

# 1 SPLOŠNE ZNAČILNOSTI

- 1.1 STANDARDIZACIJA
- 1.2 ZANESLJIVOST
- 1.3 STARANJE

## 1.1 STANDARDIZACIJA

### 1.1.1 UVOD

Za začetek bomo posvetili par besed področju, ki vse bolj pridobiva na vplivu in ga vse pogosteje srečujemo pri obravnavi katerekoli vrste elektronskih elementov oz. komponent, pa tudi širše - standardizaciji.

**Definicija:** Standardizacija je usklajenost z dogovorjenimi predpisi - standardi.

**Prednosti:** Standardizacija prinese proizvajalcem in kupcem vrsto prednosti:

- 1) zagotavljanje in kontrola kvalitete (več kasneje!)
- 2) v fazi načrtovanja vezja: lažja primerjava in selekcija elementov med različnimi proizvajalci

- 3) v primeru okvare elementa: lažje iskanje nadomestnega elementa (ekvivalenta), zlasti v primeru izpada originalnega proizvajalca
- 4) izboljšano varstvo okolja

### 1.1.2 VRSTE STANDARDOV

Standardizacija pokriva lahko različna področja kot npr. področje proizvodov, procesov, testov, kvalitete izdelkov itd. Zato obstojajo različni načini razvrstitve standardov, npr.:

- **razvrstitev po vrsti proizvoda:** npr. standardi za elektronske elemente (npr. upore, kondenzatorje itd.), za elektronske sisteme, za gospodinjske naprave itd.
- razvrstitev po področju veljavnosti (teritorialnost):
  - a) nacionalni standardi** veljajo v okviru ene države, npr. Nemčija - Deutsche Industrie Norme, DIN ali ZDA - Military Standards, ki so označeni kot MILSTD XXX (npr. za XXX=198 dobimo na webu standarde za kondenzatorje, za 199 za upore itd.)
  - b) mednarodni standardi** veljajo v okviru neke skupnosti držav. Trije osnovni nosilci mednarodne standardizacije so naslednje mednarodne organizacije:
    - IEC - International Electrotechnical Commission
    - ISO - International Organization for Standardization
    - ITU - International Telecommunication Union

Vsaka organizacija pokriva svoje področje s svojimi standardi. Tako so npr. na področju elektrotehnike pomembni splošno uporabljani IEC standardi, ki se imenujejo po svojem ustanovitelju, International Electrotechnical Commission, na področju kvalitete in okolja pa ISO standardi (več kasneje).

razvrstitev po raznih drugih lastnostih:

V ilustracijo navedimo nekaj važnejših primerov:

**a) standardi na področju kvalitete:** Osnovni standard na področju kvalitete je ISO 9000, ki ga nadzira mednarodna organizacija ISO (International Organization for Standardization). Ti standardi obsegajo ne le končno kvaliteto izdelkov, temveč v podrobnostih kontrolirajo kvaliteto v celotnem procesu izdelave izdelka. S standardi kvalitete so zato točno predpisane zahteve ne le glede končnih električnih in drugih lastnosti elementa, temveč tudi glede posameznih tehnoloških korakov, vstopne kvalitete materialov in elementov oz. njihove kontrole, njihove sledljivosti (vsak element ima svojo kartoteko v računalniku proizvajalca) itd. Posledica takega pristopa je visoka kvaliteta in stabilnost oz. zanesljivost proizvedenih produktov. V končni fazi to pomeni dober nastop proizvajalca na trgu, višjo ceno produktov in s tem preživetje proizvajalca. Zaradi vse kompleksnejših elektronskih sistemov, torej sistemov z zelo velikim številom elektronskih elementov, ki smo mu priča v zadnjem času in s tem povezane zahteve po povišani zanesljivosti osnovnih gradnikov, postajajo zlasti standardi na področju kvalitete vse bolj pomembni.

**b) standardi na področju varstva okolja:** Osnovni standardi na področju varstva okolja je ISO 14000, ki ga prav tako nadzira mednarodna organizacija ISO - International Organization

for Standardization. Ti standardi obsegajo podrobne predpise glede varstva okolja v celotnem procesu izdelave elementov.

Važen primer takega okoljevarstvenega pristopa je ti. Zelena elektronika, ki v svojih komponentah ne vsebuje okolju nevarnega svinca (Pb). V Evropi in svetu poteka zato intenzivno raziskovalno delo na elektronskih elementih in materialih, kjer je element Pb nadomeščen z drugimi podobnimi a manj škodljivimi elementi (npr. kadmij Cd).

Zaradi naraščajočih problemov v zvezi z globalnim varstvom okolja se pričakuje hiter nadaljnji razvoj in uveljavitev teh standardov v vseh vejah industrije kot tudi pri najrazličnejših drugih aktivnostih.

**c) standardi na področju elektromagnetnih motenj:** Osnovni standardi na področju elektromagnetnih motenj (EMI - Electromagnetic Interference) oz. elektromagnetne kompatibilnosti (EMC - Electromagnetic Compatibility) predpisujejo, da mora biti vsaka naprava pred prihodom na trg ustrezno testirana. Testiranje mora potekati točno v skladu z EMI oz. EMC predpisi(standardi), z ozirom na elektromagnetne motnje, ki jih naprava oddaja med delovanjem in ki ne smejo preseči s standardi predpisanih vrednosti.

