
Elektronske komponente in senzorji

Standardizacija

Uvod

Definicija: Usklajenost z veljavnimi predpisi (standardi)

Prednosti:

- Prinese zagotavljanje in kontrolo kakovosti
- Lažja izmenjava in izbor elementov pri načrtovanju in usklajenost med proizvajalci
- Lažje iskanje elementa (ekvivalenta) v primeru izpada osnovnega produkta.

Vrste standardov - Po področju veljavnosti

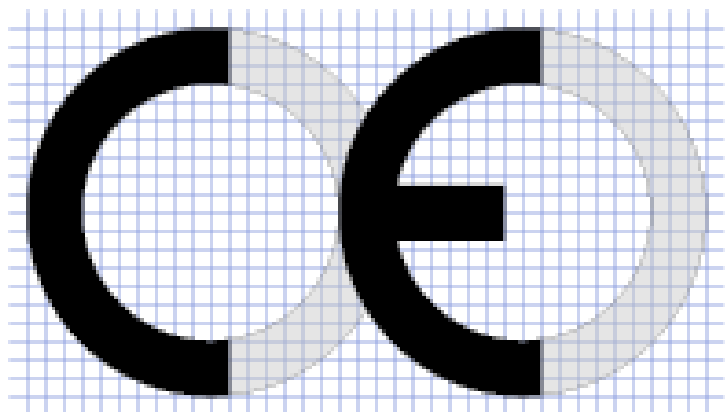
- Nacionalni
 - Nemčija (DIN)
Deutsche Industrie Norm
 - ZDA (MIL STD xxx)
Military standard – industrija je prevzela vojaške standarde
 - Mednarodni (skupnost držav)
 - IEC
(International Electrotechnic Commission)
 - ITU
(International Telecommunication standard)
- Splošna organizacija za standarde ISO
(International Organization for Standardization)

Vrste standardov - po lastnostih

- Standardi na področju kvalitete (vse večje potrebe po kvaliteti in zanesljivosti elementov)
 - Ni samo *končna kontrola električnih lastnosti elementa*
 - Ampak tudi *kontrola celotnega procesa izdelave*
 - Osnova za to je *sledljivost* – vsak produkt je individualno voden, kar omogoča točno analizo problema v primeru variacije proizvodnega procesa. ISO9000 omogoča proizvajalcu kvaliteto, zanesljivost, sledljivost
- Standardi na področju varstva okolja
 - ISO14000: procesi, izdelki
- EMC standardi (Electromagnetic Compatibility)
- RoHS (Restriction of Hazardous Substances) smernica

CE ali "CE" znak

"Conformité Européenne"



"Conformité Européenne"



"China Export"

Conformité Européenne znak mora biti na vseh izdelkih. S tem znakom proizvajalec jamči, da je izdelek skladen z EU normami (zdravje, varstvo okolja).

Komponente, sestavi in senzorji

Zanesljivost

Zanesljivost (ang. reliability)

- Zanesljivost elektronskega elementa ali sistema je verjetnost, da bo deloval v okviru zjamčenih podatkov proizvajalca pod predpisanimi pogoji delovanja preko zjamčenega časovnega obdobja, pri čemer število odpovedi ne presega obljubljenega!
- Je verjetnost preživetja elementa

POGOSTOST ODPOVEDI (Failure Rate, FR)

- FR je razmerje med :
 - število vseh odpovedi in
 - številom prisotnih elementov N
 - časom delovanja t .

$$FR = \frac{\textit{št. odpovedi}}{N \cdot t}$$

Današnji elementi so zelo zanesljivi → FR je majhna, zato je osnovna enota 1 **FIT** (Failure In Time)

$$1 \textit{ FIT} = 10^{-9} \frac{\textit{odpovedi}}{\textit{element h}}$$

Mean Time Between Failures (MTBF)

- Število odpovedi na milijon ur delovanja izdelka
- Je najbolj razširjen podatek o življenjski dobi izdelka
- Je bolj pomemben podatek za industrijo kot za potrošnika
- Zanesljivost **popravljivega** izdelka opišemo običajno z MTBF
- Zanesljivost **nepopravljivega** izdelka opišemo običajno z MTTF (Mean Time **T**o Failure)

Mean Time To Repair (MTTR)

- Čas, potreben za popravilo okvarjenega elementa.
- V delujočem sistemu gre običajno za zamenjavo elementa
- MTTR je zato ponavadi povprečni čas, potreben za zamenjavo elementa
- Če MTTR narašča, to običajno podraži dolgoročno uporabo, zaradi časa nedelovanja (down-time) dokler ne prispe nadomestni del.
- MTTR se uporabniki izognejo tako, da kupijo nadomestne dele na zalogo
- Slednje je povezano s časom amortizacije elementa.

Failure In Time (FIT)

- Je drugačen način podajanja MTBF.
- Podaja število predvidenih odpovedi na 10^9 ur delovanja elementa.
- FIT običajno opisujejo v enotah:
 - 1000 naprav / 10^6 ur
 - ali 10^6 naprav v 1000 urah.
- FIT se običajno podaja z intervalom zaupanja CL (Confidence Limits).

MTBF - Primer

- Enota je delovala 316 ur. Med tem je odpovedala 4x. Določite MTBF enote.
- $MTBF = 79 = 316(h)/(4 \text{ odpovedi})$
- Kakšna je verjetnost, da bo enota delovala 79 ur brez odpovedi? Ali lahko določimo?

Funkcija odpovedi (Failure function $F(t)$)

- Failure oz. **Un**reliability function
- $F(t)$ je verjetnost, da bo element, ki pravilno deluje v času $t = 0$, **odpovedal** do časa t .

