

## Poglavje 1

# Zanesljivost elektronskih komponent

Z vidika inženirstva digitalnih vezij je zelo pomembno, da znamo za poljuben digitalni produkt napovedati ali izračunati intenzivnost odpovedovanja, s čimer lahko posredno tudi določimo zanesljivost ali verjetnost delovanja produkta v poljubnih časovnih točkah v prihodnosti. V prejšnjem poglavju smo se seznanili s pojmom *intenzivnosti odpovedovanja*  $i$ -te komponente  $\lambda_i$ . Za vrednost slednje v eksploatacijski dobi elektronskih komponent lahko predpostavimo časovno neodvisno konstanto.

Ob hipotetični predpostavki, da smo tiskanino opremili z  $n$  elektronskimi komponentami ( $i=1, \dots, n$ ), pridobimo sistemsko intenzivnost odpovedovanja  $\lambda_{sys}$  na osnovi izraza

$$\lambda_{sys} = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (1.1)$$

sistemsko zanesljivost  $R_{sys}(t)$  v poljubni časovni točki  $t$ , pa s pomočjo izraza

$$R_{sys}(t) = e^{-\lambda_{sys} * t}. \quad (1.2)$$

Pri gradnji digitalnih vezij ne uporabljamo samo elektronskih komponent, temveč tudi mehansko obrabljive sestavne dele. Tipična primera slednjih sta sama hipotetično večplastna tiskovina in pa bolj ali manj obrabljive mehanske komponente, kot so ventilatorji, vzmeti, konektorji itd. Tudi slednji doprinašajo k sistemski intenzivnosti odpovedovanja. Po naših izkušnjah je ta doprinos relativno majhen in posledično bistveno ne spreminja sistemske zanesljivosti  $R_{sys}(t)$ . Seveda je na tem mestu potrebno omeniti, da bi se sistemska zanesljivost ob upoštevanju mehanske obrabljivosti komponent izračunala po razširjenem izrazu

$$R_{sys}(t) = R_{electronic}(t) * R_{mechanical}(t), \quad (1.3)$$

pri čemer bi bila  $R_{electronic}(t)$  izračunana na osnovi konstantne,  $R_{mechanical}(t)$  pa na osnovi linearno rastoče intenzivnosti odpovedovanja.

Z vidika snovalca sistema predstavlja osnovni problem pridobivanje podatkov o intenzivnostih odpovedovanja posameznih komponent  $\lambda_i$  ( $i=1, \dots, n$ ). Omenjene podatke lahko pridobimo na sledeče načine:

- podatke pridobimo neposredno od prodajalca ali proizvajalca komponent: slednje je v večini primerov nemogoče, ker je sled med proizvajalcem in prodajalcem običajno zabrisana, pa tudi proizvajalci sami z redkimi izjemami tovrstnih podatkov običajno ne objavljajo javno;
- podatke pridobimo na osnovi statističnega spremljanja uporabljenih komponent, katerih eksploatacijska doba že teče v ciljnih aplikacijah: slednji pristop je praktično neuporaben zaradi nedostopnosti podatkov, istočasno pa je razvoj elektronskih komponent tako hiter, da so primeri daljše časovne dobe uporabe istih komponent izredno redki;
- podatke pridobimo sami iz kupljenih komponent iste serije, pri čemer podvržemo del komponent *pospešenemu staranju*, s čimer določimo intenzivnosti odpovedovanj: omenjeni postopek je v fazi razvoja procedur staranja, ki še niso standardizirane, tako da so tako pridobljeni podatki le grobe ocene velikostnih razredov intenzivnosti odpovedovanj;
- podatke pridobimo s pomočjo *standardov*, ki se ukvarjajo s pripisovanjem intenzivnosti odpovedovanj posameznim komponentam ob vnaprej predvidenih delovnih pogojih delovanja kot sta npr. temperatura in vlažnost delovnega okolja itd.

Najbolj razširjena sta zadnja dva pristopa, zato si ju bomo v nadaljevanju natančneje ogledali.

V splošnem lahko grobo ocenimo intenzivnosti odpovedovanj posameznih elektronskih komponent z eno pričakovano odpovedjo na  $10^9$  delovnih ur. Omenjeno spremenljivko imenujemo tudi za FIT (angl. *number of Failures In Time per  $10^9$  hours of operations*). Začetkom 90-ih let prejšnjega stoletja je bila ocena za intenzivnost odpovedovanja velikostnega razreda ene odpovedi na  $10^6$  delovnih ur, kar odraža hiter napredek proizvodnje elektronskih komponent z vidika njihove zanesljivosti.

## 1.1 Postopki pospešenega staranja in določanja življenske dobe elektronskih komponent

*Pospešeno testiranje življenske dobe* (angl. *accelerated life testing*) se izvaja na elektronskih komponentah in produktih s ciljem ocene njihove *pričakovane življenske dobe* in *intenzivnosti odpovedovanja*. Na področju testiranja posameznih elektronskih komponent in na njih temelječih produktov, se najbolj pogosto uporabljajo naslednje vrste testov:

- testiranje ob neobičajnih ali stresnih (angl. *stress*) delovnih temperaturah,

Mehanizem odpovedi	Aktivacijska energija $E_a$ , [eV]
"oxide defects"	0.3 do 0.5
"bulk silicon defects"	0.3. do 0.5
"corrosion"	0.45
"electromigration"	0.6
"contamination"	1.0
"charge injection"	1.3
"assembly deffects"	0.5 do 0.7
"mask or photoresist defect"	0.7

Tabela 1.1: Potrebne velikosti aktivacijske energije za različne mehanizme odpovedi.