#### REFERENCE

- 1) H.Rohlfing, Friedrich priročnik za elektrotehniko in elektroniko, Tehn.zal.Sl., 1995, ISBN 86-365-0186-5, s.15-1
- 2) World Standards Services Network(WSSN): <http://wssn.net/WSSN/index.html>
- 3) International Organization for Standardization(ISO):  
<http://www.iso.org/iso/en/ISOOnline.frontpage>
- 4) International Electrotechnical Commission(IEC):<http://www.iec.ch/>
- 5) International Telecommunication Union(ITU):  
<http://www.itu.int/net/home/index.aspx>

## 1.2 ZANESLJIVOST

### 1.2.1 UVOD

Zanesljivost (Reliability, R) igra v elektroniki vse važnejšo vlogo zaradi naraščajoče kompleksnosti elektronskih vezij in sistemov. Zanesljivost se ukvarja z napovedjo odpovedi elementov, vezij in sistemov po dolgoletnem delovanju.

**Definicija:** Zanesljivost nekega elektronskega elementa ali sistema (npr. upor, računalnik, TV aparat itd.) je sposobnost oz. verjetnost, da bo deloval v okviru zajamčenih kataloških podatkov proizvajalca pod predpisanimi pogoji delovanja (električna obremenitev, temperatura, vlaga itd.) preko zajamčenega časovnega obdobja, pri čemer število odpovedi ne presega obljubljenega!

**Kratka definicija zanesljivosti** (vendar manj točna) bi se tako lahko glasila: zanesljivost je verjetnost preživetja!

### 1.2.2 POGOSTOST ODPOVEDI

Zanesljivost podajamo s t.i. pogostostjo odpovedi (Failure Rate, FR). FR je definirana kot razmerje med relativnim številom odpovedi (to je število vseh odpovedi, deljeno s številom vseh prisotnih elementov N) in časom dolgoletnega delovanja t. Torej,

$$FR = \frac{\text{at. odpovedi}}{N t} \quad \text{Equation Section 1(1.1)}$$

Tovarne merijo in podajajo FR kot enega izmed osnovnih podatkov za proizvedene elemente. Kupec tako lahko izbira, odvisno od danih zahtev, med manj ali bolj zanesljivimi elementi. Žal seveda vedno velja, da so zanesljivejši elementi tudi dražji.

Ker so današnji elementi že zelo zanesljivi in je torej pogostost odpovedi majhna, je kot osnovna enota za pogostost odpovedi FR izbrana ustrezno majhna enota, imenovana 1 FIT (Failure In Time), definirana kot

$$1 \text{ FIT} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ odpovedi / element h} \quad (1.2)$$

Povedano drugače: pričakujemo lahko, da bo komponenta z zanesljivostjo 1FIT izkazovala 1 odpoved na uro pri skupini  $10^9$  elementov, ali pa v povprečju delala  $10^9$  ur, preden bo odpovedala.

Ilustrirajmo povedano še s preprostim primerom:

**Primer:** Načrtujemo sistem s 100.000 elementi. Odpoved kateregakoli elementa povzroči odpoved celotnega sistema. Dopustna je največ 1 odpoved sistema na leto. Določi potrebno zanesljivost za posamezen element oz. pogostost odpovedi posameznega elementa  $FR_{1el}$  !

Rešitev:

$$\begin{aligned} FR_{1el} &= \text{št. odpovedi} / N t \\ &= 1 \text{ odpoved} / 10^{+5} \text{ elementov} \cdot 1 \text{ leto} \\ &= 1.2 \cdot 10^{-9} \text{ odpovedi} / \text{element h} \\ &= \underline{1.2 \text{ FIT}} \end{aligned}$$

Odgovor: Iz kataloga proizvajalca moramo torej izbrati elemente z zanesljivostjo oz. pogostostjo odpovedi  $FR_{1el}$  enako ali manjšo od 1.2 FIT .

### 1.2.3 MATEMATIČNI OPIS ZANESLJIVOSTI

Vpeljimo najprej nekaj matematičnih funkcij, ki jih potrebujemo pri obravnavi zanesljivosti !

Funkcija odpovedi (Failure Function):  $F(t)$

Funkcija  $F(t)$  podaja verjetnost, da bo nek element ali sistem, ki še pravilno deluje v času  $t = 0$  , odpovedal do časa  $t$  !