Lastnosti $F(t)$:

- $t < 0 \rightarrow F(t) = 0$
(element deluje do $t=0$)
- $0 < t < t' \rightarrow 0 < F(t) < F(t')$
(večji časi - večja verjetnost za odpoved)
- $t \rightarrow \infty \rightarrow F(t) \rightarrow 1$
(za zelo velike čase element zagotovo odpove)

Funkcija zanesljivosti (Reliability function, $R(t)$)

- $R(t)$ je verjetnost, da bo element, ki deluje v $t=0$, **preživel** do časa t
- $R(t)$ je verjetnostno nasprotje $F(t)$:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

Funkcija verjetnostne gostote : $f(t)$

- $f(t)$ podaja verjetnost za **odpoved** (**F**ailure) na časovno enoto.

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

- Z integracijo dobimo obratno zvezo, ki podaja funkcijo odpovedi F kot integral funkcije verjetnostne gostote za odpoved f

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

Povprečni čas do odpovedi MTTF (Mean Time To Failure)

- MTTF je povprečni čas do odpovedi oz.
- MTTF je povprečni življenjski čas elementa

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

Pogostost odpovedi: $FR(t)$ (Failure Rate)

- Je normirano število odpovedi na časovno enoto v trenutku t .
- Drugo ime: $\lambda(t)$.

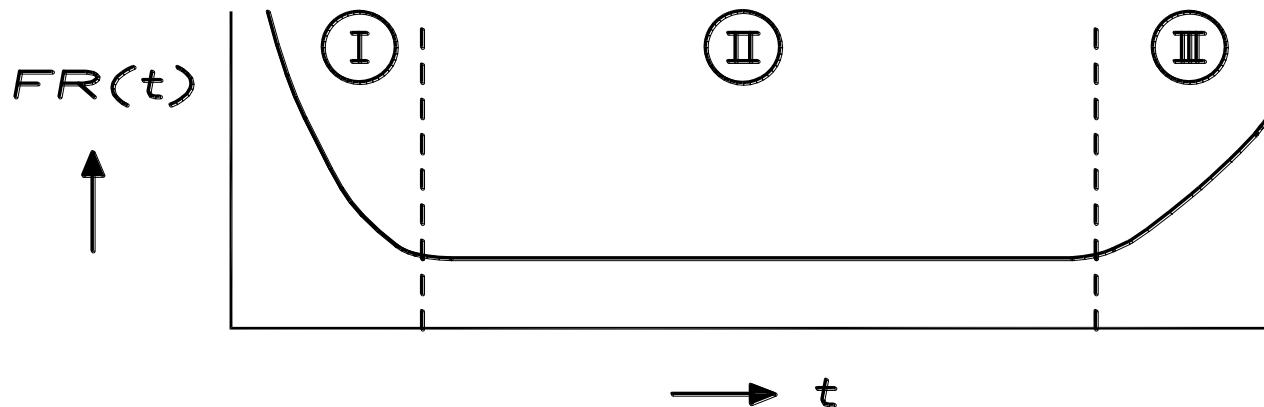
$$\lambda(t) = FR(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}$$

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

$$\lambda(t) = FR(t) = -\frac{d \ln R(t)}{dt}$$

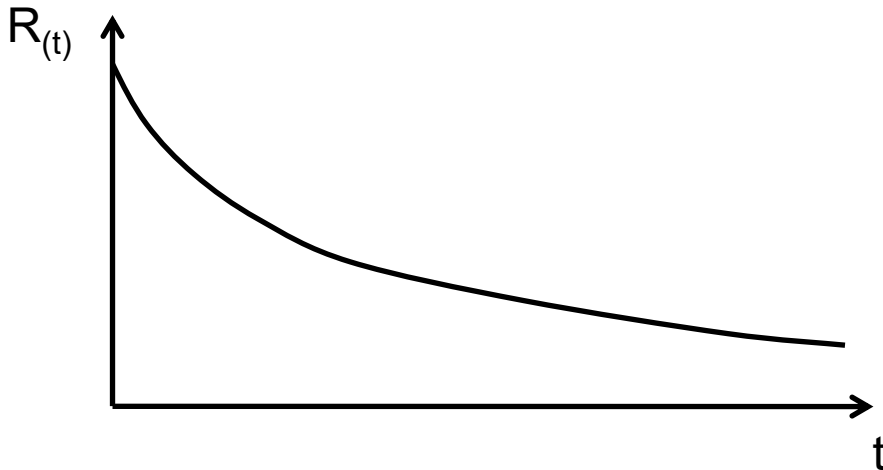
Potek "življenja elementa" (Reliability bathtub curve)

- Zgodnje odpovedi (ang. **Infant mortality**)
grobe napake pri izdelavi (mehanske poškodbe, zamenjava materiala)
- Normalna uporaba (ang. **random-constant failure mode**)
(padec na tla, zalitje z vodo, napetostni sunek)
- Iztrošenost (ang. **wearout period**)
iztrošenost kritičnih materialov (oksidacija žarilne nitke v žarnici, korozija metalizacije v PCB/IC).



Funkcija zanesljivosti (Reliability function, $R(t)$)

- Izbor poteka $R(t)$ je pogojen z lastnostmi mehanizmom odpovedi.
- Običajna oblika $R(t)$, ki jo srečamo v inženirskih problemih je eksponentno padajoča.



Lastnosti $R(t) = 1 - F(t)$:

$t < 0 \rightarrow R(t) = 1$
(element deluje do $t=0$)

$0 < t < t' \rightarrow 0 < R(t) < R(t')$
(večji časi - manjša verjetnost preživetja)

$t \rightarrow \infty \rightarrow R(t) \rightarrow 0$
(enkrat element gotovo odpove $\rightarrow$ zanesljivost = 0)

Eksponentna porazdelitev zanesljivosti

- Eksponentna porazdelitev je primerna, kadar je pogostost odpovedi $FR(t)$ **neodvisna od časa**.
- Uporabna za opis elementov v **področju normalne uporabe** (področje II banje).

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

$$FR(t) = \text{const} = FR_0$$

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

Element	FR_0/FIT	MTTF/let
upor	20	5.800
kondenzator (plastični)	2	58.000
Al elektrolitski kondenzator	2500	46
polprevodniški element, IC	100	1160
spajkani kontakt	1	116000

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

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

Weibullova porazdelitev zanesljivosti

- Weibullova porazdelitev lahko glede na vrednosti konstant α , β . opiše vsa tri področja banje.