- testiranje v prisotnosti vibracij (20Hz-2KHz), udarcev, pospeškov in rotacij,
- testiranje v prisotnosti vlažnosti,
- testiranje v prisotnosti ionizirajočega sevanja in
- testiranje ob kombinaciji prisotnosti predhodno naštetih faktorjev.

Primarni namen omenjenih testiranj je po eni plati določitev intenzivnosti odpovedovanja  $\lambda$  (angl. *failure rate* ali *hazard function*), po drugi plati pa identifikacija šibkih točk dizajna ali uporabljenih komponent, s čimer lahko produkt v zanesljivostnem smislu izboljšamo.

V fazi testiranja mora sistem (komponenta) delovati - opravljati svojo funkcijo, njegovo delovanje pa mora biti nadzorovano v realnem času, da bi lahko identificirali časovne točke odpovedi. Z ekstremnimi obremenitvami prihaja do pospešitve degradacijskih procesov v materialih, kar privede posredno do pospešenega staranja (odpovedovanja komponent).

## 1.2 Modeli pospešenega staranja ob spremenjenih ambientalnih temperaturah

V domeni zanesljivostne analize s pojmom *aktivacijske energije*  $E_a$  označujemo najmanjšo količino energije, ki je potrebna za proženje nekega temperaturno pospešenega *mehanizma odpovedi* (angl. *failure mechanism*). Po definiciji je mehanizem odpovedi nek fizikalen pojav, ki od trenutka sprožitve po določenem času privede do določenega tipa odpovedi komponente (angl. *failure mode*). Mehanizma odpovedi ne smemo mešati s tipom odpovedi komponente. Nek mehanizem odpovedi lahko povzroči različne tipe odpovedi komponente, istočasno pa lahko nek tip odpovedi komponente povzročijo različni mehanizmi odpovedi. Tipični mehanizmi odpovedi polprevodniških komponent in pripadajoče aktivacijske energije so podani v tabeli 1.1 povzeti po viru [1].

Tehnologija	Aktivacijska energija $E_a$ , (eV)
Polprevodniki v splošnem	0,3-0,4
Pasivne komponente v splošnem	0,15-0,4
Tranzistorji (bipolarni, GaAs)	0,4
Tranzistorji (MOS, IGBT)	0,3
Optocoupler	0,4
LED in fotodiode	0,35
Diode	0,4
IC MOS, BiCMOS (LV), AsGa Numerical	0,3
IC Bipolar, BiCMOS (HV), GaAs MMIC	0,4

Tabela 1.2: Potrebne velikosti aktivacijske energije po standardu IEC 62380.

Ker je za potrebe izračunov v naslednjih razdelkih termin aktivacijske energije  $E_a$  zelo pomemben, obstajajo tri možnosti za pridobivanje vrednosti  $E_a$  posameznih elektronskih komponent iz kosovnic logičnih vezij. Te možnosti so sledeče:

- primarni, najzanesljivejši in časovno najhitrejše dostopen vir podatka o  $E_a$  naj bi izviral od proizvajalca posamezne elektronske komponente; veliki proizvajalci te podatke pridobivajo na osnovi pospešenega staranja serij komponent, je pa vprašanje, če so te podatke pripravljene deliti s kupci;
- sekundarni, cenen, a nezanesljiv in nepopoln vir podanih vrednosti aktivacijskih energij za posamezne komponente najdemo v IEC 62380 standardu (IEC - International Electrotechnical Commission s sedežem v Švici); v tabeli 1.2 so predstavljene konstante za  $E_a$ , ki jih navaja IEC standard (LV - napetost je nižja od 6V, HV - napetost je enaka ali višja od 6V, MMIC - monolithic microwave IC);
- terciarni, najpočasneje dostopen in najdražji vir podatkov o vrednostih  $E_a$  za posamezne komponente izhaja iz računskega postopka, v ozadju katerega se nahaja pospešeno temperaturno staranje večje množice komponent.

### 1.2.1 Arrheniusov model

Osnova za Arrheniusov model je Arrheniusova enačba, ki predvideva, da se s povečevanjem ambientalne temperature za 10°C hitrost kemijskega procesa staranja komponente približno podvoji. Arrheniusov model izraža življensko dobo v odvisnosti od ambientalne temperature in po virih [2], [3] temelji na Arrheniusovem izrazu

$$L(T) = Ae^{(-\frac{E_a}{kT})}, \quad (1.4)$$

pri čemer  $L(t)$  predstavlja hitrost kemijskega procesa staranja,  $A$  netermično konstantno,  $E_a$  aktivacijsko energijo v eV,  $k$  Boltzmanovo konstanto ( $8,617385 \cdot 10^{-5} eVK^{-1}$ ) in  $T$  temperaturo v Kelvinih.

