

# POUZDANOST ELEKTRONSKIH UREĐAJA

Goran Kostić, konstruktor, DP Elu

Ključne reči: 1. pouzdanost (reliability), 2. teorija (theory), 3. proizvod (product), 4. učestanost otkaza (failure rate), F, 5. prosečno vreme između otkaza (mean time between failures), M, 6. verovatnoća ispravnosti (probability of survival), P, 7. proizvod-sistem (product-system), 8. elektronska komponenta (electronic device), 9. elektronski uređaj (electronic equipment).

Svrha ovog članka je da omogući izračunavanje pouzdanosti elektronskih uređaja. Izračunata pouzdanost može se koristiti, pri konstruisanju, kako bi se postigla što veća pouzdanost uređaja, ili pri planiranju službe održavanja uređaja.

U prvom odeljku ovog članka, sa naslovom "teorija pouzdanosti proizvoda", u obliku jednog (ne previše strogog) sistema tvrđenja, određeni su pojmovi i navedeni zaključci koji se koriste u drugom odeljku.

U drugom odeljku, sa naslovom "pouzdanost elektronskih komponenata i uređaja", dati su podaci potrebni za izračunavanje pouzdanosti primenom prethodno izložene teorije.

## 1. Teorija pouzdanosti proizvoda

### 1.1. Učestanost otkaza

Nesigurnost obavljanja funkcije jednog proizvoda, opisuje se njegovim prosečnim brojem otkaza u određenom vremenskom intervalu. Ovaj broj naziva se **učestanost otkaza**.

Učestanost otkaza proizvoda može se odrediti opterećivanjem (ili puštanjem u rad) dovoljno velikog broja N, proizvoda posmatranog tipa. Proizvodi moraju da budu opterećeni u toku dovoljno dugačkog vremenskog intervala t, tako da se na kraju ovog intervala dobije ne suviše mali broj n, otkazalih proizvoda. Učestanost otkaza F, naziva se broj dobiven prema sledećoj jednačini:

$$F = \frac{n}{N \cdot t}$$

Zbog zavisnosti učestanosti otkaza od opterećenja, u toku posmatranja opterećenje svakog od proizvoda mora da bude skoro isto i nepromenljivo. Pri navođenju učestanosti otkaza, navodi se i opterećenje za koje ona važi.

Za dobijanje upotrebljivog podatka o učestanosti otkaza za prihvatljivo vreme i prihvatljivu količinu proizvoda, izvestan broj uzoraka, koji predstavljaju tip proizvoda koji se ispituje, opterećuju se više nego što je normalno. Najčešće se proizvodi-uzorci opterećuju visokom temperaturom, pa se pod takvim uslovima određuje njihova učestanost otkaza.

Zatim se za normalne radne temperature vrši predviđanje učestanosti otkaza na osnovu učestanosti otkaza na povišenim temperaturama. Eksperimentalno potvrđen model za predviđanje učestanosti otkaza je Arenijusov (Arrhenius) model. Model omogućava predviđanje učestanosti otkaza proizvoda pri normalnim temperaturama, na osnovu testa obavljenog pri temperaturama višim od normalnih.

Ako upotrebimo naredne oznake,

$F_1$ , učestanost otkaza u  $s^{-1}$ , pri temperaturi  $T_1$ ;

$F_2$ , učestanost otkaza u  $s^{-1}$ , pri temperaturi  $T_2$ ;

$T_1, T_2$ , temperature u K ( $T[K] = t[°C] + 273,15$ );

E, termička aktivaciona energija u J;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K, Bolcmanova (Boltzmann) konstanta,

jednačina koja opisuje Arenijusov model je:

$$F_1 = F_2 \cdot e^{-\frac{E}{k} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$$

(\*)

Aktivaciona energija, E, za određenu familiju proizvoda, može se izračunati prema narednoj jednačini, izvedenoj iz prethodne, kada se za dve različite temperature znaju dve odgovarajuće učestanosti otkaza:

$$E = \frac{k \cdot T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{F_2}{F_1} . \quad (**)$$

