arrhenius,
- tudi konstanti  $C$  in  $E$  sta potrebni le, če obstaja pomembna interakcija temperaturnega učinka v zvezi z drugim stresom,

- oblika, v kateri se pojavijo drugi stresni faktorji, se ne zdi določena s splošnim modelom in se lahko razlikuje glede na posebne odpovedi mehanizma [17];

#### 4.4 DRUGI MODELI

##### (Inverzno) Pravilo moči za napetost

To je model, ki se uporablja za kondenzatorje [14] in ima samo napetostno odvisnost. Podan je z izrazom

$$t_f = AV^{-\beta}. \quad (4.7)$$

To je zelo poenostavljen Eyring model z  $\alpha$ ,  $\Delta H$  in  $C$  vrednostmi enakimi 0,  $S = \ln V$ , ter  $\beta = -B$ .

##### EkspONENTNI model napetosti

Temperaturno / napetostni modeli so v literaturi [14] pogosto navedeni v eni od spodnjih oblik

$$t_f = Ae^{\frac{\Delta H}{kT}} V^{-\beta}, \quad (4.8)$$

$$t_f = Ae^{\frac{\Delta H}{kT}} e^{-BV}. \quad (4.9)$$

Tudi to sta poenostavljena Eyringova modela z ustrezno izbiro konstant in funkcij napetosti.

##### Elektromigracijski model

To je polprevodniški odpovedni mehanizem [14], kadar pride do okvare v odprtih tankih kovinskih filmih prevodnika zaradi gibanja ionov proti anodi. Spremenjen Eyringov model ima obliko podano z izrazom

$$t_f = AJ^n e^{\frac{\Delta H}{kT}}. \quad (4.10)$$

Z parametrom  $J$  je označena gostota toka,  $\Delta H$  je običajno med 0,5 in 1,2 elektron voltov, medtem ko je  $n$  približno 2.

**Tri – stresni modeli**

Vlažnost igra pomembno vlogo v številnih mehanizmih [14], ki so odvisni od korozije ali ionskega gibanja. Skupni tri- stresni model ima obliko

$$t_f = Ae^{\frac{\Delta H}{kT}} V^{-\beta} RH^{-r}, \quad (4.11)$$

kjer je  $RH$  odstotek relativne vlažnosti. Drugi očitni razliki, uporabljeni na tem modelu bi bili uporaba eksponentnega izraza napetosti in/ali eksponentni čas  $RH$ . Tudi to je poenostavljen Eyring tri - stresni model, ki ima 4 neznane parametre in bi bilo potrebno narediti obsežni preizkus, da se prilega vzorcu in izračune dejavnike pospeška [18].

## 5. SPLOŠNI KONCEPTI ZA UPORABO TEMPERATURNIH KOMOR

V tem poglavju si bomo ogledali tri primere testov, glede na specifikacijo komore za testiranje nemškega proizvajalca testnih komor *Vötsch Industrietechnik* in sicer modela WVC C 600-70 VIT. Ker je nerealno pričakovati, da se prostor v trenutku segreje ali ohladi za 15, 30 ali celo 60 °C, sem glede na podatke naredil primere hladnega in vročega koraka, ter splošen primer Coffin – Mansonovega modela. Tako so opazni rezultati temperaturnega odstopanja in gradienta.

Tehnični podatki o komori so sledeči

- temperaturno območje: -70°C do +180°C
- temperaturno odstopanje v času:  $\pm 0.1$  K do  $\pm 0.5$  K
- temperaturno odstopanje v prostoru:  $\pm 0.5$  K do  $\pm 2.0$  K
- temperaturni gradient v skladu z IEC 60068-3-5: 1 K do 4 K
- temperaturna stopnja spremembe v skladu z IEC 60068-3-5:
  - ogrevanje : 4.0 K/min
  - ohlajanje : 2.5 K/min

Temperaturno odstopanje pomeni, da imamo neko nihanje temperature. Če hočemo imeti npr. stalno temperaturo 30°C (303K), le te ne moremo pričakovati zaradi odstopanja temperature. Če pogledamo odstopanja za naš primer, imamo vrednost temperatur od 302.5 K do 303.5 K. Temperaturni gradient pa predstavlja spremembo temperatur vzdolž določene razdalje v komori. Če obstaja temperaturni gradient, ga prenos toplote skuša izničiti. Toplota se prenaša v smeri od višje proti nižji temperaturi. Omeniti velja še mednarodni IEC 60068-3-5 standard, ki opisuje testna okolja, dodatne dokumentacije in navodila ter potrjuje norme temperaturnih komor.