Predpostavimo, da je predvidena ambientalna temperatura aplikacije  $T_1$ , v fazi pospešenega testiranja pa komponento izpostavimo temperaturi  $T_2$  ( $T_1 < T_2$ ). Glede na povedano ločujemo med dvema različnima časoma do odpovedi in sicer med normalnim ( $MTTF_{normal}(T_1)$ ) in pospešenim ( $MTTF_{accelerated}(T_2)$ ). Med njima po viru [4] obstaja relacija

$$MTTF_{normal}(T_1) = F * MTTF_{accelerated}(T_2), \quad (1.5)$$

pri čemer  $F$  predstavlja *faktor pospešitve staranja*, izračuna pa se po izrazu

$$F = e^{\left(\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right)}. \quad (1.6)$$

Predpostavimo, da imamo ciljno aplikacijo, ki bo delovala v okolju z ambientalno temperaturo  $20^\circ\text{C}$ , postopek pospešenega staranja pa izvajamo na temperaturi  $70^\circ\text{C}$ . Faktor pospešenega staranja bi se tako po "grobi" oceni na osnovi Arrheniusove enačbe izračunal kot

$$F = 2 * 2 * 2 * 2 * 2 = 32, \quad (1.7)$$

s čimer dobimo 32 kratno pospešeno staranje. Če na ta način ob staranju pridobimo  $MTTF_{accelerated}(70^\circ\text{C})$ , iz njega lahko izračunamo po izrazu

$$MTTF_{normal}(20^\circ\text{C}) = 32 * MTTF_{accelerated}(70^\circ\text{C}) \quad (1.8)$$

pričakovano življensko dobo ob normalnih pogojih delovanja.

Natančnejši izračun faktorjev pospešitve staranja pri uporabljenih konstantah

$$T_1 = 20^\circ\text{C} = 293.15\text{K}, T_2 = 70^\circ\text{C} = 343.15\text{K}, k = 8,617 * 10^{-5}\text{eV/K} \quad (1.9)$$

in izbranih spremenljivih aktivacijskih energijah  $E_a$  bi dal za rezultate naslednje vrednosti

$$F(E_a = 0, 4\text{eV}) = e^{\left(\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right)} = 10,04, \quad (1.10)$$

$$F(E_a = 0, 5\text{eV}) = 17,88, \quad (1.11)$$

$$F(E_a = 0, 6\text{eV}) = 31,84, \quad (1.12)$$

$$F(E_a = 0, 7\text{eV}) = 56,68. \quad (1.13)$$

Izračunani pospešitveni faktorji so majhni, saj bi ob hipotetično predvideni  $\lambda$  enega FITa ( $MTTF_{normal} = 1/\lambda = 10^9$ ) in  $E_a = 0,7\text{eV}$  moralo pospešeno testiranje prinesiti odpoved po  $10^9/56.68 = 17.640.518$  delovnih urah. Slednje je za izvajanje pospešenega staranja odločno predolg čas.

Izboljšava se ponuja v hipotetičnem zvečanju aktivacijske energije (npr.  $E_a = 2,7\text{eV}$  prinese pospešitev  $F=5.800.376$ , s čimer bi se čas do odpovedi pri pospešenem testiranju znižal na 172 delovnih ur), seveda pa tega ne moremo storiti, ker je potrebna karakteristična aktivacijska energija vezana na materialno realizacijo komponente.

Edino, kar pri dani opazovani komponenti lahko spremenimo, je zgornja meja temperature  $T_2$ . Šele zvečanje  $T_2$  iz  $70^\circ\text{C}$  na  $340^\circ\text{C}$  ob hipotetično ustrezni  $E_a = 0,7\text{eV}$  iz prejšnjega zglada, bi tako prineslo zvišanje pospešitvenega faktorja na  $F = 1.908.035$  in s tem nek "normalni" pričakovani čas pospešenega testiranja do odpovedi v višini 524 delovnih ur. Pri tem ne smemo prezreti, da zvečanje temperature  $T_2$  pospešenega testiranja lahko povzroči tudi odpovedi, do katerih pri običajnem staranju v eksploatacijski dobi ne bi prišlo.

### 1.2.2 Coffin-Mansonov model cikličnega temperaturnega pospešenega staranja

Coffin-Mansonov model cikličnega temperaturnega pospešenega staranja uporabljamo za računanje števila ciklov do odpovedi. Omenjeni model po [2] modelira pospešeno staranje materiala in s tem posredno tudi hitrost odpovedovanja komponent, do katerih pride zaradi hitrih cikličnih temperaturnih sprememb, med katere štejejo tudi priklopi/izklopi naprav, ali termičnega šoka. Narava odpovedi pri tovrstnem "staranju" po [3] izhaja iz širjenja razpok v spajkah in ostalih kovinskih materialih. Število temperaturnih ciklov do odpovedi na osnovi osnovnega Coffin-Mansonovega modela izračunavamo po [5] s pomočjo izraza

$$N_f = \frac{A_1}{\Delta T^\gamma}, \quad (1.14)$$

kjer sta  $A_1$  in  $\gamma$  konstanti, ki določata značilnosti materiala (kovine),  $\Delta T$  pa interval temperaturne spremembe, ki mu je sistem v testnem ciklu izpostavljen. Koeficientu  $\gamma$  po [5] običajno priredimo vrednost 2. Navedeni model, ponazorjen z izrazom (1.14), je bil v preteklosti podvržen številnim kritikam, saj je bil razvit za temperature pod  $0.5 * T_m$ , pri čemer  $T_m$  predstavlja talilno temperaturo materiala, spoji pa običajno delujejo na višjih temperaturah. Druga evidentna slabost tega relativno enostavnega modela je v neupoštevanju frekvence temperaturnih ciklov, s čimer ignoriramo defekte, ki nastanejo zaradi eventualnih izredno hitrih sprememb temperature. Glede na povedano je bilo razvitih kar nekaj modifikacij omenjenega modela.