Navedimo nekaj lastnosti, ki sledijo neposredno iz definicije funkcije  $F(t)$ :

$$\begin{aligned} t < 0 & \quad F(t) = 0 & \quad (\text{element po definiciji zagotovo deluje do trenutka } t = 0 ! ) \\ 0 < t < t' & \quad 0 < F(t) < F(t') & \quad (\text{večji časi - večja verjetnost za odpoved ! )} \\ t \rightarrow \infty & \quad F(t) \rightarrow 1 & \quad (\text{za zelo velike čase element zagotovo odpove ! )} \end{aligned}$$

Funkcija zanesljivosti (Reliability Function):  $R(t)$

Funkcija  $R(t)$  podaja verjetnost, da bo nek element ali sistem, ki še pravilno deluje v času  $t = 0$  , prečivil brez odpovedi do časa  $t$  ! Funkcija  $R(t)$  je torej verjetnostno nasprotje  $F(t)$ :

$$R(t) = 1 - F(t) \tag{1.3}$$

Funkcija verjetnostne gostote :  $f(t)$

Funkcija verjetnostne gostote  $f(t)$  podaja verjetnost za odpoved na časovno enoto in je zato definirana kot časovni odvod funkcije  $F(t)$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \tag{1.4}$$

Z integracijo en(1.4) dobimo obratno zvezo, ki podaja funkcijo odpovedi  $F$  kot integral funkcije verjetnostne gostote za odpoved  $f$

$$F(t) = \int_0^t f(t') dt' \quad [ F(0) = 0 ] \quad (1.5)$$

S pomočjo en(1.3) in en(1.4) lahko zapišemo še zvezo med funkcijama  $f$  in  $R$

$$f(t) = - \frac{dR(t)}{dt} \quad (1.6)$$

Podobno kot v prejšnjem primeru en(1.5), tudi tu lahko zapišemo obratno zvezo

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t') dt' \quad [ R(\infty) = 1 - F(\infty) = 0 ] \quad (1.7)$$

Povprečni čas odpovedi (Mean Time To Failure) : MTTF

MTTF predstavlja povprečni čas do odpovedi oz. povprečni življenjski čas elementa ali sistema. MTTF zato lahko izračunamo po enačbi

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (1.8)$$

Pogostost odpovedi (Failure Rate) : FR(t)

Funkcija FR(t) podaja normalizirano število odpovedi na časovno enoto v trenutku  $t$ . Včasih srečamo za to funkcijo tudi oznako  $\lambda(t)$ . Povezavo s prejšnjimi veličinami lahko dobimo z naslednjim premislekom: število elementov, ki so delovali do nekega trenutka  $t$  in ki so nato odpovedali do trenutka  $t + dt$ , je podano z izrazom

$$F(t + dt) - F(t) = R(t) - R(t + dt) \quad (1.9)$$

Relativno število odpovedi v časovnem intervalu  $dt$  je zato podano z izrazom

$$\frac{1}{R(t)} \frac{R(t) - R(t + dt)}{dt} \quad (1.10)$$

Če limitiramo  $dt \rightarrow 0$ , dobimo število odpovedi na časovno enoto, funkcijo FR(t), v trenutku  $t$ , podano s časovnim odvodom  $R(t)$

$$\begin{aligned} FR(t) &= - \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \\ &= - \frac{d \ln R(t)}{dt} \end{aligned} \quad (1.11)$$

Z integracijo en(1.11) lahko dobimo še obratno zvezo

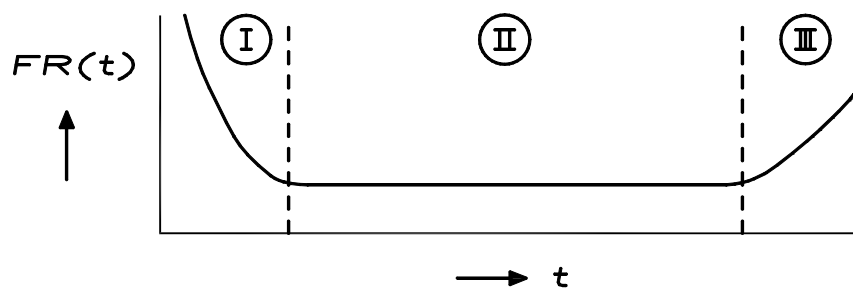
$$R(t) = e^{-\int_0^t FR(t') dt'} \quad (1.12)$$

S pomočjo podanih definicij lahko zapišemo še dva izraza za pogostost odpovedi  $FR(t)$

$$FR(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (1.13)$$

### 1.2.4 TIPIČEN ČASOVNI POTEK POGOSTOSTI ODPOVEDI

Zaradi narave stvari ima, ne glede na vrsto elementa ali sistema, tipičen časovni potek pogostosti odpovedi  $FR(t)$  obliko kopalne kadi, kot prikazuje Sl 1.1



Sl 1.1 Tipičen časovni potek  $FR(t)$

V diagramu na Sl 1.1 ločimo tri karakteristična obdobja:

(I) - Obdobje zgodnjih odpovedi oz. "otroške umrljivosti"

Značilnost tega obdobja je visoka, hitro upadajoča pogostost odpovedi. Vzrok odpovedi so grobe napake pri izdelavi (npr. mehanske poškodbe, zamenjava materialov itd.).

S pospešenim staranjem lahko dosežemo, da elementi to obdobje preživijo v tovarni (več o tem v poglavju o pospešenem staranju !).