### 5.1 OPISI KOMOR

Ker analiza in testiranje komponent poteka v testnih komorah za testiranje pospešenega staranja (angl. *environmental chamber* ali tudi *climatic test cabinet*), se dotaknimo še komor samih. Komore z svojimi zmogljivostmi v svoji notranjosti omogočajo simulirati različne življenjske pogoje in situacije. Predstavljajmo si npr. uporabo mobilnega telefona sredi puščave, na soncu in vročini, kjer je izpostavljen zelo visokim temperaturam, a vendar še deluje. Čisto nasprotje temu je uporaba mobilnega telefona na arktičnem ledu, pri nizkih temperaturah in velikem mrazu. To sta dva naravna ekstrema uporabe naprav in komponent, ki jih nam proizvajalci ponujajo. In prav to nam komore omogočajo. Notranjost se lahko ogreje na zelo visoke temperature, ali pa ohladi na zelo nizke. Če k temu dodamo še vpliv vlage, ki se jo da največkrat simulirati od 10 % do 95 % in pa zmožnosti vibriranja komore, imamo popolne klimatske pogoje za simulacijo naravnih situacij in razmer.

Komore lahko razdelimo na več skupin, odvisno od zahtev uporabnika. Na voljo so nam komore z različnimi lastnostmi in zmogljivosti. Tako lahko po [23] izbiramo med različnimi tipi komor, kot so

- temperaturne in klimatske testne komore (angl. *temperature and climatic test chambers*),
- lahke klimatske omare (angl. *light-climatic test cabinets*),
- testne komore za hitre spremembe temperature (angl. *test chambers for rapid temperature changes*),
- testna komora za temperaturne šoke (angl. *temperature shock test chamber*),
- vibracijske testne komore (angl. *vibration test chambers*),
- testne komore za korozijo, onesnaženo ozračje in emisijo (angl. *corrosion, polluted atmospheres and emission chambers*),
- testne komore za material in gradbeni material (angl. *material and building material test cabinets*),
- preskusni sistemi za litijeve baterije (angl. *test systems for lithium batteries*),
- temperaturne in klimatske testne komore za uporabo razmer nevarnosti požara in eksplozije (angl. *temperature and climatic test chambers for usage under conditions carrying a risk of fire and explosion*);



Slika 12: Temperaturna in klimatska komora Vötsch Industrietechnik serije VT3 in VC3 [24].

Tovrstne komore ločimo predvsem po temperaturnem območju, ki so ga sposobne ustvariti (npr. od  $-45^{\circ}\text{C}$  do  $180^{\circ}\text{C}$ ), po razponu vlažnosti in stopnji spremembe temperature (angl. *ramp rate* ali *temperature rate of change*). Ta podatek velja tako za ogrevanje, kot tudi za ohlajanje komore. Običajno je podan v enoti K/min. Velikost spremembe se giblje od nekaj K/min pa tudi do 80 K/min. Ta zadnji podatek velja predvsem za komore za hitre temperaturne spremembe.



Slika 13: Komora za hitre temperaturne spremembe Espec TCC [25].

Seveda so to samo osnovne razdelitve komor. Pod to predhodno omenjeno razdelitvijo se pod vsako skupino komor skriva še razdelitev glede na specifikacije in namene komor. Razdelitev se dalje členi predvsem po velikosti (od mini do XXL komor), pa seveda tudi namenu, kateremu pripisujemo zahteve porabnikov. Na voljo so nam specifične komore, s katerimi izvajamo lahko samo temperaturne teste, imamo pa tudi komore, ki simulirajo kombinacijo temperature in vlage. Če k tej kombinaciji dodamo še vibracijske teste, ki simulirajo premike in sunke komponent skozi njihovo življenjsko dobo, lahko izvajamo najtežji test – kombiniran okoljski stres.

Na trgu je kar nekaj proizvajalcev komor in izvajalcev testov. Med najbolj znanimi so

- *HALT & HASS Systems Corporation - Hobbs engineering,*
- *HALT & HASS Consulting New Zeland LTD,*
- *Reliant Labs,*
- *ESPEC NORTH AMERICA, INC.,*
- *Vötsch Industrietechnik GmbH ,*
- *Qualmark,*
- *CM Envirosystems,*