Ena od najbolj razširjenih modifikacij določa število izvedenih temperaturnih ciklov do odpovedi sistema (komponente)  $N_f$ , ki temelji na izrazu

$$N_f = A_1 \frac{G(T_{\max})}{f^\alpha \Delta T^\beta}, \quad (1.15)$$

kjer je  $f$  frekvenca temperaturnega cikla,  $\Delta T$  sprememba temperature v ciklu,  $\alpha$  eksponent ciklične frekvence (po [6] je  $\alpha = -0.33$ , po [7] pa od  $-\frac{1}{3}$  do 2),  $\beta$  eksponent temperaturnega razpona (po [6] je  $\beta$  od 1.9 do 2.00, po [7] pa od  $-\frac{1}{3}$  do 2),  $T_{\max}$  pa največja dosežena temperatura.  $G(T_{\max})$  predstavlja Arrheniusov člen, ki se izračuna po izrazu

$$G(T_{\max}) = A_2 * e^{\left(\frac{E_a}{K * T_{\max}}\right)}, \quad (1.16)$$

kjer je  $E_a$  aktivacijska energija. Konstanta  $A_2$  ima zgolj skalirno funkcijo. Splošne značilnosti tega modela so sledeče:

$T_{max}(^{\circ}C) \setminus E_a(eV)$	0	0.4	1	1.5
0	413,0	37.815,0	3.463.487,0	6.445.703.012,0
50	29,8	380,0	4844,0	337.108,0
100	4,3	13,1	39,4	247,0
150	1,0	1,0	1,0	1,0

Tabela 1.3: Izračunano število ciklov do odpovedi.

- s povečanjem maksimalne temperature se število ciklov delovanja sistema *občutno* zmanjša,
- s povečanjem frekvence temperaturnih oscilacij se število ciklov delovanja sistema *občutno* zmanjša in
- s povečanjem temperaturnega razpona izvedbe staranja se število ciklov delovanja sistema *drastično* zmanjša.

Primer izračuna lahko povzamemo po [6]. V primeru izbranih  $T_{min}$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $\alpha$  in  $\beta$ , bi prišli do tabele 1.3, v kateri so števila  $N_f$  izračunana v odvisnosti od spreminjajočih se  $E_a$  in  $T_{max}$ .

### 1.2.3 Slabe in dobre plati fizikalno - matematičnih modelov staranja

Po viru [2] so dobre plati uporabe fizikalno matematičnih modelov staranja sledeče:

- modeli dajejo dobre napovedi življenskih dob,
- modeliramo lahko različne scenarije življenskih dob glede na različna aplikacijska okolja in
- modele lahko uporabljamo že v fazi načrtovanja komponent s čimer načrtovana komponenta doseže željeno življensko dobo.

Slabe plati uporabe modelov so po viru [2] sledeče:

- potrebujemo natančne podatke o izdelavi opazovane komponente (vrsto materiala, procesne in načrtovalske podatke, itd.),
- analiza je kompleksna in zamudna (draga) in
- zaradi kompleksnosti je z njo težko okarakterizirati celoten sistem.

### 1.2.4 Izvajanje pospešenega staranja v temperaturni komori

Elektronske sisteme glede na ambient aplikacije lahko testiramo z naslednjimi vrstami testov:

- *hladni korak* (angl. *cold step*) ali odkrivanje napak pri nadpovprečno nizkih temperaturah delovanja: primarni cilj je določitev spodnje temperaturne meje delovanja, pod katero komponenta ali sistem ne deluje več - gre v odpoved; po [8] začnemo testiranje pri sobni temperaturi, odtod pa temperaturo nižamo v obliki padajoče stopničaste funkcije; priporočena dolžina stopnice je 15 minut (angl. *dewell time*), njena višina pa  $10^{\circ}\text{C}$ ;
- *vroči korak* (angl. *hot step*) ali odkrivanje napak pri nadpovprečno visokih temperaturah delovanja: primarni cilj je določitev zgornje temperaturne meje delovanja, nad katero komponenta ali sistem ne deluje več - gre v odpoved; tudi v tem primeru po [8] začnemo testiranje pri sobni temperaturi, nato pa temperaturo zvišujemo v obliki naraščajoče stopničaste funkcije; karakteristike stopnice so enake kot v prejšnjem zgledu;
- *korak s hitro menjajočo se temperaturo* (angl. *rapid temperature cycling*); po [8] ciklično testiranje poteka z 10 minutnim zadrževanjem na mejnih temperaturnih vrednostih  $T_{min}$  in  $T_{max}$  ter čimhitrejšim prehajanjem med obema vrednostima; hitrost prehajanja naj bi bila pogojena z minimalno 60 stopinjami temperaturne spremembe na minuto; komplet test naj bi vseboval vsaj 5 temperaturnih ciklov; temperaturi  $T_{min}$  in  $T_{max}$  naj bi bili mejni temperaturi delovanja, pridobljeni v hladnem in vročem koraku.

## 1.3 Standardi za določanje zanesljivosti elektronskih komponent

Standardi za določanje zanesljivosti elektronskih komponent temeljijo na enolični določitvi ali izračunu  $\lambda(t)$  za posamezno komponento. Pri tem imajo prevladujoč vpliv parametri kot so npr. ambientalna temperatura v kateri bo sistem deloval, področje misije končne aplikacije (npr. zemeljska - fiksna, zračna, vodna, vesoljska), izkušnje proizvajalcev itd.