## 1.2. Prosečno vreme između otkaza

Na osnovu definicije za učestanost otkaza, proizvoda čija je učestanost otkaza F, zaključujemo da je **prosečno vreme između dva uzastopna otkaza proizvoda**, M, dato jednačinom:

$$M = \frac{1}{F} .$$

## 1.3. Verovatnoća ispravnosti proizvoda

Učestanost otkaza, i prosečno vreme između otkaza, ne daju podatak o tome kako će se, od određenog *početnog* trenutka, dešavati otkazi. Dešavanje otkaza u toku vremena opisuje se funkcijom koja daje vezu između verovatnoće ispravnosti proizvoda i vremena.

Količnik broja proizvoda koji funkcioniše u trenutku t, N(t), i broja proizvoda koji su funkcionisali u početnom trenutku, N(t = 0), naziva se **verovatnoća ispravnosti proizvoda** P(t), u trenutku t, tj.:

$$P(t) = \frac{N(t)}{N(t = 0)} .$$

Pri određivanju P(t) posmatra se dovoljno veliki broj proizvoda istog tipa, od kojih svaki funkcioniše u skoro istim uslovima.

(Definicija verovatnoće ispravnosti proizvoda, analogna je definiciji matematičke verovatnoće, pod uslovom da je N(t = 0) vrlo veliko.)

Vidimo da najveću moguću verovatnoću ispravnosti proizvoda u trenutku t, predstavlja P(t) = 1.

Na osnovu prethodno date definicije zaključujemo sledeće. Ako znamo verovatnoću ispravnosti proizvoda P(t), narednom jednačinom možemo izračunati *prosečan* broj proizvoda, N(t), koji će funkcionisati u trenutku t, ako je u početnom trenutku funkcionisalo N(t = 0) proizvoda:

$$N(t) = P(t) \cdot N(t = 0) .$$

## 1.4. Verovatnoća ispravnosti proizvoda-sistema

Proizvod koji analiziramo kao da je napravljen od drugih proizvoda, zvaćemo **prizvod-sistem**.

Ako se znaju verovatnoće ispravnosti proizvoda koji su elementi jednog proizvoda-sistema, može se odrediti i verovatnoća ispravnosti posmatranog proizvoda-sistema. To proširuje primenu prethodno izložene teorije i na proizvode-sisteme.

Ako je proizvod-sistem, takav da otkazuje pri otkazivanju bilo kojeg proizvoda-elementa unutar njega, i ako su proizvodi-elementi u vezi koja je takva da ne menja verovatnoće ispravnosti proizvoda-elementa; može se pokazati da je verovatnoća ispravnosti proizvoda-sistema, P(t), jednaka umnošku verovatnoća ispravnosti njegovih n proizvoda-elementa, P<sub>i</sub>(t), i = 1, 2, ..., n; tj.:

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) .$$

## 2. Pouzdanost elektronskih komponenata i uređaja

Ovde će biti navedene karakteristike elektronskih komponenata i uređaja, potrebne za primenu prethodno izložene teorije o pouzdanosti.

### 2.1. Razne napomene u vezi učestanosti otkaza

Za primenu Arenijusovog modela za izračunavanje učestanosti otkaza pri jednoj temperaturi, kada se zna učestanost otkaza pri nekoj drugoj temperaturi, potrebno je znati veličinu aktivacione energije.

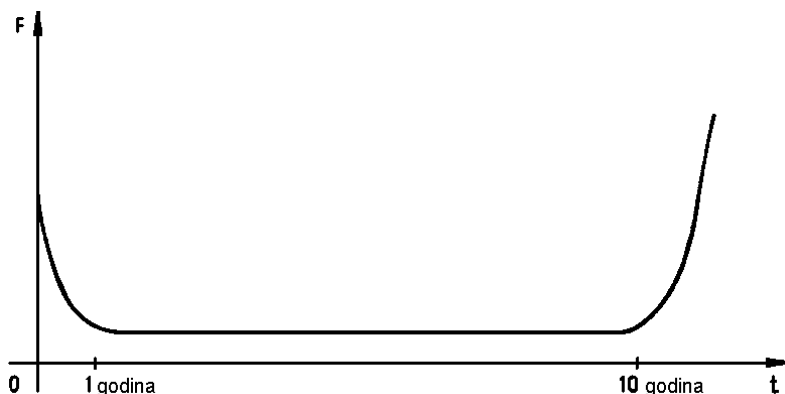
Aktivaciona energija za elektronske komponente zavisi od vrste komponente i proizvođača odnosno tehnološke varijante, i u granicama je od 0 do  $2 \cdot 10^{-19}$  J.