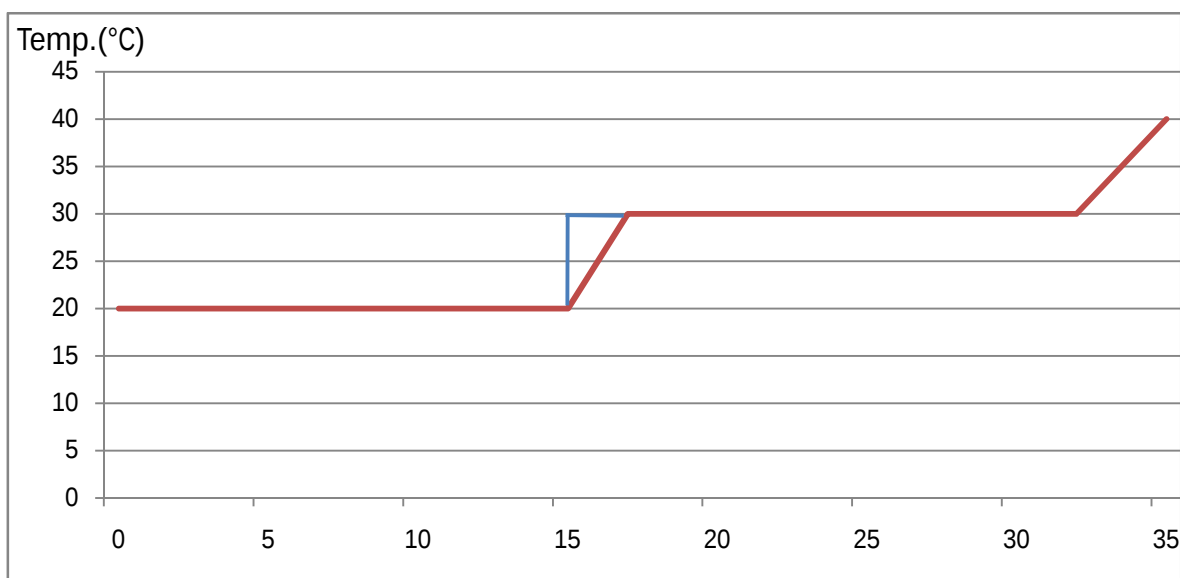
- *Envirotronics Corporate,*
- *Thermotron Industries,*
- *Intertechnology Inc.;*



Slika 14: Vibracijska testna komora Vötsch Industrietechnik serije VTV [26].

## 5.2 PRIMER TESTA "Vroči korak"

Kot že vemo, pri vročem koraku povečujemo temperaturo na intervalih po 15 min za 10°C. Da bi prostor v komori v trenutku segreli za 10°C ni mogoče, saj to velja samo za idealni primer. Tako lahko vidimo primer, ki prikazuje skok temperature glede na specifikacije na začetku poglavja omenjene komore (WVC C 600-70 VIT). Imamo podatek, da prostor v komori v minuti ogrejemo za 4 kelvine. S tem podatkom ugotovimo, da naš korak povečanja temperature ambienta dosežemo v približno 2.5 minute. Primer sem naredil tako, da sem pri dvigu temperature upošteval čas za spremembo temperature pri ogrevanju komore. Začetna temperatura je 20°C, kot predvideva pravilo za vroči korak.



Slika 15: Test vroči korak za naš primer – stopnica.

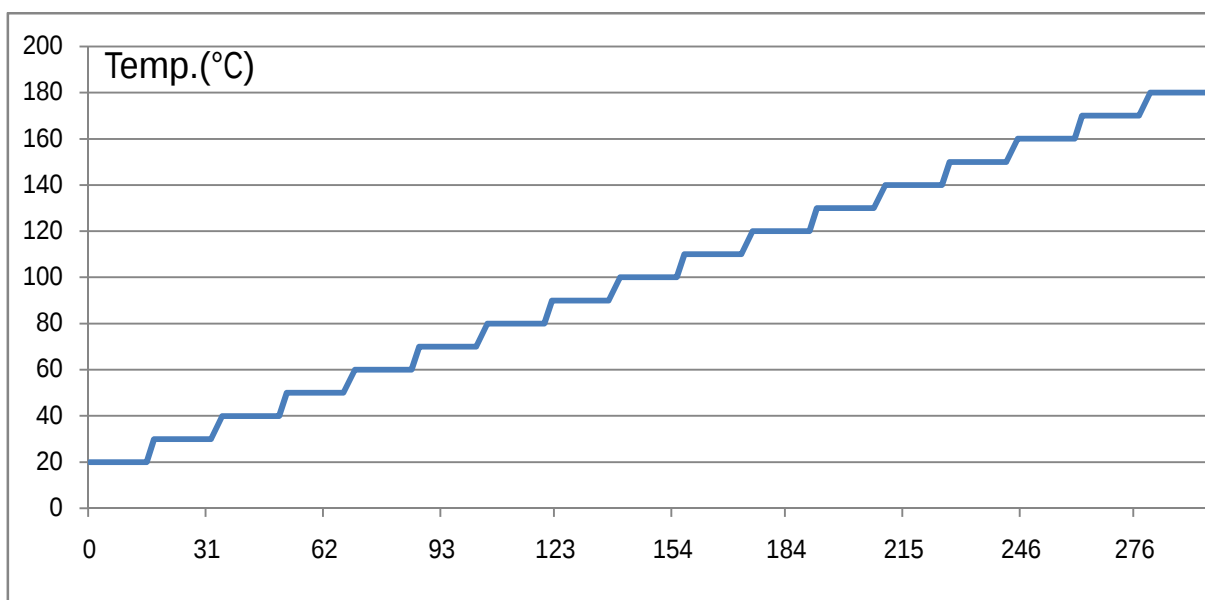
Ta slika prikazuje, kako poteka dvig temperature v našem primeru. Z modro barvo je prikazan idealni primer za dvig temperature, kjer je dvig temperature izveden v trenutku. Vendar pa kot je razvidno iz grafa (vertikalna os pomeni temperaturo, horizontalna os pa pretečen čas), je z rdečo barvo označen naš potek dviga temperature. Tako v našem primeru za dvig temperature 10°C potrebujemo najmanj 2.5 minute, če se držimo tehničnih podatkov, ki so značilni za komoro.