Prvi standard, ki se je izoblikoval na tem področju, je MIL-HDBK-217F, ki je bil oblikovan za potrebe ameriške vojske. Zadnja popolna verzija standarda je bila objavljena leta 1992 (MIL-HDBK-217F Notice 1), zadnji popravki pa leta 1995 (MIL-HDBK-217F Notice 2). V začetku devetdesetih let prejšnjega stoletja se je izdelava elektronskih komponent, predvsem pa integriranih vezij izredno razmahnila in prišlo je do izoblikovanja industrijskih standardov. Tipični primeri danes aktualnih standardov so Bellcore/Telcordia SR-332 (Issue 2) za področje ZDA, IEC 62380 za področje Evrope in China 299B za področje Kitajske. Drugi razlog za porajanje industrijskih standardov je tudi *prislovna pesimističnost* napovedi intenzivnosti odpovedovanja, ki jih pridobimo na



osnovi MIL-HDBK-217F standarda. MIL-HDBK-217F standard je zaradi svoje zastarelosti že dlje časa javno dostopen. V Sloveniji je mogoče poleg javno dostopnega MIL standarda pri organizaciji SIST (Slovenski institut za standardizacijo) proti plačilu pridobiti licenčno verzijo IEC 62380 standarda. Za pridobitev Bellcore/Telcordia SR-332 mora eventuelni kupec skleniti neposredno licenco z organizacijo Telcordia. Možnosti dostopa do China 299B standarda nismo preverjali.

### 1.3.1 MIL-HDBK-217F standard

Standard je bil prvotno namenjen samo za vojaške potrebe, a je zaradi svoje uporabnosti prodril tudi v industrijo civilnih produktov. V devetdesetih letih prejšnjega stoletja je bil najbolj razširjen standard za določanje intenzivnosti odpovedovanja elektronskih komponent v vojaški in komercialni industriji. Standard temelji na dveh metodah napovedovanja odpovedi [9] in sicer na

- ”*parts count prediction*” in
- ”*parts stress analysis prediction*”.

#### ”Parts count prediction”

Omenjena metoda je enostavnejša in hitrejša. Predvideva, da vse komponente delujejo pod tipičnimi delovnimi ali referenčnimi pogoji. Pod slednje smatramo podobne kompleksnosti komponent, podobne ambientalne temperature, podobne električne obremenitve, podobne obremenitve iz okolja itd. Običajno se uporablja v začetni fazi razvoja, ko še nimamo natančnih podatkov o posameznih komponentah in nam je bolj pomembna približna ocena intenzivnosti odpovedovanja, kot pa njen točni izračun. Intenzivnost odpovedovanja po tej metodi izračunamo po izrazu

$$\lambda_{sys} = \sum_{i=1}^n \lambda_{ref_i}, \quad (1.17)$$

kjer je  $\lambda_{ref_i}$  intenzivnost odpovedovanja  $i$  te komponente pri referenčnih pogojih,  $n$  pa število komponent. Še enkrat poudarimo, da za vse komponente veljajo enaki referenčni pogoji.

#### ”Parts stress analysis prediction”

Ker vse komponente sistema nimajo enake kompleksnosti in ne delujejo pod enakimi pogoji, prihaja pri različnih komponentah do različnih intenzivnosti odpovedovanja, kar vzame v obzir pričujoča metoda. Iz slednjega razloga moramo poznati več podrobnosti o vsaki komponenti, ki sestavlja sistem. Metodo uporabljamo za izračune zanesljivosti že obstoječih sistemov, za katere so podane natančne specifikacije elektronskih komponent. Splošno enačbo za intenzivnost

odpovedovanja po tej metodi bi ob predpostavki, da imajo vse komponente konstantno intenzivnost odpovedovanja, zapisali z izrazoma

$$\lambda_{sys} = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (1.18)$$

$$\lambda_i = f_i [\lambda_{ref_i}, \pi_T, \pi_E, \pi_Q, \pi_L], \quad (1.19)$$

kjer so po vrsti  $\pi_T$  faktor temperature,  $\pi_E$  faktor okolja,  $\pi_Q$  faktor kvalitete in  $\pi_L$  faktor ocene proizvajalca in časa obstoja komponente na trgu. V izrazu (1.19) smo navedli le najpogosteje uporabljane vplivne faktorje  $\pi$ .

Standard vsebuje poglavja, ki definirajo različne načine izračuna izraza (1.19) za različne tipe komponent (npr. za integrirana vezja, upore, kondenzatorje, konektorje itd.). Za mikroprocesorje je tako na primer funkcija  $f_i$  definirana na osnovi izraza

$$\lambda_i = (C_1 * \pi_T + C_2 * \pi_E) * \pi_Q * \pi_L \text{ odpovedi} / 10^6 \text{ delovnih ur}, \quad (1.20)$$

kjer je konstanta  $C_1$  pogojena s številom logičnih vrat (notranja kompleksnost izvedbe), konstanta  $C_2$  pa s številom nožic (pinov) vezja (zunanja kompleksnost izvedbe). Vse parametre izraza (1.20) odčitamo iz standarda v odvisnosti od predvidenih delovnih pogojev aplikacijskega okolja.

Standard glede na delovno okolje aplikacije (vplivni faktor  $\pi_E$ ) razlikuje med naslednjimi področji aplikacijske rabe [9]:

- "Ground applications" - zemeljske aplikacije: navedene aplikacije razdelimo na skupine "benign", "fixed" in "mobile",
- "Naval applications" - mornariške aplikacije: navedene aplikacije razdelimo na skupine "sheltered" in "unsheltered",
- "Airborne applications" - letalske aplikacije: navedene aplikacije razdelimo na skupine "inhabited cargo", "inhabited fighter", "uninhabited cargo", "uninhabited fighter" in "rotary winged" in
- "Space flight" - vesoljske aplikacije.

Več o definiranju vpliva okoljskega faktorja  $\pi_E$  si bralec lahko prebere v viru [9].

### Zgleda uporabe MIL-HDBK-217F standarda

V pričujočem razdelku podamo dva zgleda uporabe MIL standarda. Oba zgleda sta izvedena na elektronskih komponentah, ki so bile aktualne v obdobju, ko je standard bil široko razširjen in uporabljan kot edini „defacto“ standard.