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

- | | |
|-------------------------|---|
| $\beta < 1 \rightarrow$ | FR upada s časom;
(zgodnje odpovedi; področje I banje) |
| $\beta > 1 \rightarrow$ | FR raste s časom;
(obdobje iztrošenosti; področje III banje) |
| $\beta = 1 \rightarrow$ | FR se s časom ne spreminja
(normalne uporabe; področje II banje)
enako eksponentni porazdelitvi |

Weibullova porazdelitev zanesljivosti

- Weibullova porazdelitev glede na vrednosti konstant α , β opiše vsa tri področja banje.

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

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta}}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta}}$$

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta}}$$

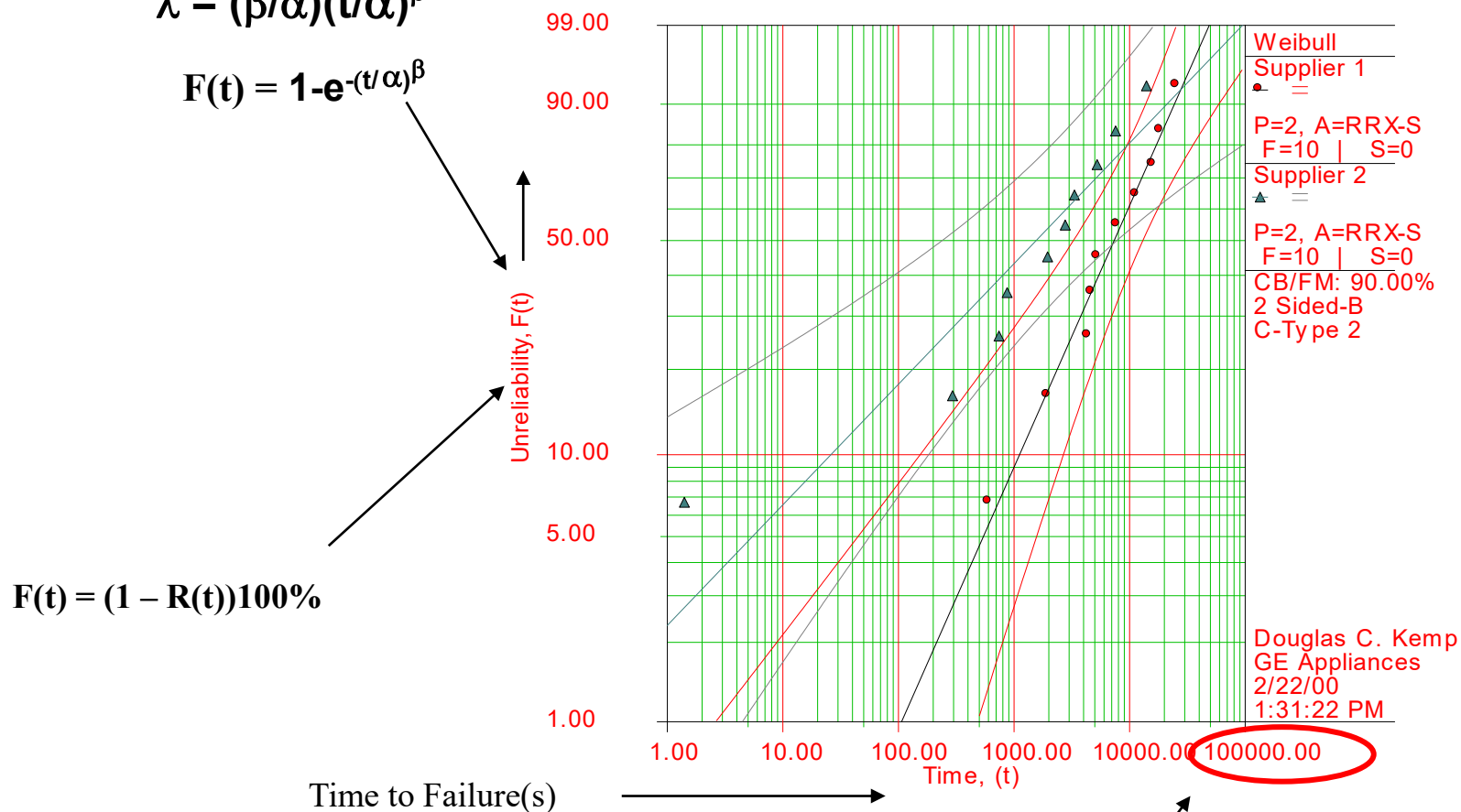
Potek funkcije odpovedi F(t) - Weibull

Generated by: ReliaSoft's Weibull++ 5.0 - www.Weibull.com - 888-886-0410

$$\lambda = (\beta/\alpha)(t/\alpha)^{\beta-1}$$

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\alpha)^\beta}$$

Probability Plot



$$F(t) = (1 - R(t))100\%$$

$\beta_1=1.00, \eta_1=10604.63, \rho=0.99$
 $\beta_2=0.46, \eta_2=3439.41, \rho=0.93$

