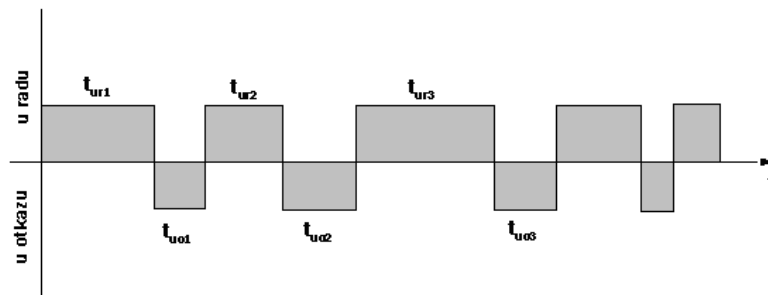


POUZDANOST TEHNIČKIH SISTEMA. POUZDANOST ELEMENTA DO PRVOG OTKAZA

Kvarovi (otkazi) tehničkih sistema

Proces održavanja karakterišu dve bitne slučajne veličine. Prvu slučajnu veličinu predstavlja vreme rada elementa (sistema) do trenutka u kome treba da se sprovede postupak održavanja (obično je to **vreme rada do otkaza**). Druga slučajna promenljiva je vreme potrebno da se održavanje sprovede.

Na taj način se definišu dva osnovna stanja elementa (sistema): **u radu** i **u otkazu** koja se naizmenično smenjuju u procesu održavanja. (slika 1.) (*3)



Slika 1. Promena stanja elementa (sistema) u vremenu.

Otkaz ili kvar je prestanak sposobnosti elementa (sistema) da obavlja svoju funkciju. Otkaz može biti **delimičan** i **potpun**. (*4)

Potpun otkaz sistema nastaje ako je otkazao element od vitalnog značaja, tada otkaz elementa predstavlja i otkaz sistema. (*5)

Delimičan otkaz sistema nastaje ako je otkazao element od perifernog značaja, tada otkaz elementa ne mora da znači otkaz celog sistema. (*6)

Delimični otkazi nastaju: (**6a)

- kada zbog neispravnosti nekog elementa mašina može da funkcioniše ali sa pogoršanim izlaznim karakteristikama (npr. smanjeni kapacitet, tačnost proizvoda, manja brzina).
- kada postoji povećana verovatnoća nastupanja većih nepoželjnih posledica kvarova odnosno havarija (npr. vozilo može da radi kada mu ne rade kočnice).
- kada postoji štetno dejstvo na druge elemente sistema ili okolinu (npr. povećano habanje, povećana potrošnja goriva).

Delimični otkazi treba da se podele u dve grupe prema postupku u slučaju njihove pojave: (**6b)

- one koji se mogu tolerisati bez prekida rada mašine i koji će biti otklonjeni pri sledećem pogodnom zastoju,

- one kod kojih je dalji rad mašine necelishodan pa se rad prekida i delimični kvar se odmah otklanja, tzv. uslovni kvar.

Neispravnost je stanje elementa pri kojem nije sve u skladu sa zadovoljavajućim stanjem tj. nije sve u skladu sa dokumentacijom. Neispravnost je širi pojam od otkaza. (*7)

Podela otkaza:

1.	Karakter izmene karakterističnog parametra od momenta nastanka otkaza	Iznenadni i postepeni
2.	Veza sa drugim otkazima	Nezavisni i zavisni
3.	Mogućnost rada posle otkaza	Potpuni i delimični
4.	Uzrok nastanka	Konstrukcioni, tehnološki, eksploatacioni
5.	Način ispoljavanja	Očigledni i prikriveni
6.	Način otklanjanja	Postojani, koji se otklanjaju sami od sebe (smetnje)
7.	Priroda nastanka	Prirodni i veštački (namerno izazvani)
8.	Vreme nastanka	(I) uhodavanje mašine, (II) eksploatacija, (III) zastarevanje mašine.

Pojam pouzdanosti tehničkih sistema

Pojednostavljeno rečeno, pouzdanost (reliability) je sposobnost nekog sistema da ne otkaze u toku rada.

Pojam pouzdanosti se vrlo često brka s pojmom kvaliteta i sa pojmom sigurnosti.

Često možemo čuti: to je dobar televizor, radi već pet godina bez ijednog kvara (otkaza). Dobar i loš su obeležja kvaliteta (quality). Spomenuti televizor je mogao raditi celo to vrijeme sa lošom slikom ili zvukom, pa ga tih pet godina bez zastoja ne bi učinilo televizorom dobrog kvaliteta. On je, po iskustvu njegovog korisnika, samo vrlo pouzdan televizor.

Uzmimo u razmatranje suprotan slučaj: neka taj televizor ima izvanrednu sliku i zvuk, ali vrlo često mu pregoreva osigurač. Mnogi bi verovatno rekli da je to loš televizor, jer se svaki čas kvvari. Pitanje je šta ga čini televizorom lošeg kvaliteta ? Slika mu je dobra, kao i zvuk, a osigurač mu je vrlo osetljiv, što znači dobar. On je, dakle, dobar ali nepouzdan televizor.

Na osnovu prethodnih primera pokazana je razlika između pojma pouzdanosti i pojma kvaliteta.

Na sledećem primeru, biće pojašnjena razlika između pojma pouzdanosti i pojma sigurnosti (safety). Uzmimo za primer električni bojler, kojem se termostat često kvari i tako bojler ne greje vodu. Taj je bojler je očigledno nepouzdan, ali nimalo ne ugrožava ničiju sigurnost. Suprotno tome razmoztimo bojler koji radi besprekorno, ali mu je, recimo, kamencem blokiran sigurnosni ventil. Takav bojler je pouzdan, ali ugrožava sigurnost okoline.