Tabela 2: Vrednosti temperature za sliko 15.

| Čas(min) | Temp.(°C) |
|----------|-----------|
| 0        | 20        |
| 15       | 20        |
| 17.5     | 30        |
| 32.5     | 30        |
| 35       | 40        |

Kot lahko vidimo tudi iz rezultatov v tabeli, je lepo razvidno trajanje posameznega koraka in vrednost temperature v določenem trenutku.

Po isti logiki je narejen prikaz za celotno temperaturno območje do 180°C. Tako je prikazan dvig temperature do konca območja. Seveda naj pri resničnem testiranju ne bi dosegli zgornje temperaturne limite komore, pač pa izvajamo korake do odpovedi testne enote. Pri tem lahko ugotovimo, da zaradi časa ogrevanje komore (4 K/min), porabimo za samo rast korakov 40 minut časa, kar predstavlja slabo sedmino skupnega časa (295 min).



Slika 16: Test vroči korak do zgornje temp. limite komore.

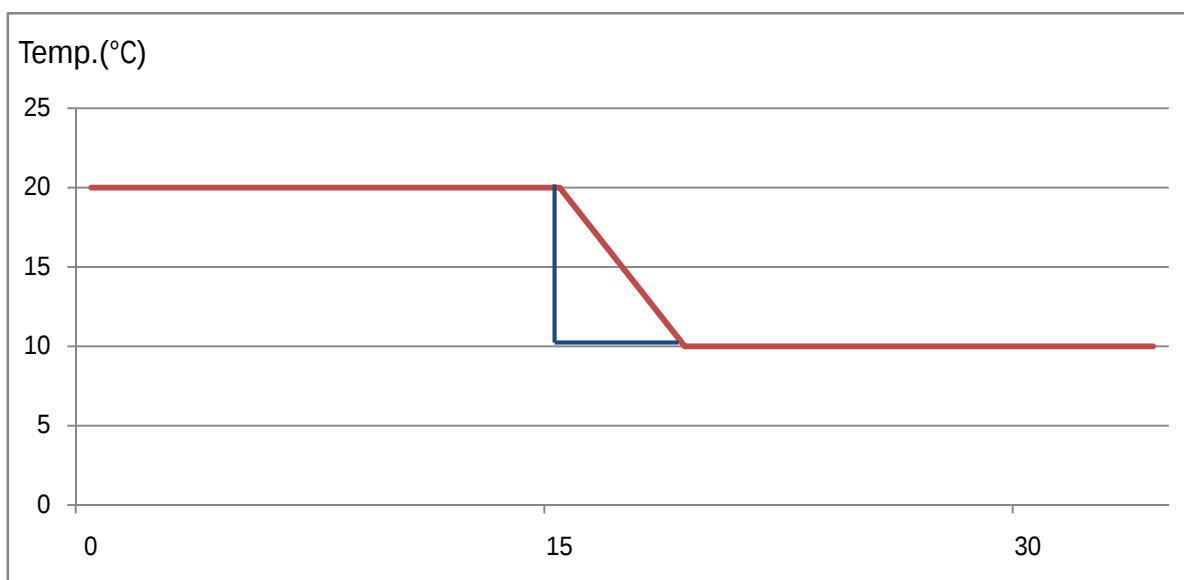
Iz slike je razvidno, da bi ob hitrejšem ogrevanju komore prihranili na času. Isti proizvajalec ima v ponudbi tudi komore, ki premorejo hitrejšo ogrevanje (tudi 12 ali celo 15 K/min). Vendar mislim, da je ta komora čisto primerna za izvajanje testa vroči korak. Za primerjavo lahko v spodnji tabeli vidimo nekatere minimalne in maksimalne temperaturne meje delovanja določenih komponent, ki se jih da dobiti na tržišču.

**Tabela 3:** Specifične delovne temperature nekaterih komponent [21].

| komponenta                       | Tmin(°C) | Tmax(°C) |
|----------------------------------|----------|----------|
| plastni upor MMA0102             | /        | 125      |
| procesor AMD Athlon X2           | /        | 65       |
| procesor Pentium D 840           | /        | 69,8     |
| procesor Pentium M               | /        | 100      |
| keramični kondenzator            | -55      | 125      |
| teflonski kondenzator            | /        | 170      |
| varovalka                        | -55      | 125      |
| tranzistor za visoke temperature | /        | 500      |

### 5.3 PRIMER TESTA "Hladni korak"

Kot že vemo, hladni korak izvajamo podobno kot vroči korak, le da tu temperaturo nižamo proti najnižji temperaturni limiti, ko naprave še deluje. Naprava mora ponovno biti izpostavljena določeni temperaturi 15 minut, nato lahko temperaturo zmanjšamo za 10°C. Upoštevamo dejstva, ki veljajo za komoro. Čas ohlajanja je 2.5 K/min, najnižja temperatura, ki jo lahko ustvarimo v komori, pa je po podatkih proizvajalca – 70°C. Iz tega vidimo, da se bo prostor v komori ohladil za 10°C v času štirih minut.