Prosečan vremenski interval između otkaza elektronskih komponenata, predstavlja u stvari njihov *prosečan život*.

Na primer, na osnovu Arenijusovog modela zaključujemo da se prosečan život integrisanih kola smanjuje u proseku približno 2 puta za svakih  $10^\circ\text{C}$  povećanja temperature spoja.

Odnos između učestanosti otkaza i vremena rada, kod elektronskih proizvoda, prikazan je dijagramom na slici 1. Smatra se da je u početnom periodu rada, učestanost otkaza velika zbog kontaminacije materijala, grešaka pri montiranju i sličnih uzroka. U periodu stalne učestanosti otkaza, otkazi su posledica uzroka koji su slučajni i za koje ne postoji mogućnost kontrolisanja. U trećem periodu otkazi su posledica neizbežnog starenja i trošenja.

(Pored elektronskih proizvoda, i skoro sve ostalo što je izradio čovek, pokazuje zavisnost datu dijagramom na slici 1.)



Sl. 1. Tipičan odnos između učestanosti otkaza F, i vremena rada t, elektronskih komponenata ili uređaja.

Potrebno je da krajnji korisnici ne iskuse početni period rada proizvoda, jer su tada otkazi učestaliji nego u srednjem periodu. Iskustvo krajnjih korisnika sa početnim periodom povećane učestanosti otkaza, dovodi do ogorčenja i razočaranja korisnika, do troškova zbog servisiranja i loše reputacije proizvođača.

Dakle, potrebno je da početni period rada proizvoda protekne kod proizvođača. To se ostvaruje tako što se proizvodi ubrzano veštački stare držanjem na povišenoj temperaturi. Može se reći da se povišenom temperaturom iniciraju potencijalni otkazi komponenata odnosno uređaja.

Eksperimentalni podaci pokazuju da oko 170 časova na  $125^\circ\text{C}$  predstavljaju tri meseca normalnog rada komponente (podaci se odnose na komponente koje imaju malo sličnosti sa savremenim komponentama). Iz tih razloga se, poluprovodničke komponente odvojene od drugih elemenata, pri veštačkom starenju zagrevaju tako da im temperatura spoja bude  $125^\circ\text{C}$  i na toj se temperaturi drže oko 170 časova. Zbog efikasnijeg "starenja" poželjno je da pri povišenoj temperaturi komponente budu izložene i električnim naprezanjima sličnim onima pri normalnom radu. Razlog tome je što se ne pojavljuju svi otkazi u uslovima bez električnog naprezanja.

Eksperimenti pokazuju da pri zagrevanju na 125 °C, u prvih 24 časova dolazi do više od 80 % svih otkaza sličnih onima iz početnog perioda rada. I takođe, da se za svakih 10 °C povećanja temperature, vreme zagrevanja može skratiti za polovinu.

Zagrevanje štampanih kola sa zalemljenim komponentama, ograničeno je na 70 °C. Zbog toga je tada potrebno vršiti dugotrajnije zagrevanje za postizanje odgovarajućih učinaka.

Pored dugotrajnog zagrevanja, završena štampana kola se mogu izlagati i promenama temperature (npr. od - 5 °C do 55 °C u nekoliko ciklusa), kao i mehaničkim vibracijama različitih frekvencija. Od ovog opterećenja otkazuju loši spojevi unutar uređaja i provodnici koji trpe mehanička opterećenja.