Ovim zaključkom upada se očigledno u paradoks: pouzdan, a opasan ! Da li se može imati pouzdana a opasna stvar ? Odgovor je: ne može. Zato pojam pouzdanosti o kojoj se ovde govori nije onaj iz standardnog jezika. Iz njega je uzet samo oblik reči, a značenje joj je drugo, novo, i ta reč uz novo značenje pripada stručnoj terminologiji.

Na osnovu prethodnog, pojednostavljenu definiciju pouzdanosti, datu na početku, treba izmeniti u smislu da pouzdanost nije sposobnost, već verovatnoća.

Najšire prihvaćena definicija pouzdanosti glasi:

"Pouzdanost (reliability) je verovatnoća da će određeni sistem adekvatno izvršavati projektovanu funkciju u zadanom periodu vremena pod određenim nametnutim uslovima rada".

Počeci praćenja pouzdanosti:

1. U Engleskoj između 1932. i 1942. ograničava se intenzitet (stopa) otkaza (kvarova) jednog aviona za jedan sat leta.
2. U Nemačkoj za vreme II svetskog rata - razvoj rakete V1, definisana procena relacije između pouzdanosti elemenata i pouzdanosti sistema.

Tehnički sistem je skup elemenata i relacija između njih i njihovih karakteristika integrisanih u cilju ostvarenja određenog cilja tj. promene stanja (npr. motor kamiona se može smatrati tehničkim sistemom koji se sastoji od elemenata bloka, klipova, ventila itd. ali i kao deo složenog sistema kamiona).

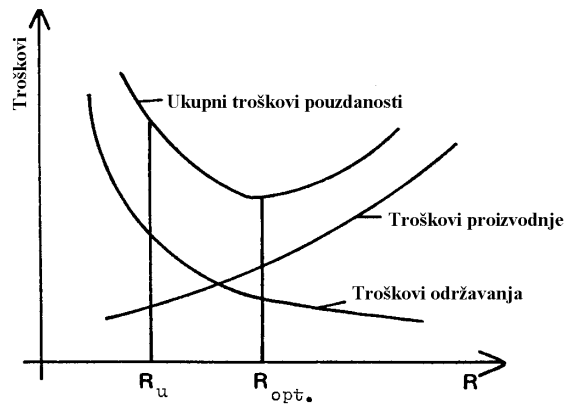
Pod elementom se podrazumeva takvo tehničko ustrojstvo koje se ne razlaže na delove i čija je pouzdanost data ili se određuje eksperimentalno. (*1)

Kada se elementi povežu na različite načine u sisteme postavlja se zadatak određivanja pouzdanosti sistema pomoću pouzdanosti njegovih elemenata.

Važnost pouzdanosti određuje proizvođač, tamo gde je ona potrebna i gde omogućuje da osvoji tržište. Pouzdanost košta: da bi se povećao stepen pouzdanosti potrebna su intenzivnija istraživanja, duži proces projektovanja, strožija ispitivanja, napredne tehnologije tj. dolazi do porasta **troškova proizvodnje**, a nasuprot tome pri porastu pouzdanosti opadaju **troškovi**

održavanja tj. troškovi u vezi sa kvarovima, zamenom elemenata i posledicama koje nastaju zbog smanjene produktivnosti.

Trošak pouzdanosti predstavlja zbir ovih dvaju spomenutih troškova. (slika 2.) (*2)



Slika 2. Troškovi pouzdanosti.

Pouzdanost elementa do prvog otkaza

Neka u vremenskom trenutku $t=0$ element počinje da radi. Pretpostavimo da otkaz elementa nastaje trenutno i da je otkaz potpun. Neka je vreme rada bez otkaza interval $[0, T]$ gde je T momenat otkaza ili vek trajanja elementa. T je slučajna veličina neprekidnog tipa, jer je vremenski trenutak otkaza nepredvidljiv, sa gustinom raspodele:

$$f(t) \text{ za } t \geq 0; \quad f(t) = 0 \text{ za } t < 0.$$

Funkcija raspodele $F(t)$ slučajne promenljive T je: (slika 3.)

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(t) \cdot dt,$$

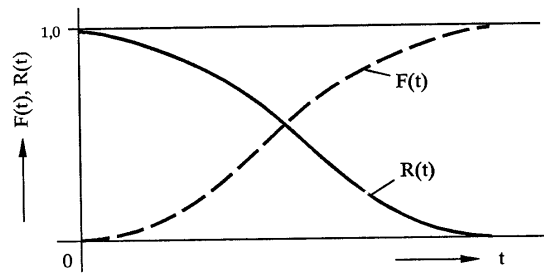
i jednaka je verovatnoći da će se otkaz desiti do vremenskog trenutka t . Još se naziva i funkcija **nepouzdanosti** (otkaza). Drugim rečima funkcija nepouzdanosti $F(t)$ predstavlja verovatnoću da će se element iz stanja “u radu” preći u stanje “u otkazu” tj. otkazati do vremenskog trenutka t . (*8)

Na osnovu $F(t)$ se uvodi funkcija **pouzdanosti** $R(t)$ i predstavlja verovatnoću da se otkaz neće desiti do vremenskog trenutka t : (slika 3.) (*9)

$$F(t) + R(t) = 1; \quad R(t) = 1 - F(t) = P(T > t) \text{ za } t \geq 0;$$

Funkcija pouzdanosti se može iskazati preko gustine raspodele vremena bezotkaznog rada $f(t)$ kao:

$$f(t) = F'(t) = -R'(t) \quad \text{ili} \quad R(t) = \int_t^{\infty} f(t) \cdot dt$$



Slika 3. Funkcije pouzdanosti $R(t)$ i nepouzdanosti $F(t)$. (*10)