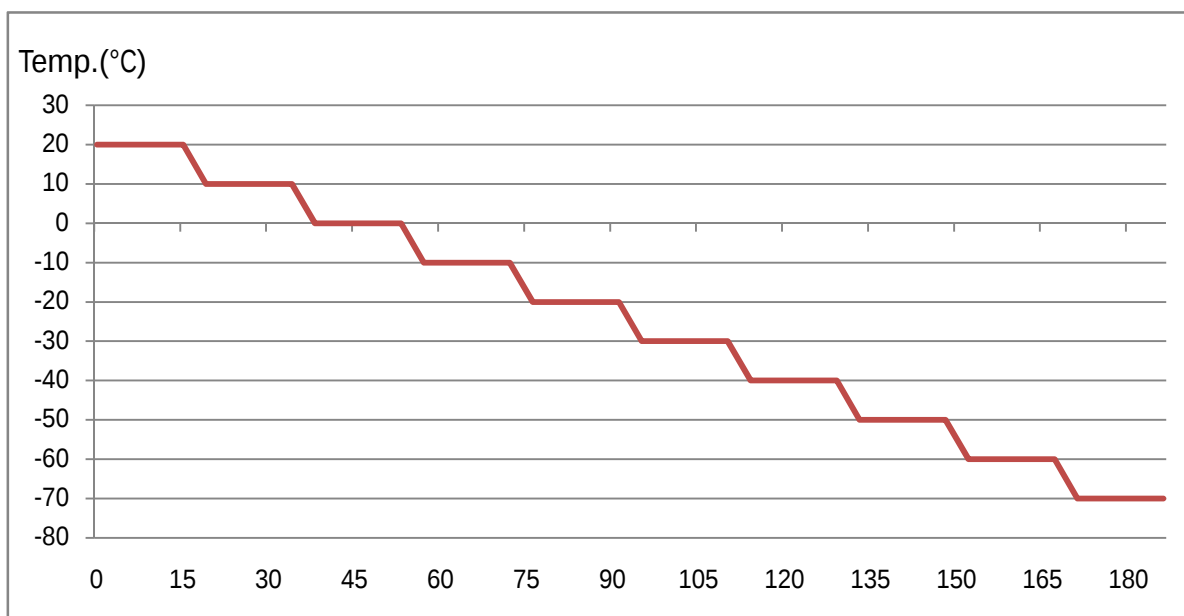
Slika 17: Test hladni korak do spodnje temp. limite komore - stopnica.

Ponovno imamo na sliki 17 ponazorjeno idealno stopnico (z modro barvo), ter naš potek stopnice, ki poteka po podatkih iz specifikacij komore. Lepo je viden linearen padec temperature, ki se zgodi v času štirih minut. Podatki v tabeli 4 kažejo trajanje posameznega koraka in trajanje ohlavitve komore.

**Tabela 4:** Vrednosti temperature za sliko 17.

| Čas(min) | Temp.(°C) |
|----------|-----------|
| 0        | 20        |
| 15       | 20        |
| 19       | 10        |
| 34       | 10        |

Iz slike 18 je razvidno, da potek testa hladni korak od sobne temperature do spodnje temperaturne limite komore – 70°C traja 186 minut. V tem času je všteti tudi čas za ohlajanje pri posameznem koraku, ki skupno znesi 36 minut ali drugače povedano, skoraj eno petino vsega časa, ki se porabi za testiranje. Ugotovimo lahko, da pri testu hladnega koraka porabimo veliko časa med posameznimi koraki ohlajanja komore. Tako kot v prejšnjem testu lahko tudi tukaj navedem, da obstajajo komore z večjo hitrostjo ohlajanja.



Slika 18: Test hladni korak do spodnje temp. limite komore.

#### 5.4 PRIMER TESTA "Coffin – Manson"

Glede na to, da ima komora ogrevanje 4 K/min, je logično, da realno ne moremo izvesti testa, kjer ekstremno spreminjamo temperaturo, saj je pogoj tega testa, da se temperatura spremeni vsaj za minimalno 45 K/min [5]. Tako se bomo raje posvetili fizikalnemu modelu Coffin – Manson. Vemo, da ta model temelji na temperaturnih ciklih, s katerimi ugotovijo predvsem mehanske okvare in utrujenost materiala. Obstaja veliko izrazov in izpeljav teh izrazov. Tako lahko glede na specifikacije komore naredimo računski primer, da si bomo lažje predstavljali potek modela.