Ob času t bo odpovedalo 100% populacije

Potek pogostosti odpovedi - Weibull

$$\lambda = (\beta/\alpha)(t/\alpha)^{\beta-1}$$

$$R(t) = e^{-(t/\alpha)^\beta}$$

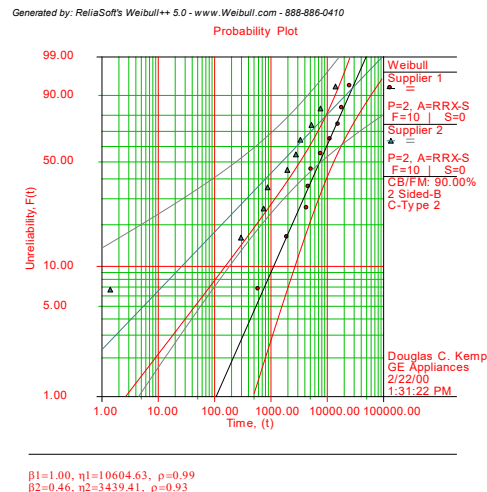
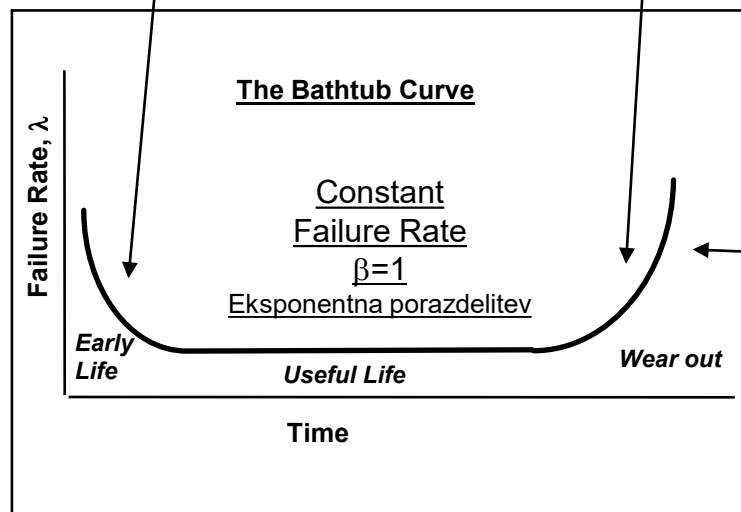
$$F(t) = 1 - e^{-(t/\alpha)^\beta}$$

Padajoča
pogostost odpovedi

$$\beta < 1$$

Naraščajoča
pogostost odpovedi

$$\beta > 1$$



Naklon Weibullove
karakteristike določa, kje točno
na krivulji banje se nahaja
izdelek

Komponente, sestavi in senzorji

Obremenitve
elementov

Vrste obremenitev (stress)

- Okoljska: T, vlaga, tlak, veter, sonce, dež
- Mehanska: Šok, Vibracije, Rotacija, Abrazija
- Električna: ON-OFF cikel, tolerance napetosti, obremenitev, šum
- Elektromagnetna: ESD, E-polje, B-polje, Izgube moči
- Radiacijska: X-žarki (neionizirajoče), Gama žarki (ionizirajoče)
- Biološka: Plesen, Alge, Bakterije, Prah
- Kemične: Alkohol, Ph

Faktorji obremenitve (stress factor)

- Na pogostost odpovedi λ lahko vpliva več faktorjev obremenitve oz. obremenitev (π):
- Splošno uporabljeni faktorji obremenitve
 - π_T = Temperaturni
 - π_V = Električni faktor obremenitve
 - π_E = Okoljski faktor obremenitve
 - π_Q = Faktor obremenitve kvalitete
- Pogostost odpovedi

$$\square \lambda = \lambda_B * \pi_T * \pi_V * \pi_E * \pi_Q$$

λ_B = osnovna pogostost odpovedi komponente

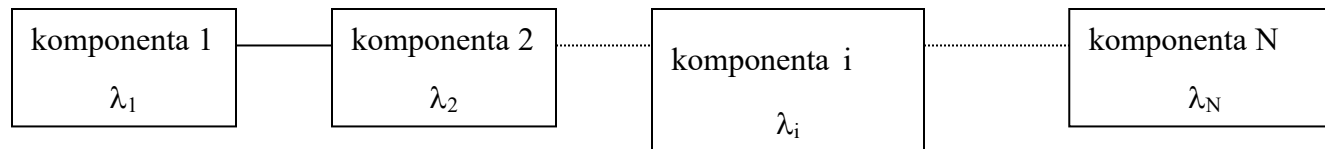
Standardi s področja zanesljivosti

- MIL-HDBK-217F
 - Izračun zanesljivosti elementa v obdobju zgodnjega cikla razvoja
 - Izračun zanesljivosti elementa v obdobju pozne cikla razvoja
- Bellcore (TR-TSY-000332):
 - Razvit v Bell Communications Research za splošno uporabo v elektronski industriji (in posebej za telekomunikacije)
 - Najvišji faktor obremenitve ima električna obremenitev
 - Podatki na osnovi testiranja delovanja v lab. in realnem okolju, analize, podatkovnih listov in standarda US MIL Std 217
 - Faktorji obremenitve: okoljski, kvaliteta, električni, termični

Standardi s področja zanesljivosti

- HRD4 (Hdbk of Reliability Data for Comp, Issue 4):
 - Razvit za telekomunikacije (British Telecom Materials and Components Center)
 - Vključuje faktorje obremenitve termična, električna, okoljska, obremenitev kvalitete
 - Standard describes generic failure rates based upon a 60% confidence interval around data collected via telecom equipment field performance in the UK
- CNET:
 - Razvit za telekomunikacije (Francoski nacionalni center za komunikacije)
 - Podoben HRD4, vključuje faktorje obremenitve termična, električna, okoljska, obremenitev kvalitete je prevladujoča

Zaporedna metoda izračuna zanesljivosti elektronskega sistema



Problemi

- Komponente nimajo nujno konstantne pogostosti odpovedi λ

$$\lambda_{ss} = \sum \lambda_i$$

- Metoda ne opisuje dobro uporabe komponent in obremenitev
- Če ena komponenta odpove, ne odpove nujno vse vezje
 - Primer: Blokirni kondenzator odpove kot odprte sponke