## 2.2. Prosečna učestanost otkaza komponentata

U tabeli 1 date su učestanosti otkaza komponentata pri njihovom *normalnom* korišćenju i za period kada je *učestanost otkaza konstantna* (srednji deo dijagrama sa slike 1). Podaci su "istorijski", najnepovoljniji, i ne uzimaju u obzir stalni tehnološki napredak u proizvodnji komponentata. Za poluprovodničke komponente se u tabeli 1, pod temperaturom okoline podrazumeva temperatura spoja.

Podaci u tabeli 1 su prema "MIL Handbook 217D".

## 2.3. Pouzdanost elektronskih komponentata

Neki proizvodi u određenim uslovima otkazuju tako da u istim intervalima vremena, oko bilo kog trenutka, *otkazuje isti deo (procenat)* količine neotkazalih proizvoda. Takvo otkazivanje nazivamo otkazivanje sa **eksponencijalnom raspodelom**. (Ili, što je isto sa prethodnim, da je život proizvoda određen gustinom:

$$D(t) = \begin{cases} F \cdot e^{-F \cdot t}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$$

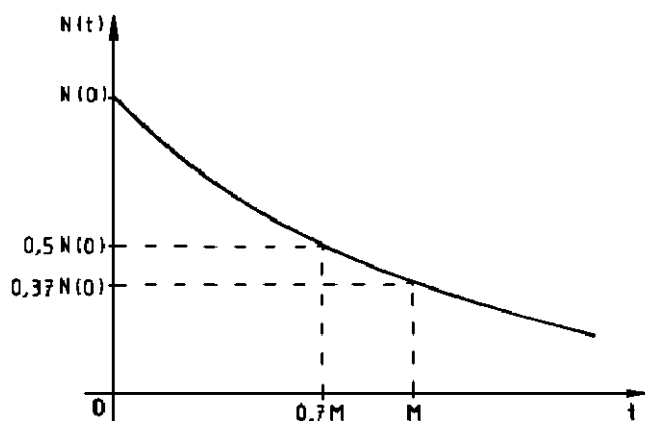
za koju se kaže da ima eksponencijalnu raspodelu. Ili što je isto sa prethodnim, da broj *otkazalih proizvoda ima Poasonovu (Poisson) raspodelu*).

Za interval vremena u kome se učestanost otkaza može smatrati konstantnom (srednji deo dijagrama na slici 1), utvrđeno je sledeće. Poluprovodničke komponente imaju eksponencijalnu raspodelu otkaza u toku vremena kada normalno rade. Intervali vremena kada su isključene, pri razmatranju se sažimaju u nulu. Na osnovu toga se može pokazati da je, za trenutak  $t$ , verovatnoća ispravnosti,  $P(t)$ , poluprovodničke komponente koja ima učestanost otkaza  $F$ , data sa:

$$P(t) = e^{-F \cdot t},$$

videti sliku 2.

To znači da za komponente sa eksponencijalnom raspodelom otkaza, u intervalu kada je učestanost otkaza konstantna, bilo koji trenutak vremena može da se uzme za početni, naravno uz za taj trenutak odgovarajući broj ispravnih komponentata  $N(t = 0)$ . Dakle, komponente su "kao nove" do "udara" od koga otkazuju.



Sl. 2. Dijagram zavisnosti od vremena, broja elektronskih proizvoda,  $N(t)$ , koji nisu otkazali do trenutka  $t$ . (Za interval konstantne učestanosti otkazivanja).