Pokazatelji pouzdanosti

Srednje vreme i disperzija bezotkaznog rada

Pouzdanost elemenata može da se okarakterise numeričkim parametrima – **pokazateljima pouzdanosti**. Najznačajniji su: srednje vreme bezotkaznog rada T_0 i disperzija vremena bezotkaznog rada $D(T)$. (*11)

Srednje vreme bezotkaznog rada T_0 . (MTTF – **Mean Time To Failure**). (**11a)

$$T_0 = M(t) = \int_0^t t \cdot f(t) \cdot dt = - \int_0^t t \cdot R'(t) \cdot dt,$$

i posle parcijalne integracije¹ dobija se:

$$T_0 = -t \cdot R(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt = -\infty \cdot R(\infty) + 0 \cdot R(0) + \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt$$

$$T_0 = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt.$$

U slučaju da su elementi popravljivi govori se o srednjem vremenu između kvarova (MTBF – **Mean Time Between Failure**).

Druga značajna karakteristika je disperzija vremena bezotkaznog rada elementa tj. slučajne promenljive T : (**11b)

$$D(T) = M(T^2) - T_0^2 = \int_0^{\infty} t^2 \cdot f(t) \cdot dt - T_0^2 = 2 \cdot \int_0^{\infty} t \cdot R(t) \cdot dt - T_0^2,$$

$\sigma_T = \sqrt{D(T)}$ - standardno odstupanje srednjeg vremena bezotkaznog rada.

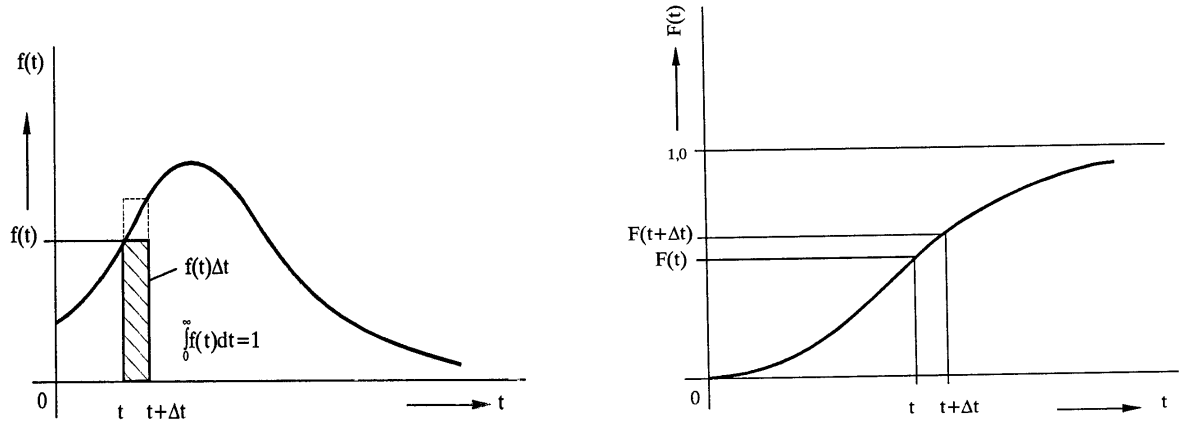
¹ $u = t, u' = 1; \quad v' = R'(t), v = R(t); \quad \int_a^b u \cdot v' \cdot dt = u \cdot v \Big|_a^b - \int_a^b v \cdot u' \cdot dt$

Intenzitet otkaza

Veoma značajna i široko korišćena karakteristika pouzdanosti je tzv. intenzitet otkaza ili opasnost rizika: $\rightarrow \lambda(t)$.

Ako je element radio bez otkaza do vremenskog trenutka t , verovatnoća da će da otkaze u vremenskom intervalu $t+\Delta t$ predstavlja uslovnu verovatnoću. (slika 4.)

(**12)



Slika 4. Gustina i funkcija raspodele funkcije nepouzdanosti.

$$\begin{aligned}
 P(t < T < t + \Delta t | T > t) &= \frac{P(T > t; t < T < t + \Delta t)}{P(T > t)} = \\
 &= \frac{P(t < T < t + \Delta t)}{P(T > t)} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} = \\
 &= \frac{1 - P(T > t + \Delta t) - [1 - P(T > t)]}{R(t)} = \frac{1 - R(t + \Delta t) - 1 + R(t)}{R(t)} = \\
 &= -\frac{R(t + \Delta t) - R(t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{R(t)} \cdot \Delta t \approx -\frac{R'(t)}{R(t)} \cdot \Delta t, \\
 P(t < t < t + \Delta t | T > t) &\approx \lambda(t) \cdot \Delta t.
 \end{aligned}$$

Intenzitet otkaza je jednak:

$$\lambda(t) = -\frac{R'(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}.$$

Intenzitet otkaza može se tumačiti i kao verovatnoća da element, koji radi bez otkaza do vremenskog trenutka t , otkaze u sledećoj jedinici vremena.