**Zgled 1** Za 128KB EEPROM, izdelan v Flotox tehnologiji, bi radi izračunali njegovo intenzivnost odpovedovanja. Predvidena temperatura PN spoja je  $T_j =$

80° C, ter 10.000 pisalnih ciklov v življenski dobi sistema. Komponenta je izdelana po zahtevah MIL-STD-883, ima Class B-1 klasifikacijo in je v proizvodnji že tri leta. Ohišje je 28 pinsko DIP izvedbe s steklenim tesnjenjem. Okolje ciljne aplikacije je tovorni, neobljudeni prostor v letalu.

Osnovno enačbo za izračun intenzivnosti odpovedovanja EEPROMa povzamemo po MIL-HDBK-217F standardu (glej str. 5-4 v viru [9]). Izraža se po izrazu

$$\lambda = (C_1 * \pi_T + C_2 * \pi_E + \lambda_{CYC}) * \pi_Q * \pi_L, \quad (1.21)$$

pri čemer  $C_1$  predstavlja kompleksnost notranje izvedbe komponente, ki je pogojena s pomnilno kapaciteto,  $\pi_T$  vplivni faktor temperature,  $C_2$  kompleksnost zunanje izvedbe, ki je pogojena s številom nožic vezja,  $\lambda_{CYC}$  vplivni faktor števila bralno-pisalnih ciklov,  $\pi_Q$  vplivni faktor kvalitete izvedbe in  $\pi_L$  vplivni faktor izkušnje proizvajalca. Za izračun izraza moramo s pomočjo standarda tako določiti potrebne vrednosti navedenih spremenljivk:

- glede na pomnilno kapaciteto komponente (128KB) za  $C_1$  privzamemo vrednost 0,0034 (glej str. 5-4 v standardu),
- glede na ciljno temperaturo PN spoja, ki je  $T_j = 80^\circ C$ , za  $\pi_T$  privzamemo vrednost 3,8 (glej str. 5-13 v standardu),
- glede na število nožic (28) in izvedbo s steklenim tesnjenjem, privzamemo za  $C_2$  vrednost 0,014 (glej str. 5-14 v standardu),
- glede na ciljno pozicijo aplikacije (tovorni, neobljudeni prostor v letalu), privzamemo za  $\pi_E$  vrednost  $A_{UC}$  (angl. Airborne Unhabited Cargo) 5 (glej str. 5-15 v standardu),
- glede na klasifikacijo kvalitetno klasifikacijo komponente, ki sodi v razred Class B-1, privzamemo za  $\pi_Q$  vrednost 2,0 (glej str. 5-15 v standardu),
- glede na izkušnje proizvajalca, ki izvirajo iz časa izdelave opazovane komponente 3 let, privzamemo za  $\pi_L$  vrednost 1,0 (glej str. 5-15 v standardu).

Za izračun izraza (1.21) potrebujemo še vrednost spremenljivke  $\lambda_{CYC}$ , ki se izraža kot

$$\lambda_{CYC} = (A_1 * B_1 \frac{A_2 + B_2}{\pi_Q}) * \pi_{ECC}, \quad (1.22)$$

kjer so faktorji  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$  in  $B_2$  odvisni od tehnologije izvedbe, števila pisanj in ambientalne temperature. Tako po standardu izberemo sledeče vrednosti (glej str. 5-4, 5-5, 5-6 v standardu)

$$A_1 = 0,1, A_2 = 0, B_1 = 3,8, B_2 = 0, \pi_{ECC} = 1. \quad (1.23)$$

Odtod lahko izračunamo vrednost izraza (1.21). Izračunana intenzivnost odpovedovanja je tako 0,925 odpovedi na  $10^6$  delovnih ur.

**Zgled 2** Za 8 bitni procesor izdelan v CMOS tehnologiji želimo po standardu oceniti intenzivnost odpovedovanja. Procesor bo vgrajen v sistem, ki deluje v osebnem avtomobilu. Predvidena temperatura PN spoja je  $T_j = 100^\circ\text{C}$ . Procesor je realiziran v 40 pinskem hermetično zaprtem DIP ohišju, pri čemer 4 pini niso v uporabi. Razred kvalitete procesorja ni znan, v proizvodnji pa je že 6 let.

Osnovno enačbo za izračun intenzivnosti odpovedovanja procesorja povzamemo po MIL-HDBK-217F standardu (glej str. 5-3 v viru [9]). Izraža se po izrazu

$$\lambda = (C_1 * \pi_T + C_2 * \pi_E) * \pi_Q * \pi_L, \quad (1.24)$$

pri čemer pomene posameznih parametrov iz izraza (1.24) že poznamo. Vrednosti parametrov povzete po standardu so sledeče:

- glede na 8 bitno naravo procesorja za  $C_1$  privzamemo vrednost 0,14 (glej str. 5-3 v standardu),
- glede na ciljno temperaturo PN spoja, ki je  $T_j = 100^\circ\text{C}$ , za  $\pi_T$  privzamemo vrednost 1,5 (glej str. 5-13 v standardu),
- glede na število funkcionalnih nožic (36), privzamemo za  $C_2$  vrednost 0,013 (glej str. 5-14 v standardu),
- glede na ciljno pozicijo aplikacije, privzamemo za  $\pi_E$  vrednost  $G_M$  (angl. Ground Mobile) 4 (glej str. 5-15 v standardu),
- glede na neznano klasifikacijo kvalitete komponente, privzamemo za  $\pi_Q$  maksimalno vrednost 2,0 (glej str. 5-15 v standardu),
- glede na izkušnje proizvajalca, ki izvirajo iz časa izdelave opazovane komponente 6 let, privzamemo za  $\pi_L$  vrednost 0,25 (glej str. 5-15 v standardu).