Standardne pogostosti odpovedi v FIT

Component Type	Method A - λ	Method B - λ	Method C - λ	Method D - λ	Method E - λ
BJT/FET	5.0	3.8	3.2	7.6	4.0
Switch	5.0	44.0	30.0	1.0	20.0
Metal Film Res	0.7	2.5	0.05	0.05	0.2
Carbon Res	18.2	2.7	1.0	1.1	2.6
Varistor, tc Res	6.0	1.0	10.0	1.0	10.0
Electrolytic Cap	210	22.0	120	16.0	120
Polyester Cap	8.5	2.0	3.0	0.5	7.0
Tantalum Cap	15.0	7.0	8.0	4.0	10.0
Ceramic Cap	2.0	1.0	0.5	0.25	1.2
Si PN, Schottky, PIN Diode	2.4	1.6	3.6	1.6	2.4
Zener Diode	3.2	13.6	17.4	18.8	70.0
LED	9.0	15.0	280	65.0	1.0
BJT Dig IC <100 Gates	20.0	138	2.3	1.0	6.7
BJT Dig IC < 1000 Gates	30.0	150	4.0	1.5	10.0
MOS Dig IC < 1000 Gates	27.3	301	9.0	1.0	13.3
MOS Dig IC => 1000 Gates	55.0	550	16.0	2.2	31.0
EM Coil Relay	385	302	220	715	44.0
SSR, Optocoupler	120	105	47.0	190	12.0
BJT Linear IC < 1000 Transistors	14.0	27.0	4.3	1.0	50.0
MOS Linear IC < 1000 Transistors	19.0	54.0	9.0	1.0	13.3
Transformer < 1VA	33.0	90.0	70.0	60.0	50.0
Transformer > 1VA	3.0	9.0	7.0	6.0	5.0

Standardne pogostosti odpovedi v FIT

Component Type	Method A - λ	Method B - λ	Method C - λ	Method D - λ	Method E - λ
Plastic Shell Connector, Plug, Jack	100.0	55.0	150.0	120.0	105.0
Metal Shell Connector, Plug, Jack	33.0	18.0	57.0	40.0	35.0
Pb, NCd, Li, Lio, NmH Battery	7.0	1.0	50.0	8.0	22.0
Quartz Crystal Thru Hole	115.0	113.8	113.2	117.6	114.0
Quartz Crystal SMT	15.0	34.0	30.0	51.0	20.0
Quartz Oscillator Module CMOS	10.0	12.5	10.5	20.0	15.0
Diode Bridge	4.8	1.6	3.6	1.6	2.4
LED Display	19.0	115.0	280	165.0	21.0
LCD Display	119.0	215.0	380	1165.0	206.0
BJT Linear IC > 1000 Transistors	114.0	217.0	41.3	91.0	150.0
MOS Linear IC > 1000 Transistors	29.0	74.0	19.0	21.0	113.3

Standardni faktorji obremenitve

- Definicije faktorjev obremenitve

- π_T = Temperature Stress Factor = $e^{[T_a/(T_r-T_a)]} - 0.4$

- T_a = največja dovoljena temperatura delovanja,

- T_r = največja nazivna temperatura delovanja, $T_r > T_a$

- π_V = C/R/T električni faktor obremenitve =

- $\pi_V = e^{[(V_a)/(V_r-V_a)]-2.0}$

- V_a = največja dovoljena napetost delovanja

- V_r = največja nazivna napetost delovanja, $V_r > V_a$

- π_E = Okoljski faktor obremenitve

- Indoor Stationary = 1.0

- Indoor Mobile = 2.5

- Outdoor Stationary = 3.0

- Outdoor Mobile = 5.0

- Automotive = 7.0

- π_Q = Quality Factor (dobavitelji komponent in sestavljanje)

- Vojaške specifikacije MIL komponent = 0.75

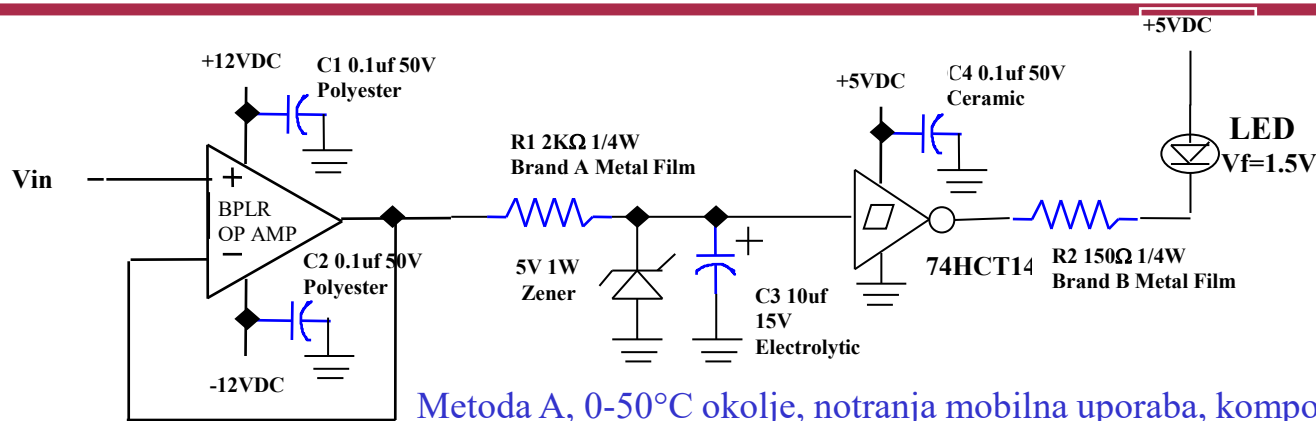
- 100 ur "Burn In" cikel = 0.75

- Komercialne komponente od proizvajalca = 1.0

- Komercialne komponente od distributerja = 1.25

- Ročno sestavljene komponente = 3.0

Standardni faktorji obremenitve



Komponenta	Max Tr	Max Vr	π_T	π_V	π_E	π_Q	λ_{FITS}
C1	105C	50V	2.082	0.186	2.5	1.25	10.29
C2	105C	50V	2.082	0.186	2.5	1.25	10.29
C3	85C	15V	3.773	0.223	2.5	1.25	552.2
C4	125C	50V	1.548	0.151	2.5	1.25	1.46
R1	120C	20V	1.643	0.232	2.5	1.25	0.83
R2	150C	6V	1.249	0.549	2.5	1.25	1.50
Zener Diode	100C	N/A	2.318	1.0	2.5	1.25	23.18
Op Amp	125C	36V	1.548	1.0	2.5	1.25	67.73
74HCT14	125C	7V	1.548	1.649	2.5	1.25	217.77
LED	85C	N/A	3.773	1.0	2.5	1.25	106.16