Ako je intenzitet otkaza $\lambda(t)$ poznat, tada se preko njega može izraziti funkcija pouzdanosti $R(t)$ kao: (**13)

$$\lambda(t) = -\frac{R'(t)}{R(t)} = -[\ln R(t)]'$$

$$\int_0^t \lambda(t) dt = \int_0^t d[\ln R(t)]; \quad \ln R(t) = -\int_0^t \lambda(t) \cdot dt$$

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

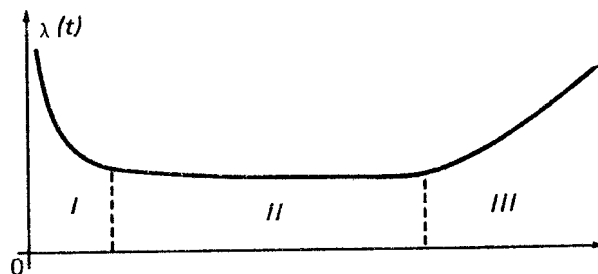
Formula za verovatnoću bezotkaznog rada tj. pouzdanost elementa na intervalu t_1, t_2 : (*14)

$$R(t_1, t_2) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) \cdot dt}.$$

Verovatnoća rada bez otkaza od t_1 do $t_2 = t_1 + t_0$ pod uslovom da je element radio do vremena t_1 može se izračunati kao:

$$\begin{aligned} R(t_1, t_1 + t_0) &= P(T > t_1 + t_0 | T > t_1) = \\ &= \frac{P(T > t_1, T > t_1 + t_0)}{P(T > t_1)} = \frac{P(T > t_1 + t_0)}{P(T > t_1)} = \frac{R(t_1 + t_0)}{R(t_1)} = \frac{R(t_2)}{R(t_1)}. \end{aligned}$$

Mnogi eksperimentalni podaci pokazuju da je za veliki broj elemenata funkcija intenziteta otkaza – $\lambda(t)$ sledećeg oblika: (slika 5.) (*15)



Slika 5. Intenzitet otkaza elementa u zavisnosti od vremena.

Prvi period U periodu uhadavanja sistema intenzitet otkaza je povećan, što znači da postoje elementi sa skrivenim defektima. Početni ili rani otkazi (early failures) se pojavljuju prvi, tj. oni nastaju na samom početku rada elementa, odnosno odmah nakon puštanja sistema u rad. U najvećem broju slučajeva oni su posledica loše izrade, loše strukture materijala, pogrešne montaže ili izrade, odnosno su rezultat slabe organizacije i tehnike kontrole kvaliteta u toku proizvodnog procesa.

Početni otkazi se otklanjaju u tzv. periodu uhadavanja (I period), tako što se svaki element sa greškom zameni novim nakon otkaza, odnosno svaka neispravnost otkloni čim se pojavi. Ako se postupa na ovaj taj način, broj početnih otkaza naglo

opada do trenutka kada se oni više uopšte ne pojavljuju. Tek tad je sistem zapravo spreman za upotrebu. Kod nekih se (složenih) sistema početni otkazi se otklanjaju još u fabrici, pre isporuke, simulirajući stvarne radne uslove kroz probni rad sistema.

Drugi period se naziva periodom eksploatacije (normalan rad) sistema i karakteriše se konstantnim intenzitetom otkaza elemenata. Nakon početnih nastupaju slučajni otkazi (chance failures) elemenata. Oni su zapravo prisutni od samog početka rada sistema, i u periodu uhodavanja, ali tada su pomešani sa početnim otkazima, pa ih je teško od njih izdvojiti. Uzrok slučajnih otkaza ne može se sa sigurnošću odrediti. Može se pretpostaviti da su oni posledica nepredvidivih koncentracija naprezanja (mehaničkih, termičkih, električnih itd.) koja premašuju projektovanu izdržljivost elementa.

Slučajni otkazi se ne mogu sprečiti ni najboljim uhodavanjem ni najintenzivnijim održavanjem. Evidentno je nekorisno, bez ikakvog znaka neispravnosti, zamenjivati nasumce komponente koje ispravno rade.

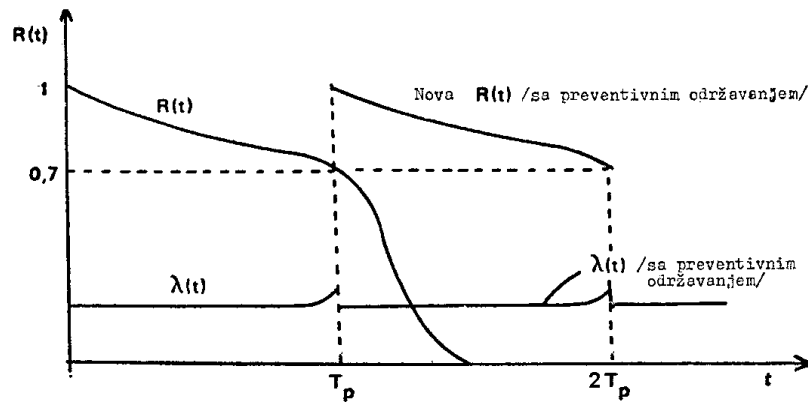
Treći period je period zastarevanja elementa, karakteriše ga porast intenziteta otkaza. Poslednji se u vremenu pojavljuju otkazi zbog dotrajalosti (wearout failures). Oni nastaju samo onda ako se sistem ne održava ili ako se on ne održava po strogom preventivnom principu, a posledica su dotrajalosti komponente (istrošenost, habanje, zamor materijala i si.).

Teorijski, pravilno održavan tehnički sistem nikad ne stari. Ali, kad na red po dotrajatosti dođu i vrlo trajne i skupe komponente (noseća konstrukcija, kućišta itd.), onda ukupni troškovi održavanja imaju tendenciju porasta da rad sistema čine ekonomski nerentabilnim (ako ga već pre toga nije takvim učinila tehnološka zastarelost).

Slučajevi kada može intenzitet otkaza može smatrati konstantnim (20)**

Primena postupaka preventivnog održavanja

I slučaj: Kada određeni element dostigne određenu starost, kraj II perioda - eksploatacije, intenzitet otkaza počinje progresivno raste. Ako se ta pojava želi da spreči tj. da se intenzitet otkaza dovede na nižu a pouzdanost na višu vrednost, uvode se određeni postupci preventivnog održavanja. (slika 6.)