(II) - Obdobje normalne uporabe

Značilnost tega obdobja je nizka, časovno neodvisna (konstantna) pogostost odpovedi. Vzroki odpovedi so v različnih zunanjih, od elementa neodvisnih, medsebojno nepovezanih učinkih (padec na tla, zalitje z vodo, napetostni sunek itd.).

(III) - Obdobje iztrošenosti

Značilnost tega obdobja je s časom naraščajoča pogostost odpovedi. Vzrok odpovedi je v iztrošenosti kritičnih materialov v elementu po dolgotrajnem delovanju (npr. oksidacija žarilne nitke v žarnici, korozija metalizacije v tiskanem ali integriranem vezju itd.).

### 1.2.5 FUNKCIJE PORAZDELITVE ZANESLJIVOSTI

Pri obravnavi problemov zanesljivosti srečamo različne funkcije za opis časovne odvisnosti odpovedi. Izbor najprimernejše funkcije je pogojen z lastnostmi konkretnih odpovednih mehanizmov. Oglejmo si nekaj tipičnih primerov!

#### Eksponentna porazdelitev zanesljivosti:

Eksponentna porazdelitev je primerna, kadar je pogostost odpovedi  $FR(t)$  neodvisna od časa in je zato uporabna za opis elementov v področju normalne uporabe (področje II na Sl 1.1). Velja torej

$$FR(t) = const = FR_0 \quad (1.14)$$

S pomočjo podanih definicij lahko ugotovimo še nekaj lastnosti eksponentne porazdelitve:

$$R(t) = e^{-\int_0^t FR_0 dt} = e^{-FR_0 t}$$

$$F(t) = 1 - e^{-FR_0 t}$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = +FR_0 e^{-FR_0 t}$$

$$MTTF = \int_0^{\infty} t FR_0 e^{-FR_0 t} dt = \frac{1}{FR_0} \quad (1.15)$$

Tabela 1 podaja tipične vrednosti  $FR_0$  in pripadajoče MTTF za nekaj pogostejših elektronskih elementov v področju normalne uporabe ( $MTTF = 1/FR_0$ ).

**Tabela 1.** Tipične vrednosti  $FR_0$  in MTTF

Element	$FR_0$	MTTF
upor	20 FIT	5.800 let
kondenzator(plastični)	2 FIT	58.000 let
Al elco	2500 FIT	46 let
polprevodniški element, IC	100 FIT	1160 let
spajkani kontakt	1 FIT	116.000 let

#### Weibullova porazdelitev zanesljivosti:

Weibullova porazdelitev je podana z dvema konstantama  $\alpha, \beta$  po enačbi



$$FR(t) = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right) t^{\beta-1} \quad (1.16)$$

Weibullova porazdelitev je primerna za opis porazdelitve zanesljivosti v različnih obdobjih diagrama na Sl 1.1, odvisno od vrednosti konstante  $\beta$  :

$\beta < 1 \rightarrow$  FR upada s časom; primerno za opis v obdobju zgodnjih odpovedi (področje I na Sl 1.1)

$\beta > 1 \rightarrow$  FR raste s časom; primerno za opis v obdobju iztrošenosti (področje III na Sl 1.1)

$\beta = 1 \rightarrow$  FR se s časom ne spreminja; primerno za opis v obdobju normalne uporabe (področje II na Sl 1.1), enako eksponentni porazdelitvi

S pomočjo podanih definicij lahko zapišemo zveze z ostalimi količinami

$$\begin{aligned} R(t) &= e^{-\frac{1}{\alpha}t^\beta} \\ F(t) &= 1 - e^{-\frac{1}{\alpha}t^\beta} \\ f(t) &= \frac{\beta}{\alpha} t^{\beta-1} e^{-\frac{1}{\alpha}t^\beta} \end{aligned} \quad (1.17)$$

Včasih vpeljemo zaradi boljšega ujemanja Weibullove porazdelitve z eksperimentalnimi podatki še tretji parameter  $t_0$  s tem, da nadomestimo v gornjih enačbah čas  $t$  s popravljenim časom  $t - t_0$

$$t \rightarrow t - t_0 \quad (1.18)$$

Čas  $t_0$  odgovarja začetnemu času oz. življenju, ki so ga elementi preživel v tovarni pred začetkom delovanja v napravi, npr. med procesom izdelave, ob začetnem pospešenem staranju ali testiranju itd.

**REFERENCE**

- 1) R.H.Myers, K.L.Wong, H.M.Gordy, "Reliability Engineering for Electronic Systems", John Wiley&Sons, New York, 1964.
- 2) J.Virant, "ZANESLJIVOST", Založba Fakultete za elektrotehniko, Ljubljana, 1978.
- 3) S.M.Sze, "VLSI Technology", McGraw-Hill Book Co., 1983.
- 4) R.Ročak, P.Tepina in dr., "CEOK - Celovito zagotavljanje kakovosti", Zbornik posvetovanja, MIDEM-EZS-ETAN, Ljubljana, 1987.
- 5) "Components - Assured Quality for the Benefit of the User", SIEMENS, 1987.
- 6) S.Gottesfeld, L.Gibbons, "Reliability Characterization of High-Speed CMOS Logic ICs", RCA Review - Special Issue on Reliability, Vol.45, No.2, Princeton, 1984.
- 7) L.Gallace, M.Rosenfield, "Reliability of Plastic-Encapsulated Integrated Circuits in Moisture Environments", RCA Review - Special Issue on Reliability, Vol.45, No.2, Princeton, 1984.
- 8) "Quality Assurance in the Field of Electronics", Proceedings of Symposium ELECTRONICA 86, Muenchen, 1986.