991.37 Fits → 115.1 Vrs MTBF

Standardni faktorji obremenitve

- Upori, potenciometri $\leq 50\%$ max. moči
- Kondenzatorji/Upori $\leq 60\%$ max. delovne napetosti
- Tranzistorji $\leq 50\%$ max. delovne napetosti
- Večina komponent in vezij ima temperaturno odvisne parametre, ki jih zajema TC (temperaturni koeficient)

Komponente, sestavi in senzorji

Staranje

Staranje

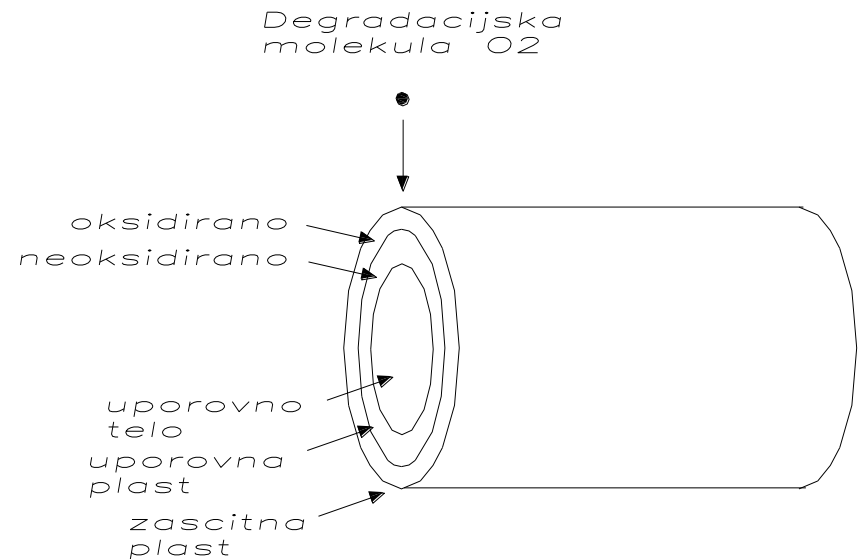
- Počasno spreminjanje strukture elementa, zaradi degradacijskih procesov, med dolgoletnim delovanjem.

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:
 - kemijske reakcije zaradi prisotnih agresivnih snovi (korozija metalizacijske linije v PCB/IC)
 - mehanske razpoke v strukturi zaradi temperaturnih šokov pri segrevanju in ohlajanju elementa

Degradacija CF upora - difuzija

- Molekule O_2 iz okolice zaradi povišane temperature v obremenjenem uporu tekom let počasi **difundirajo** v globino strukture.
- Molekula O_2 prodre do uporovne plasti,
- Plast oksidira → uporovni material se spremeni v izolator.
- Znan tak primer je degradacija CF upora, kjer pri oksidaciji uporovne plasti nastaja CO_2 :



Degradacija CF upora

- Uporovna plast se med dolgoletnim procesom staranja stalno tanjša
- Upornost upora $R(t)$ s časom stalno raste.
- Tako spremembo upornosti imenujemo **degradacija upora** ΔR .
- Ko $R(t)$ preseže od proizvajalca predpisano maksimalno dopustno vrednost upornosti $R_{\max}$ ga je potrebno zamenjati z novim.
- To je **odpoved** elementa

$$R(t) \geq \Delta R_{\max} = R_{\max} - R_0$$

Temperaturna in časovna odvisnost degradacije

- Degradirano področje je določeno, s povprečno globino difuzijskega vdora L degradacijske molekule (O_2) v strukturo elementa.
- Pri difuziji je povprečna globina vdora L podana z enačbo

$$L = \sqrt{Dt}$$

- $t \rightarrow$ čas degradacijskega procesa [leta]
- $D \rightarrow$ difuzijska konstanta molekule O_2 v CF uporu

Difuzija

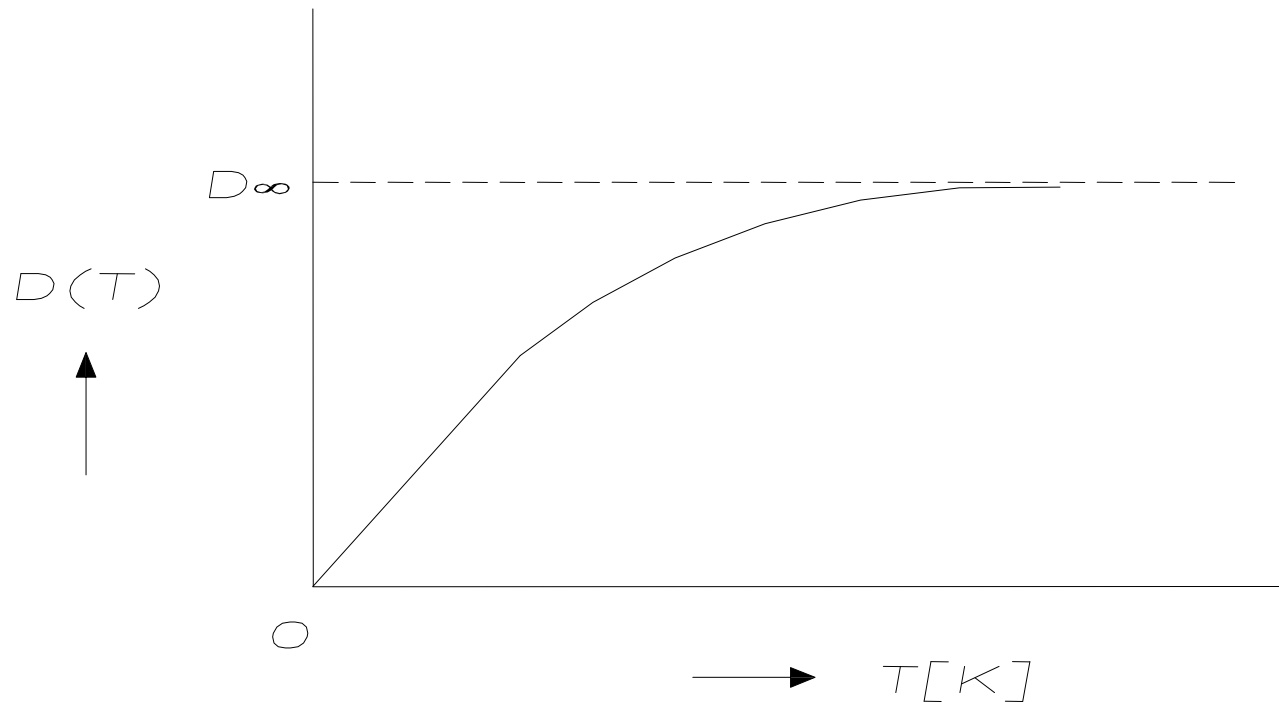
- Difuzija je izmenjevalno preskakovanje atomov po kristalni rešetki zaradi termičnega gibanja atomov
- Difuzijska konstanta raste s temperaturo, kot opisuje **Arrheniusova temperaturna odvisnost**