Definicije in trditve v nadaljevanju so povzete po [19]. Po modelu Coffin – Manson izračunamo število ciklov do odpovedi mehanizma. Osnovna enačba se je razvila iz raziskovanj, ki sta jih opravila L.F. Coffin Jr. in S.S. Manson. To enačbo zapišemo kot

$$N_f \times (\Delta\epsilon_p)^2 = C_1, \quad (5.1)$$

kjer  $N_f$  predstavlja število ciklov do odpovedi,  $\Delta\epsilon_p$  pritisk plastike in  $C_1$  sorazmerna konstanta za določen material. Pritisk plastike je sorazmerna velikosti temperaturne spremembe toplotnega cikla  $\Delta T$ . Predhodna oblika enačbe Coffin – Mansona se tako lahko izrazi tudi z vidika velikosti temperaturne spremembe toplotnega cikla po izrazu

$$N_f \times (\Delta T)^2 = C_2, \quad (5.2)$$

kjer so pomeni oznak podobni kot v prejšnjem primeru. Razlika je le v  $\Delta T$ , ki predstavlja velikost temperaturne spremembe toplotnega cikla.

Kot pri Arrheniusovem modelu, se predhodna oblika izraza Coffin – Mansona redko uporablja. Ta je običajno napisana v smislu "faktor pospeška", ki primerja toplotne cikle v testnem okolju s toplotnimi cikli v končnem uporabniškem okolju. Toplotne cikle v testnem okolju je mogoče ekstrapolirati na oceno enakovrednih ciklov v končnem okolju.

Tako lahko Coffin – Manson model izrazimo v smislu "faktor pospeška" za toplotne cikle. Te dve definiciji zapišemo kot

$$A_{CM} = (\Delta T_A / \Delta T_u)^2 = N_{fu} / N_{fA}, \quad (5.3)$$

$$N_{fu} = N_{fA} \times (\Delta T_A / \Delta T_u)^2, \quad (5.4)$$

kjer je z  $A_{CM}$  označen faktor pospeška za število ciklov,  $N_{fu}$  predstavlja število ciklov do odpovedi pri uporabi temperaturne spremembe,  $N_{fA}$  število ciklov do odpovedi na pospešeni temperaturni spremembi,  $\Delta T_A$  spremembo temperature toplotnega cikla v pospešenem okolju ter  $\Delta T_u$  spremembo temperature toplotnega cikla v uporabniškem okolju.

Vsak HASS (angl. *highly accelerated stress screen*) test je sestavljen iz določenega števila toplotnih ciklov, ki trajajo določeno časovno obdobje. Za namen ocene zanesljivosti bi bilo bolje izraziti faktor pospeška v smislu časa trajanja namesto toplotnih ciklov. V tem smislu so podane naslednje definicije spremenljivk:

- $f_u$  = pogostost toplotnih ciklov v uporabniškem okolju (ciklov/dan),
- $f_A$  = pogostost toplotnih ciklov v pospešenem okolju (ciklov/dan),
- $D_u$  = čas trajanja v uporabniškem okolju (dnevi),
- $D_A$  = čas trajanja v pospešenem okolju (dnevi).

Število toplotnih ciklov se lahko nato izrazi v smislu zgornje opredelitve kot

$$N_{fu} = D_u \times f_u, \quad (5.5)$$

$$N_{fA} = D_A \times f_A. \quad (5.6)$$

Prejšnje enačbe za  $N_{fu}$  in  $N_{fA}$  je mogoče nadomestiti v Coffin – Manson modelu za doprinos k Coffin – Manson "času trajanja pospešitvenega faktorja"

$$A_{CMD} = (\Delta T_A / \Delta T_u)^2 \times (f_A / f_u) = D_u / D_A, \quad (5.7)$$

$$D_u = D_A \times (\Delta T_A / \Delta T_u)^2 \times (f_A / f_u), \quad (5.8)$$

kjer je  $A_{CMD}$  pospešek faktor za čas trajanja,  $\Delta T_A$  sprememba temperature toplotnega cikla v pospešenem okolju,  $\Delta T_u$  pa sprememba temperature toplotnega cikla v uporabniškem okolju. Definicije  $f_u$ ,  $f_A$ ,  $D_u$  ter  $D_A$  smo podali že predhodno.

Navedimo še zgled uporabe modela po [19].

Izračunali bomo Coffin – Manson "čas trajanja pospešitvenega faktorja" in ustrezni čas v končnem uporabniškem okolju za HASS izveden za 3 ure, cikel bo potekal med maksimalno HASS temperaturo 50°C in minimalno HASS temperaturo -10°C za 3 polne toplotne cikle. Predvidevamo, da je bilo ugotovljeno, da je najvišja temperatura testne enote v uporabnem okolju 45°C, ter maksimalna temperatura v pospešenem okolju 80°C. Nominalna vrednost temperature uporabnega okolja je 25°C, toplotni vzpon testne enote je 15°C nad okoljem klienta in nihanje temperature v okolju je 5°C. Sprememba temperature končnega uporabnika je 20°C. Klasifikacija testne enote je "računalnik".

$$\Delta T_A = (80^{\circ}\text{C} + 273.15) - (-10^{\circ}\text{C} + 273.15) = 90^{\circ}\text{K}$$

$$\Delta T_U = 20^{\circ}\text{K}$$

$$D_A = 3 \text{ ure} \times 1 \text{ dan} / 24 \text{ ur} = 0,125 \text{ dan}$$

$$f_A = 3 \text{ cikli} / 3 \text{ ure} \times 24 \text{ ur} / \text{dan} = 24 \text{ ciklov} / \text{dan}$$

Obstajajo številne publikacije za oceno števila toplotnih ciklov za različne končne uporabnike [20]. Prvotni vir, inštitut za tiskana vezja IPC SM 785 (angl. *Institute of Printed Circuits*) ocenjuje število toplotnih ciklov za klasifikacijo "računalnik" v ambientu na 1460 ciklov na leto, kar je enako 4 ciklom na dan.