$$(M = \frac{1}{F})$$

**Tabela 1. Učestanosti otkaza komponenata**

vrsta komponente	uslovi rada izraženi u % nominalne veličine od značaja	učestanost otkaza F [ $10^{-12} \text{ s}^{-1}$ ] pri različitim temperaturama okoline				aktivaciona energija na oko 50 °C E [ $10^{-20} \text{ J}$ ]
		25 °C	50 °C	75 °C	100 °C	
aluminijumski kondenzator, < 1500 $\mu\text{F}$	50 % napona	133	307	1067	5000	6
	100 % napona	519	1200	4133	20833	6
tantal kondenzator, $\leq 10 \mu\text{F}$	50 % napona	112	139	208	407	1,8
	100 % napona	658	806	1214		1,8
aluminijumski kondenzator, < 47 $\mu\text{F}$ "low leakage"	50 % napona	18,9	33	76	222	4
	100 % napona	83	156	344	1056	4,1
keramički kondenzator, < 100 nF	50 % napona	20,8	21,9	23,0	24,7	0,3
	100 % napona	139	150	156	167	0,3
poliesterski ili polikarbonatni kondenzator, < 200 nF	50 % napona	5,6	5,6	6,7	11,4	0,6
	100 % napona	130	135	161	286	0,7
transformator		86	104	142	247	1,5
kalem		17,2	20,8	29	49	1,5
žičani otpornik, $\leq 100 \text{ k}\Omega$	50 % snage	74	82	101	139	0,9
	100 % snage	150	195	255	390	1,6
kompozitni otpornik, $\leq 1 \text{ M}\Omega$	50 % snage	5,0	13,1	33	86	5,4
	100 % snage	12,5	34	90		5,7
metalslojni otpornik, $\leq 1 \text{ M}\Omega$	50 % snage	12,2	15,3	18,6	25,2	1,2
	100 % snage	20,8	26,4	36		1,6
otporna mreža, bilo koji otp.		1,39	3,89	9,4	20,2	5,5
snažna dioda, plastično kućište	50 % snage	8,6	13,9	22,2	34	2,7
	100 % snage	29	45	78	190	2,9
zener dioda, stakleno kućište	50 % struje	9,7	11,7	14,4	19,4	1,2
	100 % struje	13,9	17,8	26,1	50	1,9
signalna dioda, staklena	50 % napona	6,7	10,6	18,3	44	2,9
	100 % napona	9,7	15,0	26,1	63	2,9
MOS memorija (EPROM 64 K), keramičko kućište	100 % napona	2,78	15,3	64	583	9
MOS logičko kolo (mikroprocesor), plastičan	100 % napona	0,56	4,2	36	181	12
CMOS MSI IK sa kap., plast.	100 % napona	0,27	2,8	33	333	14
CMOS MSI IK sa kapijama, keram.	100 % napona	< 0,27	0,56	5,6	56	14
snažan tranzistor, plastičan	100 % napona	< 0,27	1,39	13,9	139	oko 14
snažan tranzistor, hermetičko kućište	100 % napona	< 0,27	< 0,27	0,27	1,67	oko 13
signalni tranzistor, plast.	100 % napona	< 0,27	0,56	5,6	27,8	oko 14
signalni tranzistor, hermet.	100 % napona	< 0,27	< 0,27	0,56	2,78	oko 12
snažno linearno IK, plastično	100 % napona	< 0,27	0,83	6,9	56	oko 13
signalno linearno IK, plastično	100 % napona	< 0,27	0,56	4,2	33	oko 12
konektor za štampanu ploču, bilo koji kontakt		1,95	4,4	8,0	13,3	4
dvostrano štampana ploča lemljena talasom, bilo koja rupa		0,004	0,004	0,004	0,004	0

## 2.4. Pouzdanost elektronskog uređaja

Kada znamo pouzdanost elektronskih komponenata u uređaju, možemo da izračunamo i pouzdanost uređaja.

Ako je uređaj napravljen od  $n$  elektronskih komponenata sa eksponencijalnim raspodelama otkaza i učestaostima otkaza,  $F_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ; i ako uređaj otkazuje kada otkáže jedna od njegovih komponenata, može se pokazati da je verovatnoća ispravnosti uređaja,  $P(t)$ , data jednačinom:

$$P(t) = e^{-(F_1+F_2+\dots+F_n)t} .$$

Vidimo da uređaj ima eksponencijalnu raspodelu otkaza kao i komponente od kojih je napravljen (videti dijagram na slici 2.)