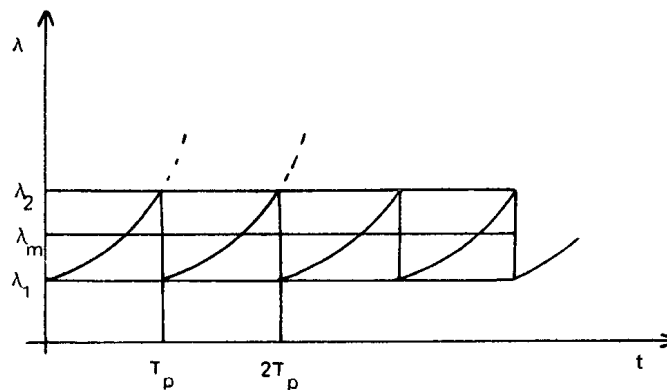


Slika 6. Pouzdanost pri preventivnom održavanju.

Zanemarujući I period (rani, početni otkazi), uz planirano preventivno održavanje u trenutku T_p u kojem je npr. $R(t) = 0.7$ uspeva se zadržati intenzitet otkaza konstantnim za dug period vremena.

II slučaj: Kada intenzitet otkaza raste u vremenu, III period – zastarevanje elementa, moguće ga je periodično dovoditi na početnu vrednost pomoću postupaka preventivnog održavanja. Intenzitet otkaza osciluje između vrednosti λ_1 i λ_2 tako da se za prvu aproksimaciju intenzitet otkaza može svesti na konstantu sa srednjom vrednosti λ_m (sa velikim pojednostavljenjem proračuna pouzdanosti): (slika 7.)

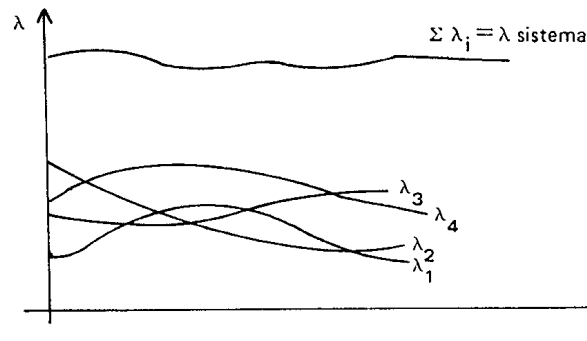
$$\lambda_m = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2)}{2}$$



Slika 7. Periodična promena intenziteta otkaza pri preventivnom održavanju.

Superpozicija intenziteta otkaza elemenata sistema

Kada je intenzitet otkaza u sistemu jednak zbiru intenziteta otkaza svih sastavnih elemenata može se smatrati da je intenzitet otkaza sistema konstantan. Ako sastavni delovi imaju konstantne intenzitete otkaza to će logično i intenzitet otkaza sistema biti konstantan, međutim i ako se intenziteti otkaza pojedinih elemenata menjaju u vremenu, njihova suma zbog kompenzacije može biti konstantna. Postiže se tzv. "Stacionarno stanje" otkaza, slika 8.



Slika 8. Konstantan intenzitet otkaza sistema.

Otkazi usled dotrajalosti kad više generacija elemenata rade istovremeno

Posmatra se sistem koji je neprekidno u pogonu i se sastoji od konstantnog velikog broja elemenata N (npr. 10000), pri čemu se elementi pri pojavi otkaza zamenjuju elementima istog tipa. Zanimaruje se u potpunosti mogućnost početnih i slučajnih otkaza, tj. razmatraju se samo otkazi nastali zbog dotrajalosti. Prosečno vreme rada svakog od elemenata do otkaza zbog dotrajalosti (životni vek) iznosi T_0 , dok odgovarajuće srednje kvadratno odstupanje vremena rada do otkaza (životnog veka) iznosi σ . U ovom slučaju raspodela vremena rada do otkaza, funkcija nepouzdanosti $F(t)$, je Normalna raspodela sa parametrima T_0 i σ tj. $N(T_0, \sigma)$.

U trenutku kada je sistem pušten u rad u njemu je ugrađena prva generacija elemenata ($n=1$). Od prve generacije elemenata njih 99.7% će otkazati zbog dotrajalosti u intervalu od $T_0 - 3 \cdot \sigma_1$ do $T_0 + 3 \cdot \sigma_1$, gde je $\sigma_1 = \sigma$. Kriva gustine raspodele vremena rada do otkaza elemenata prve generacije $f_1(t)$, prikazana na slici 9a., jednaka je:

$$f_1(t) = \frac{1}{\sigma_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-T_0}{\sigma_1} \right)^2}.$$

Broj elemenata sistema (prve generacije) $N_1(t)$ koji su otkazali u vremenu je jednak:

$$N_1(t) = N \cdot f_1(t).$$

Pri pojavi otkaza svaki element prve generacije se zamenjuje elementom druge generacije, vremena početaka rada elemenata druge generacije nisu ista tj. neki počinju da rade kad dođe do otkaza prvih elemenata prve generacije, a neki mnogo kasnije, kada otkazu poslednji elementi prve generacije. Zbog toga će kriva gustine raspodele vremena rada do otkaza elemenata druge generacije ($n=2$) $f_2(t)$, slika 9b, biti spljoštenija tj. srednje kvadratno odstupanje σ_2 za elemente druge generacije je veće nego srednje kvadratno odstupanje σ_1 za prvu generaciju elemenata. Gustina raspodele vremena rada do otkaza elemenata druge generacije $f_2(t)$ je:

$$f_2(t) = \frac{1}{\sigma_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-2 \cdot T_0}{\sigma_2} \right)^2}.$$