$$D = D_{\infty} \cdot e^{-\frac{E_{aD}}{kT}}$$

- D_{∞} → limitna vrednost D za visoke temperature
- E_{aD} → aktivacijska energija difuzijskega procesa $E_{aD} \approx 1 \dots 2$ eV
- k → Boltzmannova konstanta $k = 8.6 \cdot 10^{-5}$ eV/K
- T → absolutna temperatura [K]

Difuzija

$$D = D_{\infty} \cdot e^{-\frac{E_{aD}}{kT}}$$



Degradacija CF upora

$$L = \sqrt{Dt} = \sqrt{D_{\infty} \cdot e^{-\frac{E_{aD}}{kT}} \cdot t} \quad R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

$$\Delta R(T, t) \propto \sqrt{D_{\infty} \cdot e^{-\frac{E_{aD}}{k \cdot T}} \cdot t} \propto D_{\infty} \cdot e^{-\frac{E_{aD}}{2 \cdot k \cdot T}} \cdot \sqrt{t}$$

- $D_{\infty} \rightarrow$ limitna vrednost D za visoke temperature
- $E_a = E_{aD}/2 \rightarrow$ aktivacijska energija $E_a \approx 0.5 \dots 1\text{eV}$
- $k \rightarrow$ Boltzmannova konstanta $k = 8.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$
- $T \rightarrow$ absolutna temperatura [K]

Pospešeno staranje in testiranje

- Staranje lahko pospešimo z intenziviranjem različnih parametrov, ki pospešujejo degradacijske procese
- Proces intenziviranja takega parametra imenujemo **obremenitev** (stress), posledico tega imenujemo **pospešeno staranje**

Uporaba pospešenega staranja

- S pospešenim staranjem povzročijo visoko odpoved v tovarni.
- Tisti, ki preživijo, so preživeli obdobje otroške umrljivosti
- Slabi elementi odpovedo že v tovarni in jih izločijo, na tržišče pridejo dobri elementi z višjo zanesljivostjo.
- Pospešeno staranje se uporablja za:
 - določitev življenjskih časov elementov (MTTF, FIT)
 - določitev **aktivacijske energije** (E_a) degradacije

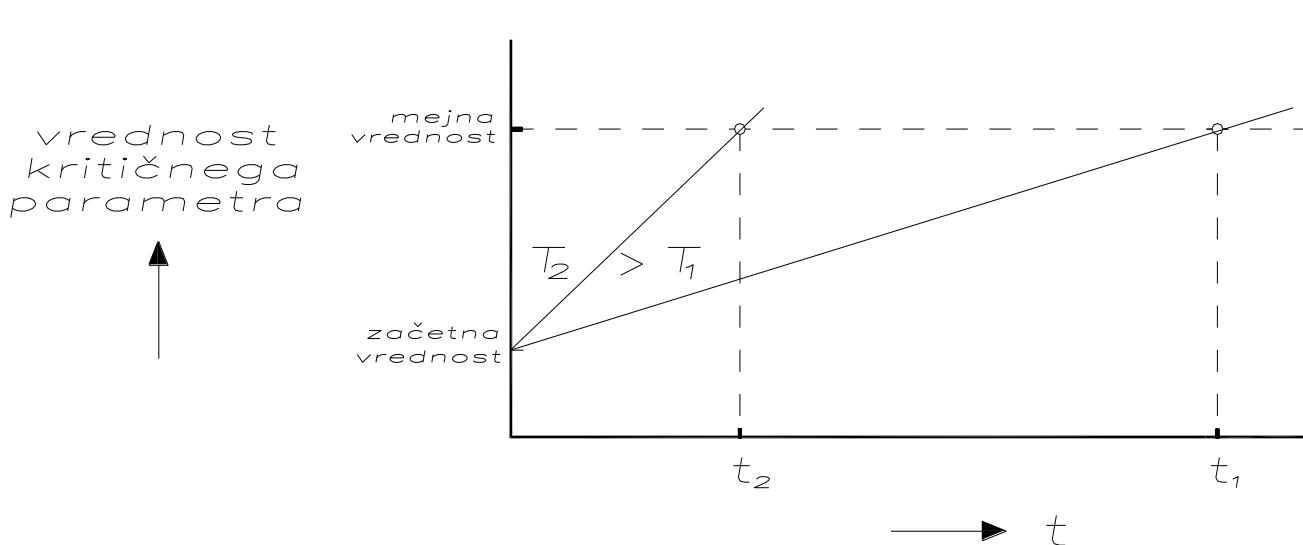
Pospešeno staranje s povišano temperaturo