Odtod lahko izračunamo vrednost izraza (1.24). Izračunana intenzivnost odpovedovanja je tako 0,131 odpovedi na  $10^6$  delovnih ur.

### 1.3.2 IEC 62380

IEC 62380 (angl. *Reliability data handbook - Universal model for reliability prediction of electronic components, PCBs and equipment*) izide leta 2004 [10]. Njegov izdajatelj je IEC (International Electrotechnical Commission), gre pa za nadgradnjo standarda UTEC 80-810, ki je imel v preteklosti status "evropskega" standarda za določanje zanesljivosti elektronskih komponent na področju telekomunikacij (angl. *European Commercial Telecom Standard Electronic Reliability prediction*). Temeljna merska enota intenzivnosti odpovedovanja, ki nastopa v IEC dokumentaciji, je FIT, definirana kot  $n$  odpovedi na  $10^9$  delovnih ur. Iz slednje novo vpeljane enote in podatkov iz prakse lahko zaključimo, da je velikostni razred enega FIT-a osnovna ocena zanesljivosti današnjih integriranih vezij.

IEC 62380 z razliko od MIL-217F predvideva zmanjšanje različnih aplikacijskih okolij na štiri okolja in sicer

- zemeljska stacionarna okolja, zaščiteni pred vremenskimi razmerami (angl. *ground, stationary, weather protected*),
- zemeljska stacionarna okolja, nezaščiteni pred vremenskimi razmerami (angl. *ground, stationary, not weather protected*),
- zračna okolja v prisotnosti človeka (angl. *airborne, inhabited, cargo*) in
- zemeljska nestacionarna okolja (angl. *ground, non stationary, moderate*).

Zmanjševanje števila aplikacijskih okolij izvira iz narave tržne naravnosti evropske telekomunikacijske proizvodnje. Posebnost standarda je upoštevanje več *profilov delovanja* (angl. *mission profile*), ki so razloženi v sledečem razdelku.

### Profili delovanja naprave

Pri izračunu intenzivnosti odpovedovanja komponent po standardu IEC dodatno upoštevamo njihov način uporabe in ambientalno okolje, v katerem se uporabljajo. S tem dobimo več profilov delovanja komponente. Vsak profil delovanja lahko razdelimo na več tipov delovnih faz, znotraj katerih naprava deluje bolj ali manj homogeno, in sicer na

- *on/off* delovne faze, v situacijah, ko se komponenta pogosto vklaplja in izklaplja,
- *konstantno delovanje* komponente,
- *skladiščenje* komponente.

Cilj delitve na različne faze je ločeno upoštevanje temperaturnih sprememb, ki so v posameznih fazah različne. Pri tem imamo lahko več delovnih faz istega tipa, ki se med seboj razlikujejo glede na temperaturne pogoje, v katerih deluje komponenta. IEC v izračunih upošteva tudi čas oziroma delež leta, ko je naprava v posamezni fazi.

Določiti moramo vrednosti sledečih parametrov:

- $(t_{ae})_i$ : povprečna temperatura okolja, v katerem se nahaja komponenta v fazi  $i$ ,
- $(t_{ac})_i$ : povprečna temperatura okolja v neposredni bližini komponente, v katerem je leta v fazi  $i$ ,
- $\tau_i$ : delež leta, ko je komponenta v fazi  $i$  tipa "konstantno delovanje",
- $\tau_{on}$ : delež leta, ko je komponenta v fazi tipa "konstantno delovanje" (velja  $\tau_{on} = \sum \tau_i$ ),
- $\tau_{off}$ : delež leta, ko je komponenta v fazi tipa "skladiščenje" (velja  $\tau_{on} + \tau_{off} = 1$ ),

- $n_i$ : število temperaturnih ciklov s spremembo  $\Delta T_i$  v fazi  $i$  na leto,
- $\Delta T_i$ : povprečna sprememba temperature, ki jo komponenta občuti v fazi  $i$ ; za delovne faze tipa *on/off* velja izraz

$$\Delta T_i = \left[ \frac{\Delta T_j}{3} + (t_{ac})_i \right] - (t_{ae})_i, \quad (1.25)$$

kjer je  $\Delta T_j$  sprememba temperature na spojih; za ostala dva tipa faz je  $\Delta T_i$  razlika med maksimalno in minimalno temperaturo okolja v katerem deluje komponenta za fazo  $i$ ; če je razlika manjša od  $3^\circ C$ , jo ignoriramo;

### Narava odpovedi

IEC definira dva vira odpovedi komponent in sicer notranjega (angl. *intrinsic*) in zunanega (angl. *non-intrinsic*), pri čemer v svoji metodologiji izračunavanja upošteva le notranje vire. To opravičuje z dejstvom, da je odpovedi z zunanjim vplivom v deležu vseh odpovedi malo, zunanje vplive pa je možno definirati in tovrstne odpovedi eliminirati. Zunanje vplive odpovedi v praksi enačimo s preobremenitvami, slabim načrtovanjem in uporabo sistema in dobesednimi zunanjimi vplivi.

### Vplivni faktorji

Na izračun  $\lambda(t)$  delujeta dve množici faktorjev in sicer *operacijski* (angl. *operational*) in *okoljski* (angl. *environmental*) faktorji. Za vsako od družin elektronskih komponent (npr. za integrirana vezja) tako IEC podaja neko osnovno konstantno  $\lambda_B(t)$ , slednja pa se množi z vplivnimi faktorji ( $\lambda(t) = \lambda_B(t) * f_1 * f_2 * \dots * f_n$ ).