Broj elemenata sistema (druge generacije) $N_2(t)$ koji su otkazali u vremenu je jednak:

$$N_2(t) = N \cdot f_2(t).$$

Ovo je još izraženije kod elemenata treće generacije, koji počinju da rade nakon što otkazu prvi elementi druge generacije, dok još u sistemu rade i elementi prve generacije (slika 9b). Na sistemima koji se dugo upotrebljavaju može se javiti i četvrta i peta generacija elemenata (slika 9c), pri čemu je srednje kvadratno odstupanje svake naredne generacije sve veće ($\sigma_2 < \sigma_3 < \sigma_4 < \sigma_5 \dots$). Drugim rečima, u jednom istom trenutku u sistemu mogu da rade elementi iz npr. pet i više generacija. Uopšteno, gustina raspodele vremena rada do otkaza elemenata n -te generacije $f_n(t)$ je: (slika 9c)

$$f_n(t) = \frac{1}{\sigma_n \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-n \cdot T_0}{\sigma_n} \right)^2}, n=1,2,3, \dots$$

dok je broj elemenata sistema n -te generacije $N_n(t)$ koji su otkazali u vremenu je jednak:

$$N_n(t) = N \cdot f_n(t).$$

Ukupan broj elemenata sistema svih generacija koji su otkazali u vremenu $N_{otk}(t)$, dobija se kao zbir broja elemenata koji su otkazali po generacijama $N_n(t)$, $n=1,2,3, \dots$:

$$N_{otk}(t) = N \cdot f_1(t) + N \cdot f_2(t) + N \cdot f_3(t) + \dots,$$

$$N_{otk}(t) = N \cdot (f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) + \dots).$$

Pokazuje se da je granična vrednost:

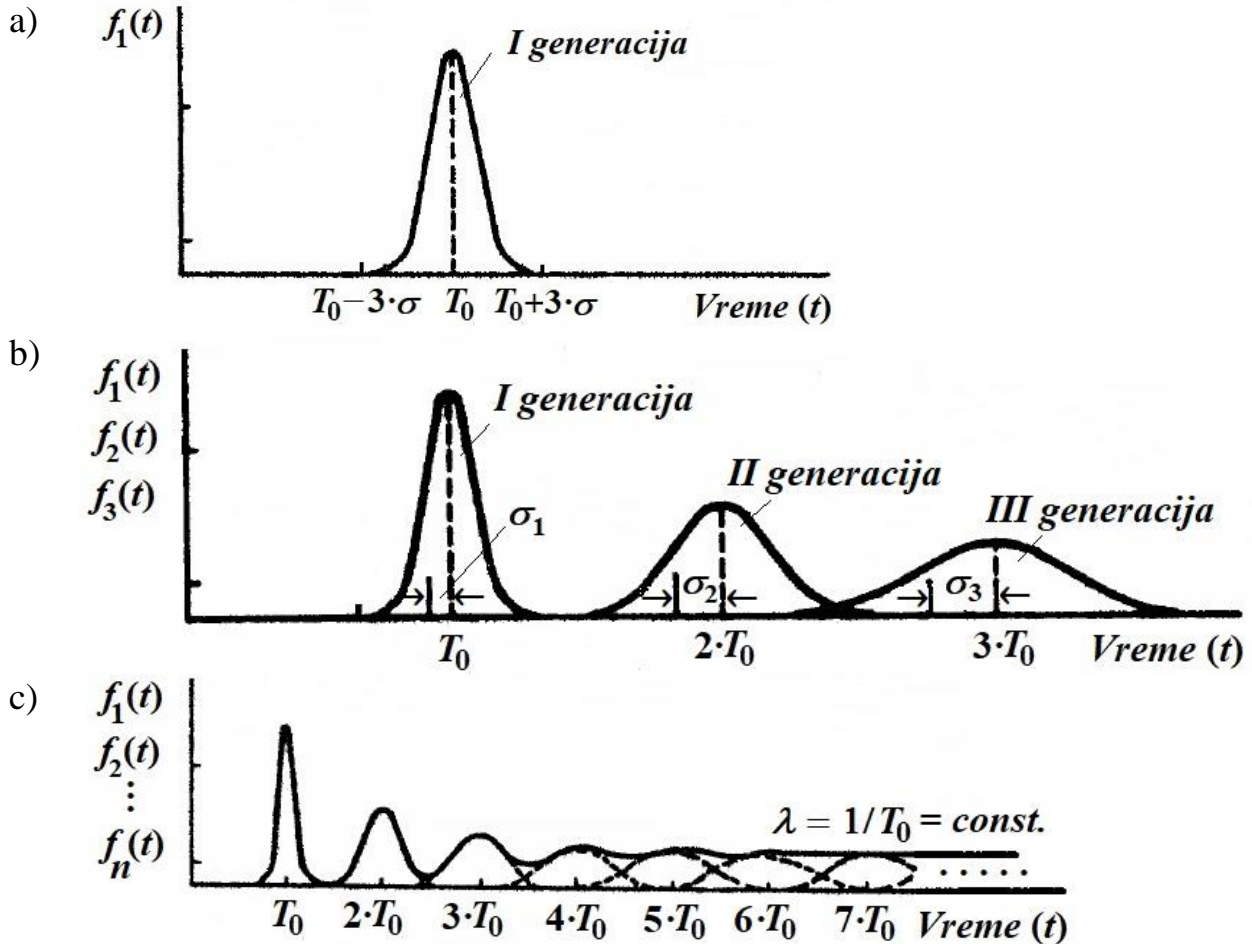
$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) = \frac{1}{T_0} = const.,$$

što se može protumačiti kao intenzitet otkaza λ , tj.:

$$\lambda = \frac{1}{T_0} = const.$$

Sumirajući dosad izneseno, u slučaju kad se zanemare početni i slučajni kvarovi tako da je sistem podložen samo kvarovima zbog dotrajalosti i ako se komponente zamjenjuju tek pošto otkazu elementni prethodne generacije, ovakav sistem poprima konstantan intenzitet otkaza nakon perioda stabilizacije. U tom slučaju broj otkaza elemenata sistema svih generacija u vremenu je konstantan i jednak:

$$N_{otk}(t) = N \cdot \lambda = const.$$



Slika 9. Stacionarno stanje otkaza.