## 1.3 STARANJE

### 1.3.1 UVOD

Najprej podajmo kratko definicijo staranja:

**Definicija:** Staranje je počasno spreminjanje strukture elementa, zaradi degradacijskih procesov, med dolgoletnim delovanjem.

Staranje (Aging, Ageing) elektronskih elementov in sistemov ima velik vpliv na njihovo pravilno dolgoročno delovanje.

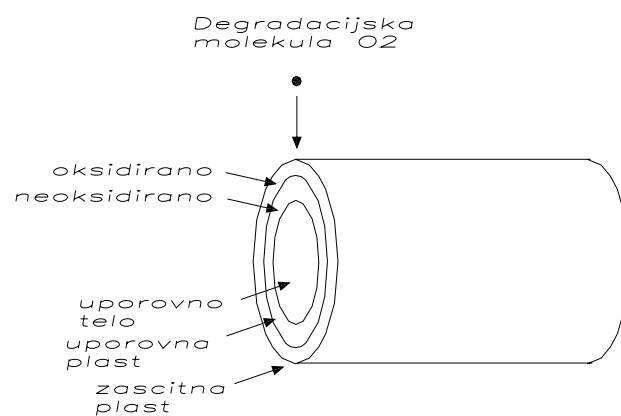
### 1.3.2 OPIS DEGRADACIJSKIH PROCESOV

Degradacijski procesi so škodljivi, počasni fizikalni ali kemijski procesi, ki potekajo v elementu kot posledica vplivov iz okolice ali iz elementa samega.

Primer: počasne kemijske reakcije zaradi prisotnih agresivnih snovi iz okolice ali iz elementa samega (npr. korozija metalizacijske linije v tiskanem ali integriranem vezju); mehanske razpoke v strukturi zaradi temperaturnih šokov pri segrevanju in ohlajanju elementa med delovanjem itd.

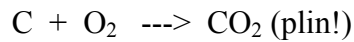
Degradacijski procesi potekajo počasi, vendar lahko med dolgoletnim delovanjem privedejo do bistvenih sprememb v strukturi in s tem v lastnostih elementa. Razmere bomo ilustrirali na primeru degradacije plastnega upora.

**Primer:** Degradacija plastnega upora (Sl 1.2)



Sl 1.2 Degradacija plastnega upora

**Opis degradacije:** 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 uporabne plasti, tam reagira z materialom uporabne plasti ter jo oksidira in s tem uporabni material spremeni v izolator. Znan tak primer je npr. degradacija ogljenoplastnega upora, kjer pri oksidaciji uporabne plasti nastaja plin, ki stalno izhaja:



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:

$$R > R_{\max}$$

### 1.3.3 TEMPERATURNNA IN ČASOVNA ODVISNOST DEGRADACIJE

Degradirano področje je določeno, kot je bilo prikazano na primeru degradacije upora, s povprečno globino difuzijskega vdora  $L$  degradacijske molekule ( $O_2$  v našem primeru) v strukturo elementa. Pri difuzijskem gibanju je povprečna globina vdora  $L$  podana z enačbo

$$L = \sqrt{Dt} \quad (1.19)$$

kjer je  $t$  ... čas degradacijskega procesa [leta]

$D$  ... difuzijska konstanta degradacijske molekule v materialu upora

Ker je difuzija pravzaprav izmenjevalno preskakovanje atomov po kristalni rešetki zaradi termičnega gibanja atomov, pojav raste s temperaturo, kot prikazuje Sl 1.3 oz. kot opisuje t.i. Arrheniusova temperaturna odvisnost

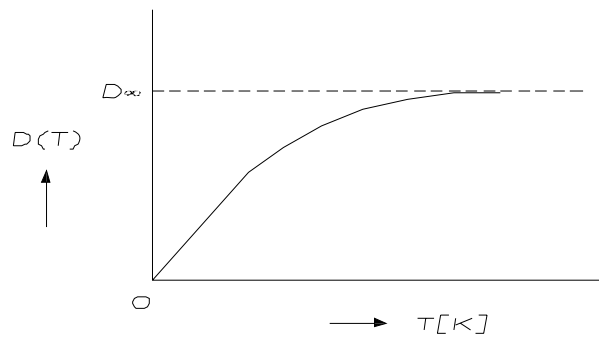
$$D = D_{\infty} \exp(-E_{aD} / kT) \quad (1.20)$$

kjer je  $D_{\infty}$  ... const (limitna vrednost difuzijske konstante za visoke temperature)

$E_{aD}$  ... aktivacijska energija difuzijskega procesa /tipično 1-2eV/

$k$  ..... Boltzmannova konstanta

$T$  ... absolutna temperatura [K]