- Hitrost degradacije je določena s hitrostjo degradacijske reakcije (Reaction Rate, RR)
- Pri degradaciji CF upora → hitrost oksidacije uporovne plasti
- RR je pri oksidaciji uporovne lasti določena z globino vdora L in časom
- Zato ima RR običajno enako temperaturno odvisnost kot L:

$$RR(T) = RR_{\infty} \cdot e^{-\frac{E_{aD}}{kT}}$$

Pospešeno staranje CF upora

- Meritev $R(t)$ pri različnih temperaturah:.
- Dobimo rezultat meritve pri temperaturah ($T_2 > T_1$)
- Zaradi degradacije $R(t)$ raste $\rightarrow$ element odpove, $R(t) = R_{\max}$.
- Če dvignemo temperaturo meritve $T_2 > T_1$ potekajo degradacijske reakcije hitreje in degradacija narašča bolj strmo
- Hitrejša odpoved elementa pri višjih temperaturah ($t_{\text{odp}2} < t_{\text{odp}1}$) oz. pospešeno staranje elementa
- Večja, ko je hitrost reakcije RR pri temperaturi T krajši je čas do odpovedi pri tej temperaturi $t_{\text{odp}}(T)$



$$RR(T) = RR_{\infty} \cdot e^{-\frac{E_{aD}}{kT}}$$

$$\frac{t_{\text{odp}1}}{t_{\text{odp}2}} = \frac{RR_2}{RR_1} = e^{\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$$

Pospešitveni faktor (acceleration factor AF_x)

- Pospešitveni faktor zaradi povišane temperature AF_T je razmerje RR pri temperaturah ($T_2 > T_1$)
- Za kolikokrat pospešimo degradacijski proces, če dvignemo temperaturo iz T_1 na T_2

Pospešitveni faktor AF_T - primer

- Določi pospešitveni faktor AF_T pri pospešenem staranju s podatki:
- $E_a = 1 \text{ eV}$, $T_1 = 50^\circ\text{C}$
- Temperatura pospešenega staranja $T_2 = 125^\circ\text{C}$!

$$T_2 = 398\text{K}, T_1 = 323\text{K}$$

$$AF_T = \frac{t_{odp1}}{t_{odp2}} = \frac{RR_2}{RR_1} = e^{\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \approx 300$$

Pospešitveni faktor AF_T

Kakšen je AFT, če je element 40 let (350.000 ur) na $T_1=60^\circ\text{C}$ za različne povišane temperature T_2

$T_2[^\circ\text{C}]$	AF_T	Ekv. čas (40 let@ T_1)	$E_a=1\text{ eV}$ $T_1=60^\circ\text{C}$
60	1	40 let = 350 400 h	
85	11.5	30 000 h	
125	300	1200 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	

Določanje FIT/MTTF in E_a

- Življenjski čas je povprečni čas, ki ga element ali sistem preživi od začetka svojega delovanja do odpovedi.
- Eksperimentalno ugotavljanje pri sobni temperaturi trajalo predolgo MTTF , saj tipične življenjske dobe 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

Določanje MTTF - primer

- Element uporabljamo na 125°C
- Element ima eksponentni potek funkcije zanesljivosti ($R(t)=\exp(-\lambda t)$)
- $MTTF \approx 4500$ ur.
- Normalna uporaba komponente je pri sobni temperaturi ($T \approx 25^\circ\text{C}$)
- Kakšna je funkcija odpovedi (FR)?
- Koliko % elementov bo odpovedalo pred predvidenim življenjskim časom (40000 ur), če je $AF_T \approx 35$ za podani temperaturi?

$$MTTF(T = 125^\circ\text{C}) = 4500h$$

$$MTTF(T = 25^\circ\text{C}) = 4500h \cdot 35 = 157500h$$

$$AF_T = e^{\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} \approx 35$$

$$FR = \lambda = \frac{1}{MTTF(25^\circ\text{C})} = \frac{1}{157500h}$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t}$$

$$F(40000h) = 1 - R(40000h) = \left(1 - e^{-\lambda \cdot 40000h}\right) \cdot 100\% = 22.43\%$$

Pospešeno staranje s povišano napetostjo

- Hitrost reakcije degradacijskih procesov narašča zaradi lokalnega Jouleovega segrevanja, elektromigracije materialov itd.
- Hitrost degradacije raste z napetostjo:

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

- $K_V(T)$ → konstanta degradacije z Arrheniusovo temperaturno odvisnostjo
- $g(T)$ → potenca napetostne degradacije, odvisna od temperature ($g(T) \approx 1 \dots 5$)

AF_V

- Akceleracijski faktor za staranje s povišano napetostjo ($V_2 > V_1$):

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

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

Pospešeno staranje s povišanim tokom

- Posledica obremenitve s povišanim tokom so lokalna Joulova segrevanja, elektromigracije materiala → pospešena degradacija
- Hitrost degradacije raste tokom J :

$$RR(T, J) = K_J(T) J^{h(T)} \quad AF_J = \frac{t_1(J_1)}{t_2(J_2)} = \left(\frac{J_2}{J_1}\right)^h$$

- $h \rightarrow (h \approx 1 \dots 4) \quad (J_2 > J_1)$

Pospešeno staranje s povišano vlago (η)

- Pospešen vdor majhnih molekul vode v strukturo elementa, kjer povzročijo degradacijo.
- Pri tem voda prinese iz okolice ali pa izpira (leaching) iz materiala ohišja agresivne nečistoče → dodatna degradacija

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

- A → konstanta degradacije
- $E_{a\eta}$ → aktivacijska energija degradacije
- η_t, η_a → relativna vlaga testiranja, ambienta

Pospešeno staranje s kombinirano obremenitvijo

- Kombinacija različnih degradacijskih efektov
→ kombinirano pospešeno staranje s povišano temperaturo in vlago.
- Tako pospešeno staranje se izvaja v avtoklavu s povišano temperaturo in relativno vlago

$$AF_{T,\eta} = AF_T \cdot AF_\eta$$