### Primer izračuna intenzivnosti odpovedovanja za integrirana vezja

Osnovni nastavek za  $\lambda(t)$  posameznega integriranega vezja je podan z izrazom

$$\lambda(t) = \lambda_{die} + \lambda_{package}, \quad (1.26)$$

pri čemer sta  $\lambda_{die}$  in  $\lambda_{package}$  definirana kot

$$\lambda_{die} = \lambda_{thermal\_effects} + \lambda_{EOS\_effects}, \quad (1.27)$$

$$\lambda_{package} = \lambda_{thermomechanical\_effects}. \quad (1.28)$$

Dokončni matematični model za izračun  $\lambda(t)$  je podan z izrazom

$$\lambda = [\lambda_{die} + \lambda_{package} + \lambda_{overstress}] * 10^{-9} / h, \quad (1.29)$$

ob natančenjših definicijah

$$\lambda_{die} = (\lambda_1 * N * e^{-0.35*a} + \lambda_2) * \frac{\sum_{i=1}^y (\pi_t)_i * \tau_i}{\tau_{on} + \tau_{off}}, \quad (1.30)$$

Proizvajalec/Standard	IEC 62380	Telcordia SR 332	China 299B
Relex (ZDA)	DA	DA	GJB/Z 299C
BQR (Izrael)	DA	”Bellcore”	-
T-Cubed Systems (ZDA)		DA	
IsoGraph (ZDA)	DA	DA	GJB/Z 299B
ReliaSoft (ZDA)		DA	-
ItemSoft (ZDA)	DA	DA	DA

Tabela 1.4: Pregled podpore orodij za določanje intenzivnosti odpovedovanja elektronskih komponent (podatki glasijo na leto 2013).

$$\lambda_{package} = 2.75 * 10^{-3} * \pi_a * \left( \sum_{i=1}^z (\pi_n)_i * (\Delta T_i)^{0.68} \right) * \lambda_3, \quad (1.31)$$

$$\lambda_{overstress} = \pi_I * \lambda_{EOS}. \quad (1.32)$$

Razlage posameznih spremenljivk, ki nastopajo v izrazih najdemo v samem standardu in jih na tem mestu ne bi naštevali. Temeljna ugotovitev ob primerjavi standardov MIL in IEC je dejstvo, da je kompleksnost izračunov z IEC standardom dosti večja, kot z MIL standardom.

### 1.3.3 Bellcore/Telcordia SR-332

Trenutno aktualna verzija standarda je 4.izdaja (Issue 4), ki je izšla leta 2016. Standarda preko SIST ni mogoče pridobiti. Za dostop do njega mora naročnik skleniti posebno licenčno pogodbo neposredno z organizacijo Telcordia.

### 1.3.4 Programska orodja

V pričujočem razdelku navajamo nekaj najbolj znanih proizvajalcev programske opreme za določanje zanesljivosti in standarde, ki jih orodja pokrivajo. Pri tem ne navajamo podatkov za MIL-217F, ker tega podpirajo vsa navedena orodja. Podatki so navedeni v tabeli 1.4.

### 1.3.5 Ocena rezultatov izračunov ob uporabi različnih standardov

V splošnem pri uporabi različnih standardov za izračune intenzivnosti odpovedovanja elektronskih komponent pridemo do naslednjih zaključkov:

- MIL daje najpesimističnejše rezultate, Telcordia pa najoptimističnejše, kar lahko simbolično zapišemo z izrazom

$$\lambda_{SYS-MIL} \geq \lambda_{SYS-IEC} \geq \lambda_{SYS-Telcordia}; \quad (1.33)$$

- največ podatkov moramo zagotoviti za IEC oceno, manj za MIL in najmanj za Telcordiino, kar lahko simbolično zapišemo z izrazom

$$T_{SYS-IEC} \geq T_{SYS-MIL} \geq T_{SYS-Telcordia}, \quad (1.34)$$

s katerim ponazorimo poraba časa za izdelavo ocene.



# Literatura

- [1] “Using models to predict semiconductor failures.” <http://www.edn.com/electronics-news/4378957/Using-Models-to-Predict-Semiconductor-Failures/>, Marec 2015.
- [2] “Prediction methods.” [http://www.reliasoft.com/newsletter/v9i1/prediction\\_methods.htm/](http://www.reliasoft.com/newsletter/v9i1/prediction_methods.htm/), Marec 2015.
- [3] “Arrhenius relationship.” [http://www.weibull.com/AccelTestWeb/arrhenius\\_relationship\\_chap\\_.htm/](http://www.weibull.com/AccelTestWeb/arrhenius_relationship_chap_.htm/), Marec 2015.
- [4] M. Topič, *Zanesljivost in vzdrževanje komponent in sistemov*. Založba FE in FRI, 2009.
- [5] “Reliability Engineering Resource Website.” <http://www.weibull.com/>, Marec 2015.
- [6] “Estimating time-to-fail.” [http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0163\\_ettf/index.html/](http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0163_ettf/index.html/), Marec 2015.
- [7] “Engineering statistics.” <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>, Marec 2015.
- [8] “Reliability services.” <http://www.halthass.co.nz/reliability-services/>, Marec 2015.
- [9] D. of Defense, *MIL-HDBK-217F: Reliability prediction of electronic equipment*. Department of Defense, USA, 1991.
- [10] I. N. Committees, *Reliability data handbook*. International Electrotechnical Commission, Switzerland, 2004.