SI 1.3 Temperaturna odvisnost difuzijske konstante  $D(T)$ 

Temperaturna in časovna odvisnost globine vdora  $L$  je torej opisana z enačbo

$$L = \sqrt{Dt} = \sqrt{D_{\infty} \exp(-E_{aD}/kT) t} \quad (1.21)$$

Kot smo videli, je degradacija, npr.  $\Delta R$  iz prejšnjega primera, določena z globino vdora  $L$ :  $\Delta R = KL$ , kjer je  $K$  neka konstanta. Zato je temperaturna in časovna odvisnost degradacije  $\Delta R(T,t)$  podana z izrazom

$$\Delta R(T,t) = KL = K \sqrt{D_{\infty} \exp(-E_{aD}/kT) t} \quad (1.22)$$

V splošnem ima torej degradacija naslednjo tipično temperaturno odvisnost

$$R(T) = K_1 \cdot \exp(-E_a/kT) \quad (1.23)$$

kjer je  $E_a$  ... aktivacijska energija degradacije:  $E_a = E_{aD}/2$ , tipično 0.5 - 1 eV,

in naslednjo tipično časovno odvisnost

$$R(t) = K_2 \cdot \sqrt{t} \quad (1.24)$$

kjer sta  $K_1, K_2$  neki konstanti (enostavno določeni po gornjih enačbah).

V splošnem torej kaže degradacija Arrheniusovo eksponentno naraščanje s temperaturo (SI 1.3) in korensko naraščanje s časom (4x daljši časi degradacije povzročijo tipično 2x večjo degradacijo  $\Delta R$ !).

### 1.3.4 POSPEŠENO STARANJE IN TESTIRANJE

Staranje lahko pospešimo z intenziviranjem različnih parametrov, ki pospešujejo degradacijske procese. V praksi običajno proces intenziviranja takega parametra imenujemo **obremenitev**, posledico tega postopka pa imenujemo **pospešeno staranje**.

#### Vrste obremenitev

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

- temperaturna obremenitev (povišana 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 uporabi zaradi večjega učinka istočasne kombinacije teh obremenitev. Znan primer iz industrije je npr. standardna klimatska obremenitev, ki je obremenitev oz. test s povišano temperaturo, vlago in slanostjo, v dogovorjenem trajanju.

#### Uporaba pospešenega staranja

Kot je bilo omenjeno v poglavju Zanesljivost, pospešeno staranje proizvajalci izkoriščajo zato, da proizvedeni elementi 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, kot bo prikazano na koncu poglavja.

### 1.3.5 POSPEŠENO STARANJE S POVIŠANO TEMPERATURO

Hitrost degradacije je običajno določena s hitrostjo degradacijske reakcije (Reaction Rate, RR). Pri prikazani degradaciji upora je bila to hitrost oksidacije uporovne plasti.

Hitrost degradacijske reakcije RR (npr. oksidacija uporovne lasti) je običajno določena s hitrostjo vdora L degradacijskih molekul v strukturo elementa. Zato ima RR običajno enako temperaturno odvisnost kot L

$$RR(T) = RR_{\infty} e^{-\frac{E_a}{kT}} \quad (1.25)$$

kjer je  $E_a$  ... aktivacijska energija degradacijskega procesa (tipično 0.5 ÷ 1eV)

$RR_{\infty}$  ... const (limitna hitrost reakcije za visoke temperature)

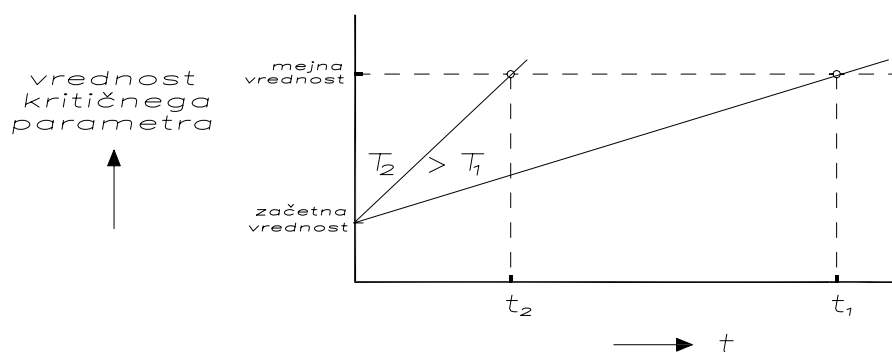
T ... absolutna temperatura [K]

k = 8.6.10<sup>-5</sup>eV/K Boltzmannova konstanta

Razmere bomo prikazali na preprostem primeru pospešenega staranja plastnega upora.