Zakon raspodele verovatnoća broja otkaza u slučaju konstantnog intenziteta otkaza
 U slučaju konstantnog intenziteta otkaza ($\lambda = const.$) slučajna promenljiva "broj otkaza u vremenskom intervalu τ ", tj. verovatnoća $P(N)_\tau$ definisana je Poisson-ovom raspodelom: (verovatnoća da će se u intervalu τ dogoditi N otkaza)

$$P(N)_\tau = \frac{(\lambda \cdot \tau)^N \cdot e^{-\lambda \cdot \tau}}{N!}.$$

Odavde se pouzdanost za vremenski interval τ dobija kao:

$$R(\tau) = P(N = 0)_\tau = e^{-\lambda \cdot \tau}.$$

U slučaju konstantnog intenziteta otkaza, pouzdanost elemenata, za isti period funkcionisanja elementa, je ista nezavisno od trenutka u kome počinje funkcionisanje. Kaže se da element “nema memoriju” tj. njegovo ponašanje je jednako bez obzira na prošlost i zavisi samo od dužine posmatranog intervala.

Teorijske raspodele koje se koriste u teoriji pouzdanosti

U zavisnosti od vremena rada elemenata (sistema), period I, II, III koriste se najčešće sledeće teorijske raspodele za opisivanje intenziteta otkaza: (*16)

I period – uhodavanje mašine → Vejbulova raspodela,

II period – eksploatacija mašine → Eksponencijalna raspodela,

III period – starenje mašine → Normalna raspodela.

Eksponencijalna raspodela (*17)

Gustina raspodele, gustina funkcije nepouzdanosti (otkaza): (slika 10.)

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot (t-\gamma)}, \quad t \geq \gamma.$$

gde je γ parametar položaja.

Funkcija raspodele, funkcija nepouzdanosti:

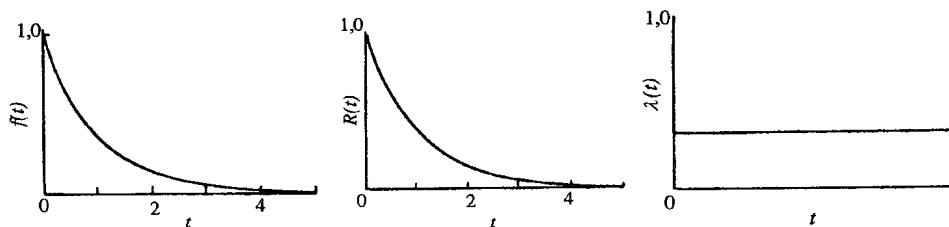
$$F(t) = \int_0^t \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot (t-\gamma)} \cdot dt = 1 - e^{-\lambda \cdot (t-\gamma)}.$$

Funkcija pouzdanosti:

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

Intenzitet otkaza:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda \cdot e^{-\lambda \cdot (t-\gamma)}}{e^{-\lambda \cdot (t-\gamma)}} = \lambda = const.$$



Slika 10. Eksponencijalna raspodela.

Pokazatelji pouzdanosti: srednje vreme bezotkaznog rada, disperzija i srednje kvadratno odstupanje vremena bezotkaznog rada:

$$T_0 = \int_0^{\infty} e^{-\lambda \cdot (t-\gamma)} \cdot dt = \gamma + \frac{1}{\lambda}, \quad D(T) = \frac{1}{\lambda^2}, \quad \sigma = \frac{1}{\lambda}.$$

Normalna raspodela (**18)

Gustina raspodele, funkcija nepouzdanosti (otkaza) :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(t-T_0)^2}{2 \cdot \sigma^2}}; \quad T_0 = M(t); \quad \sigma^2 = D(T).$$

Funkcija raspodele, funkcija nepouzdanosti:

$$F(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-T_0)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \cdot dt.$$