Torej,

$$f_U = 4 \text{ cikli} / \text{dan}$$

$$A_{CMD} = (\Delta T_A / \Delta T_U)^2 \times (f_A / f_U) \quad (5.9)$$

$$A_{CMD} = (90 / 20)^2 \times (24 / 4) = 121.5$$

To pomeni, da je triurno testiranje v stresnem HASS okolju enako približno 365 uram ali 15 dnevom življenja v končnem uporabniškem okolju, se pravi ko je izdelek v uporabi pri stranki. Resnično korist HASSa vidimo, če ga primerjamo s testom "burn-in". "Burn-in" (sežiganje) je test, s katerim testni primerek preizkusijo pod nizko napajalno napetostjo in visoko temperaturo [22]. Na primer tri uri "burn-in" test na 50°C je enak le 1,1 dnevu pretečenem času v uporabniškem okolju. Glede na toplotne obremenitve je HASS približno 14 krat bolj agresiven kot test "burn-in".

## 6. ZAKLJUČEK

Izdelava diplomskega dela je bila predvsem raziskovalnega značaja, saj sem moral poiskati in zajeti podatke, ki jih ni veliko na enem samem mestu. Med samim delom sem naletel na številne izzive, med katerimi so bili predvsem kako razvrstiti vrste testov, vrste fizikalnih modelov ter enačb. Naletel sem na veliko različnih zapisov enačb in njihovih izpeljav, zato je bilo najtežje vse skupaj uskladiti. Veliko virov in materiala sem našel na medmrežju, zato sem moral paziti na točnost in verodostojnost podatkov. Z diplomskim delom sem razširil svoje znanje glede elektronskih komponent, prav tako testov in metod, saj česa podobnega nisem spoznal tekom študija, razen pojmov zanesljivosti in odpovedovanja. V zadnjem poglavju sem se usmeril na komoro nemškega proizvajalca *Vötsch Industrietechnik*, ker eno izmed njihovih komor uporabljajo pri znanem slovenskem podjetju *IskraTel d.o.o.* iz Kranja. Prišel sem do ugotovitve, da s pomočjo te komore ni možno izvajati testa hitrih temperaturnih sprememb, saj komora ne omogoča tako velike stopnje temperaturne spremembe, kot je minimalni pogoj za izvedbo testa.

V času izdelave diplome sem prišel do marsikaterega novega spoznanja. Kot prvo, sploh nisem vedel, da obstaja toliko različnih metod in testov za testiranje komponent. Prav tako si niti približno nisem mogel predstavljati, da obstaja toliko proizvajalcev testnih komor, katere bi lahko razdelil na nešteto skupin. Testnih komor je veliko, pokrivajo skoraj vsa področja, od elektro inženirstva, gradbenih materialov, farmacevtskih proizvodov, avtomobilske industrije, kemijskega inženirstva, solarne tehnike, metalne industrije, tehnologije plastike, industrijo stekla, tekstila, optike, kozmetike, živilske industrije in vse tja do biološke opreme.

Prav tako sem prišel do spoznanja, da se nekateri inštituti in laboratoriji ukvarjajo izključno s testiranjem. Če želimo recimo nek določen izdelek dati v testiranje pospešene življenjske dobe, da bi ugotovili njegove napake, lahko preprosto izberemo laboratorij in oni opravijo test. Seveda ima vse to svojo ceno. Zasledil sem na domači internetni strani podjetja Hobbs Engeniring, da ponujajo testiranje v 180 litrski komori po ceni 2000\$ na dan. V to ceno je všteto tudi delo in nasveti inženirja. Cene testiranj ali cene testnih komor se mogoče na prvi trenutek slišijo visoke, vendar če upoštevamo končne rezultate testov, to je boljša prodaja ter posledično večji dobiček je ta podatek skorajda zanemarljiv, predvsem za velike koncernne. Ko se gre za prihranke največjih, govorimo o prihranku več milijonov dolarjev.

Na koncu lahko ugotovim, da sem z diplomskim delom zajel področje, ki ima velik pomen pri uspešnosti proizvodnje izdelkov. Skušal sem zajeti predvsem tiste analize, ki so bistvenega pomena za elektronske komponente. Ker takih analiz in metod nisem zasledil na slovenskem področju, upam tudi, da bojo moji podatki in ugotovitve v prihodnosti še komu v korist. Mnenja sem tudi, da bi morale metode testiranj imeti večji poudarek skozi šolanje inženirjev na ustrezni smeri, ker bi le tako lahko teste in metode v prihodnosti le še izboljševali in strmeli k cilju doseganja števila čim manj odpovedi in večji življenjski dobi izdelkov.