### Primer: Pospešeno staranje upora

Proces pospešenega staranja karakteriziramo z meritvijo spreminjanja upornosti upora v odvisnosti od časa, pri različnih temperaturah:  $R(t)I_T$ . Rezultat meritve pri dveh različnih temperaturah  $T_2 > T_1$  je prikazan na Sl 1.4. Kot smo videli, zaradi degradacijskih procesov upornost s časom raste in element odpove, ko je dosežena maksimalna dopustna vrednost upornosti  $R_{max}$ . Pri višji temperaturi  $T_2 > T_1$  potekajo degradacijske reakcije v skladu z zapisanimi enačbami za hitrost reakcije  $RR(T)$  hitreje in degradacija narašča strmeje, kot prikazuje Sl 1.4. Posledica je hitrejša odpoved elementa pri višjih temperaturah ( $t_{odp2} < t_{odp1}$ !) oz. pospešeno staranje elementa.



Sl 1.4 Tipičen potek degradacije pri dveh različnih temperaturah

Čim večja je torej hitrost reakcije  $RR$  pri neki temperaturi  $T$ , tem krajši je čas do odpovedi pri tej temperaturi  $t_{odp}(T)$ , kar poenostavljeno opišemo z enačbo

$$t_{odp}(T) = \text{const} / RR(T) \quad (1.26)$$

Zato lahko zapišemo razmerje dveh časov odpovedi pri dveh različnih temperaturah v obliki

$$t_{odp1} / t_{odp2} = RR(T2) / RR(T1) \quad (1.27)$$

### Pospešitveni faktor

Pospešeno staranje običajno opisujemo s pospešitvenim faktorjem (Acceleration Factor, AF). Pospešitveni faktor običajno še indeksiramo s parametrom, ki je pospešeno staranje povzročil, v tem primeru:  $AF_T$ .

**Definicija:** Pospešitveni faktor zaradi povišane temperature  $AF_T$  je definiran kot razmerje dveh časov degradacije pri dveh različnih temperaturah

$$AF_T = \frac{t_1}{t_2} = \frac{RR_2}{RR_1} = e^{\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \quad (1.28)$$

**Primer:** Določi pospešitveni faktor  $AF_T$  pri pospešenem staranju s podatki:  $E_a = 1 \text{ eV}$ , nižja temperatura ambienta  $T_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , povišana temperatura pospešenega staranja  $T_2 = 125$

°C !

Rešitev: V tem primeru velja torej:  $T_2 = 125\text{ °C} = 398\text{ K}$ ,  $T_1 = 50\text{ °C} = 323\text{ K}$ . Ob uporabi en(1.28) dobimo

$$AF_T = \frac{t_{odp1}}{t_{odp2}} = e^{\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} = \dots \cong 300$$

Odgovor: Pri povišani temperaturi  $T_2 = 125\text{ °C}$  poteka staranje približno 300-krat hitreje kot pri nižji temperaturi ambienta  $T_1 = 50\text{ °C}$  !

Pokažimo velik vpliv temperature na pospešitev staranja še v nekaj primerih. Tabela 2 podaja z en(1.28) izračunane akceleracijske faktorje in ekvivalentne čase za 40 let oz. 350.000 ur delovanja pri temperaturi  $T_1 = 60\text{ °C}$ , za različne povišane temperature  $T_2$ .

**Tabela 2. Akceleracijski faktorji in ekvivalentni časi za različne povišane temperature  $T_2$**

$T_2[\text{°C}]$	$AF_T$	Ekv.čas za 40 let na $T_1$
60	1	40 let = 350 400 h
85	11.5	30 000 h
125	300	1 200 h
150	$1.7 \cdot 10^{+3}$	200 h
200	$3.1 \cdot 10^{+4}$	11 h
250	$3.2 \cdot 10^{+5}$	1.1 h
300	$2.2 \cdot 10^{+6}$	0.2 h
$T_1=60\text{ °C}$ , $E_a=1\text{ eV}$		

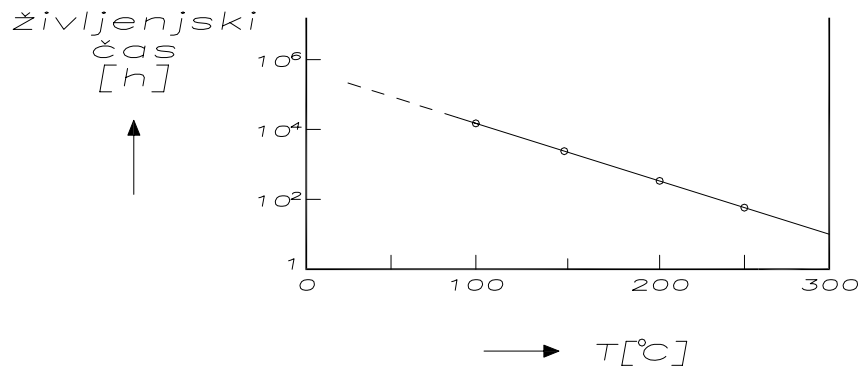
### 1.3.6 DOLOČANJE ŽIVLJENJSKIH ČASOV IN AKTIVACIJSKIH ENERGIJ

Življenjski čas 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 in več let, posameznih elementov pa še mnogo dalj ! Zato degradacijo oz. staranje skušamo pospešiti z intenziviranjem nekega parametra, ki pospešuje degradacijske procese ter tako skrajšamo življenjske čase in s tem čas meritev.