Dalje zaključujemo da je učestanost otkaza uređaja,  $F$ , jednaka zbiru učestanosti otkaza,  $F_i$ , njegovih  $n$  komponenata, tj.:

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n .$$

Naravno, prosečan vremenski interval  $M$ , između dva otkaza uređaja, takođe je:

$$M = \frac{1}{F} .$$

Ako je poznata učestanost otkaza uređaja  $F_2$ , na temperaturi  $T_2$ , može se pokazati da je učestanost otkaza  $F_1$ , na temperaturi  $T_1$ , takođe data jednačinom (\*) koja opisuje Arenijusov model.

Pri korišćenju Arenijusovog modela za računanje učestanosti otkaza uređaja, treba koristiti veličinu termičke aktivacione energije za ceo uređaj. Pomenuta energija može se izračunati pomoću jednačine (\*\*), kada se prethodno na osnovu učestanosti otkaza komponenata uređaja za dve temperature, izračuna učestanost otkaza uređaja za dotične dve temperature.

## 2.5. Primer

Posmatrajmo elektronski uređaj (proizvod-sistem) koji je napravljen od sledećih elemenata:

- elektrolitski kondenzatori  $> 50 \mu\text{F}$ , 4 kom.,  $F_1 = 307 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$   
 $S_{F1} = \text{kom.} \cdot F_1 = 4 \cdot 307 \cdot 10^{-12} = 1228 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$
- transformator,  $F_2 = 104 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ ,  $S_{F2} = 104 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$
- otpornici, 50 kom.,  $F_3 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ ,  $S_{F3} = 50 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$
- MOS memorije, 3 kom.,  $F_4 = 15 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ ,  $S_{F4} = 45 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$
- CMOS MSI IK, 12 kom.,  $F_5 = 2,8 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ ,  $S_{F5} = 33,6 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$
- keramički kondenzatori, 26 kom.,  $F_6 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ ,  $S_{F6} = 26 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$
- MOS mikroprocesor,  $F_7 = 4,2 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ ,  $S_{F7} = 4,2 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ .

Unutrasnjost uređaja je na temperaturi oko  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  i njoj su izložene komponente. Učestanosti otkaza nekih komponenata u ovakvim uslovima rada možemo da nađemo u prethodnoj tabeli, a vrednosti za ostale komponente da interpoliramo. Ako je pušteno u rad  $N(t=0) = 100$  uređaja, možemo da izračunamo koliki će broj uređaja,  $N(t)$ , raditi bez popravljavanja, posle 10 godina rada po 8 časova u toku svakog radnog dana:

$$F = \sum_{i=1}^7 F_i = (1228 + 104 + 50 + 45 + 33,6 + 26 + 4,2) \cdot 10^{-12} = 1491 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$$

$$M = 21 \text{ godina},$$

$$t = 10 \text{ godina} \cdot \frac{365}{7} \text{ nedelja} \cdot 5 \text{ radnih dana} \cdot 8 \text{ radnih casova} \cdot 60 \text{ minuta} \cdot 60 \text{ sekundi} = 75 \cdot 10^6 \text{ sekundi}$$

$$P(t) = e^{-F \cdot t} = e^{-1491 \cdot 10^{-12} \cdot 75 \cdot 10^6} = 0,89$$

$$N(t) = P(t) \cdot N(t = 0) = 0,89 \cdot 100 = 89 \text{ uredjaja} .$$

Izračunate vrednosti za  $P(t)$ , odnosno  $N(t)$ , važe ako je uređaj "preživeo" početni period rada u kome je učestanost otkaza povećana.

### 3. Literatura

1. Zoran A. Ivković, Matematička statistika, treće izdanje, Naučna knjiga, Beograd, 1976., str. 1..58, 157..166.
2. SGS, GS-R Modules Application Manual, 2<sup>nd</sup> edition, march 1987., str. 48..50.
3. H. A. Cole, Early detection of electronic failures, Elektor Electronics, May 1986., str. 26, 27.
4. Ron Parsons, Kineticon Integrated circuits burn-in test system, Amtest Newsletter, Volume 5, Quarter 2, 1988., str. 2, 3.
5. Kenneth F. Watts, A Unifying Approach to Designing for Reliability, Hewlett-Packard Journal, July 1981., str. 24, 25.

1987. Poslednja izmena 17. 3. 1993.