## 7. LITERATURA

- [1] Wikipedia  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Accelerated\\_aging](http://en.wikipedia.org/wiki/Accelerated_aging)
- [2] prof.dr. Miha Mraz: Teorija zanesljivosti računalniških sistemov (UNI)  
[http://lrss.fri.uni-lj.si/sl/teaching/rzd/lectures/3\\_poglavje.pdf](http://lrss.fri.uni-lj.si/sl/teaching/rzd/lectures/3_poglavje.pdf)
- [3] prof. dr. Slavko Amon : Elektronske komponente , ZAFER, 1994  
<http://lmse.fe.uni-lj.si/amon/literatura/EK/EK1-SplosneZnacilnosti.pdf>
- [4] TutorialsWeb: Accelerated Tests  
<http://www.tutorialsworld.com/reliability/reliability4.htm>
- [5] WiseGeek:  
<http://www.wisegeek.com/what-is-an-accelerated-life-test.htm>
- [6] Halt&Hass Consulting New Zealand LTD  
<http://www.halthass.co.nz/reliability/halt-and-hass/halt-cold-step.htm>
- [7] Halt&Hass Consulting New Zealand LTD  
<http://www.halthass.co.nz/reliability/halt-and-hass/halt-hot-step.htm>
- [8] Halt&Hass Consulting New Zealand LTD  
<http://www.halthass.co.nz/reliability/halt-and-hass/halt-thermal-transitions.htm>
- [9] Reliant Labs  
<http://www.reliantlabs.com/pdf/ReliantHALTHASSSummary.htm>
- [10] Halt&Hass Consulting New Zealand LTD  
<http://www.halthass.co.nz/reliability/halt-and-hass/halt-vibration-step.htm>
- [11] Halt&Hass Consulting New Zealand LTD  
<http://www.halthass.co.nz/reliability/halt-and-hass/halt-combined-environment.htm>
- [12] Professional testing  
<http://www.ptitest.com/pmwiki/pmwiki.php/PTI/HALT>
- [13] Engineer statistics handbook  
<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr151.htm>
- [14] Engineer statistics handbook  
<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr153.htm>
- [15] Online Postgraduate Courses for the Electronics Industry  
[http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0163\\_etf/index.html](http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0163_etf/index.html)
- [16] Educara  
[http://www.educara.de/mio/reliability/d\\_0045\\_coffinmanson.html](http://www.educara.de/mio/reliability/d_0045_coffinmanson.html)

- [17] Engineer statistics handbook:  
<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr152.htm>
- [18] Engineer statistics handbook  
<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr153.htm>
- [19] TDI Power  
[http://www.tdipower.com/PDF/white\\_paper/hass.pdf](http://www.tdipower.com/PDF/white_paper/hass.pdf)
- [20] Electronic Industries Alliance; "SSB-1.003: Acceleration Factors, Annex to SSB-1: Guidelines for Using Plastic Encapsulated Microcircuits and Semiconductors in Military, Aerospace and Other Rugged Applications"  
IPC (Institute of Printed Circuits), "Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments", IPC-SM-785, Table 4, November 1992;
- [21] Podatki o temperaturnih mejah  
[http://www.interfacebus.com/Capacitance\\_Temperature\\_Change.html](http://www.interfacebus.com/Capacitance_Temperature_Change.html)  
[http://www.littelfuse.com/data/en/Data\\_Sheets/Littelfuse\\_Fuse\\_875\\_Series.pdf](http://www.littelfuse.com/data/en/Data_Sheets/Littelfuse_Fuse_875_Series.pdf)  
<http://www.mdatechnology.net/techprofile.aspx?id=321>  
<http://www.heatsink-guide.com/content.php?content=maxtemp.shtml>
- [22] Zanesljivost Chip & Burn In  
<http://sl.edaboard.com/topic-2840922.0.html>
- [23] Vötsch Industrietechnik  
<http://vitu.cms.schunk-group.com/en/schunk01.c.15890.de>
- [24] Vötsch Industrietechnik  
[http://vitu.cms.schunk-group.com/en/schunk01.c.26794.de/all\\_vitproductsarticle](http://vitu.cms.schunk-group.com/en/schunk01.c.26794.de/all_vitproductsarticle)
- [25] Espec  
[http://www.espec.com/na/products/family/tcc\\_rapid-rate/](http://www.espec.com/na/products/family/tcc_rapid-rate/)
- [26] Vötsch Industrietechnik  
[http://vitu.cms.schunk-group.com/en/schunk01.c.15939.de/all\\_vitproductsarticle](http://vitu.cms.schunk-group.com/en/schunk01.c.15939.de/all_vitproductsarticle)