Določitev življenjskih časov s povišano temperaturo

Merimo povprečne čase do odpovedi oz. življenjske čase pri različnih povišanih temperaturah, tako da časi meritev niso predolgi. Rezultat prikazuje graf na Sl 1.5 (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.





SI 1.5 Življenjski časi v odvisnosti od temperature

**Določitev aktivacijske energije**

Določitev aktivacijske energije lahko izvedemo s pomočjo grafa na SI 1.5. Zaradi eksponentialne odvisnosti degradacijskih procesov od temperature in aktivacijske energije  $E_a$  lahko iz naklonskega kota premice določimo aktivacijsko energijo danega degradacijskega procesa  $E_a$ .

**1.3.7 DRUGE VRSTE OBREMENITEV**

Pospešeno staranje s povišano napetostjo

Hitrost reakcije degradacijskih procesov narašča v splošnem tudi z naraščajočo napetostjo  $V$  na elementu, zaradi lokalnega Jouleovega segrevanja, elektromigracije materialov itd. Hitrost degradacije raste z napetostjo, kot podaja naslednji izraz

$$RR(T, V) = K_V(T) V^{g(T)} \quad (1.29)$$

kjer je  $K_V(T)$  ... konstanta degradacije z Arrheniusovo temperaturno odvisnostjo  
 $g(T)$  ... potenca napetostne degradacije, odvisna od temperature (tipično  $1 \div 5$ )

S povišano napetostjo lahko torej pospešimo degradacijske procese in tako pospešimo staranje, v skladu z gornjo enačbo. Ustrezni akceleratorijski faktor ( $V_2 > V_1$ ) je zato podan z enačbo

$$AF_V = \frac{t_1(V_1)}{t_2(V_2)} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^g \quad (1.30)$$

Pospešeno staranje s povišanim tokom

Posledica obremenitve s povišanim tokom so lokalna Joulova segrevanja, elektromigracije materiala itd., kar vse vodi k pospešeni degradaciji elementa. Pospešitev degradacijskih procesov s povišanim tokom  $J$  kaže podobno odvisnost, kot smo jo srečali če pri napetosti

$$RR(T, J) = K_J(T) J^{h(T)} \quad (1.31)$$

kjer je  $h$  neka konstanta (tipično  $1 \div 4$ ).

Ustrezni akceleracijski faktor je zato podan z enačbo ( $J_2 > J_1$ )

$$AF_J = \frac{t_1(J_1)}{t_2(J_2)} = \left(\frac{J_2}{J_1}\right)^h \quad (1.32)$$

### Pospešeno staranje s povišano vlago

Pri povišani vlagi pride do pospešenega vdora majhnih in zato prodornih molekul vode ( $H_2O$ ) v strukturo elementa, kjer povzročijo degradacijo. Pri tem lahko voda še dodatno prinese iz okolice ali pa izpira (leaching) iz materiala ohišja različne agresivne nečistoče, ki povzročajo še dodatno degradacijo. Posledica je pospešena degradacija elementa.

Degradacija običajno eksponentno raste s povišano vlago ( $\eta$ ). Ustrezni akceleracijski faktor je podan z enačbo

$$AF_\eta = e^{A E_{a\eta}(\eta_i^2 - \eta_a^2)} \quad (1.33)$$

kjer je  $A$  ... karakteristična konstanta degradacije

$E_{a\eta}$  ... aktivacijska energija degradacije

$\eta_t, \eta_a$  ... relativna vlaga testiranja, ambienta

### Pospešeno staranje s kombinirano obremenitvijo

Obstojajo tudi bolj komplicirana pospešena staranja, ki so kombinacija različnih degradacijskih efektov. Kot primer navedimo kombinirano pospešeno staranje s povišano temperaturo in vlago. Tako pospešeno staranje, ki se izvaja v posebni posodi (autoklava) s točno določeno povišano temperaturo in relativno vlago, lahko opišemo s kombiniranim akceleracijskim faktorjem po enačbi

$$AF_{T,\eta} = AF_T AF_\eta = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_i}\right) + A E_{a\eta}(\eta_i^2 - \eta_a^2)} \quad (1.34)$$

Smisel nastopajočih parametrov je enak kot v prejšnjih izrazih.

**REFERENCE**

- 1) R.H.Myers, K.L.Wong, H.M.Gordy, "Reliability Engineering for Electronic Systems", John Wiley&Sons, New York, 1964.
- 2) J.Virant, "ZANESLJIVOST", Založba Fakultete za elektrotehniko, Ljubljana, 1978.
- 3) S.M.Sze, "VLSI Technology", McGraw-Hill Book Co., 1983.
- 4) "Components - Assured Quality for the Benefit of the User", SIEMENS, 1987.
- 5) L.Gallace, M.Rosenfield, "Reliability of Plastic-Encapsulated Integrated Circuits in Moisture Environments", RCA Review - Special Issue on Reliability, Vol.45, No.2, Princeton, 1984.
- 6) "Quality Assurance in the Field of Electronics", Proceedings of Symposium ELECTRONICA 86, Muenchen, 1986.