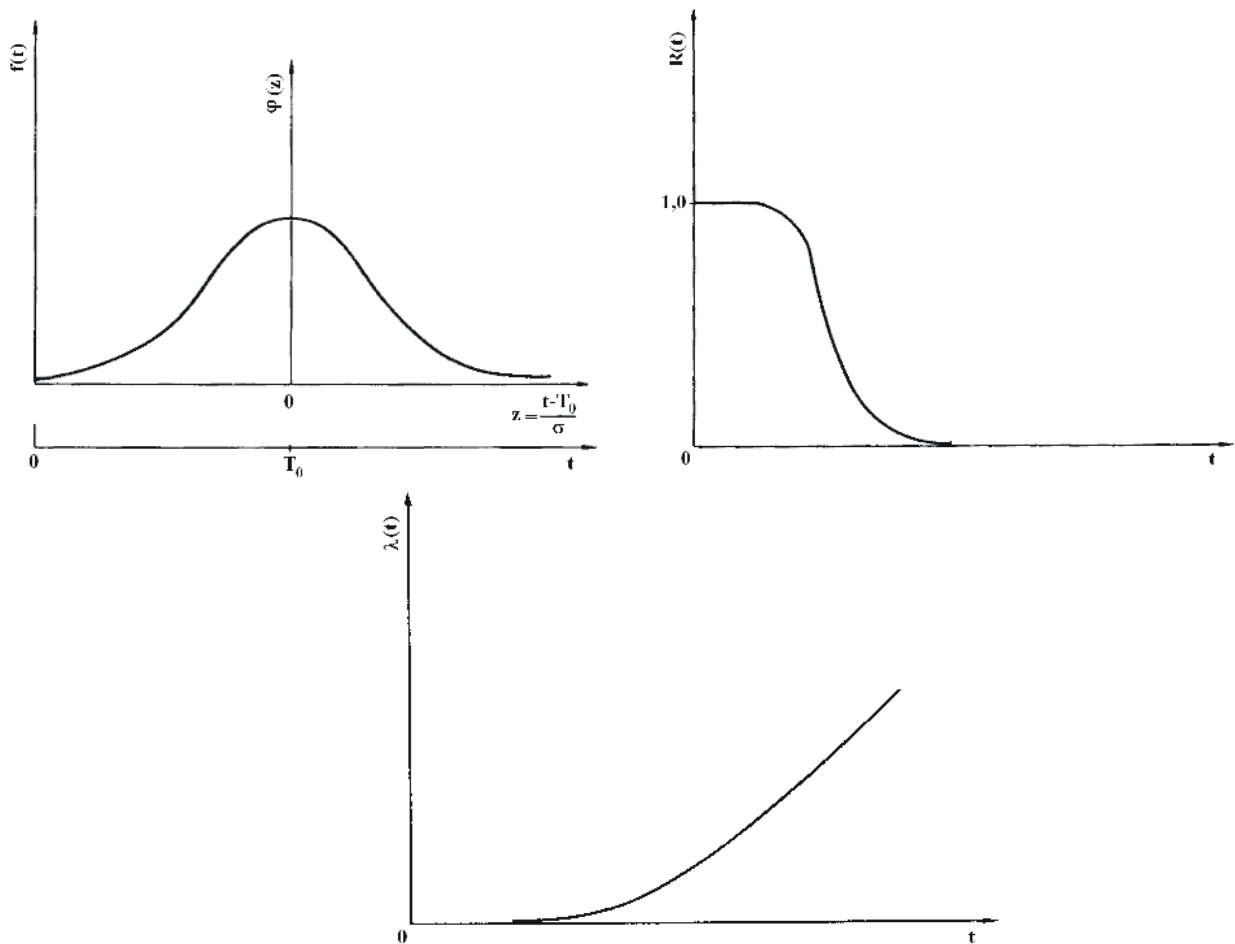
Funkcija pouzdanosti:²

$$R(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-T_0)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \cdot dt = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{\frac{t-T_0}{\sigma}}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} \cdot dx.$$

Intenzitet otkaza: (slika 11.)

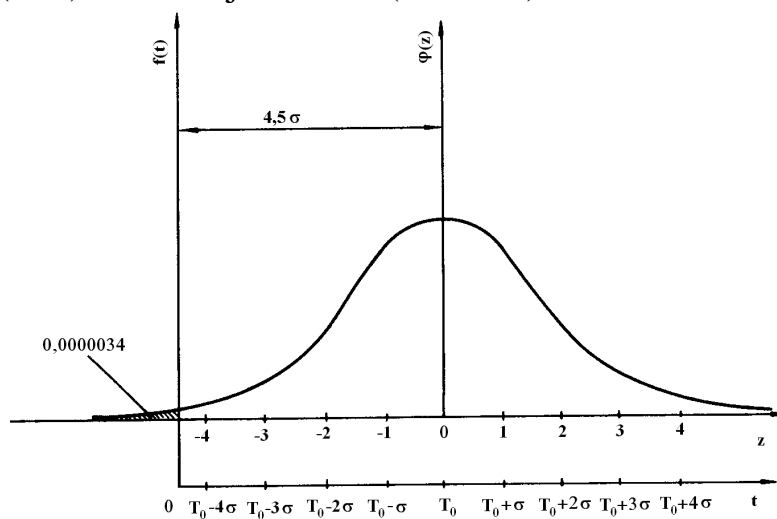
$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{e^{-\frac{(t-T_0)^2}{2 \cdot \sigma^2}}}{\int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-T_0)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \cdot dt}.$$

² $x = \frac{t-T_0}{\sigma}, \quad dx = \frac{1}{\sigma} \cdot dt, \quad dt = \sigma \cdot dx$



Slika 11. Normalna raspodela.

Ako T (vreme bezotkaznog rada) ima normalnu raspodelu $N(T_0, \sigma)$ onda je $P(T < 0)$ pozitivan broj, što ne odgovara definiciji slučajne promenljive T za koju važi $P(T > 0) = 1$. Pošto se Normalna raspodela koristi u trećem periodu eksploatacije elementa (otkazi koji nastaju zbog starenja) tada je ispunjeno $3 \cdot \sigma \ll T_0$ pa je verovatnoća $P(T < 0)$ zanemarljivo mala. (slika 12.)



Slika 12. Oblast definisanosti Normalne raspodele.

Tabela 1.

$$\text{Vrednosti funkcije } \varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,3989	3989	3989	3988	3986	3984	3982	3980	3977	3973
0,1	3970	3965	3961	3956	3951	3945	3939	3932	3925	3918
0,2	3910	3902	3894	3885	3876	3867	3857	3847	3836	3825
0,3	3814	3802	3790	3778	3765	3752	3739	3726	3712	3697
0,4	3683	3668	3652	3637	3621	3605	3589	3572	3555	3538
0,5	3521	3503	3485	3467	3448	3429	3410	3391	3372	3352
0,6	3332	3312	3292	3271	3251	3230	3209	3187	3166	3144
0,7	3123	3101	3079	3056	3034	3011	2989	2966	2943	2920
0,8	2897	2874	2850	2827	2803	2780	2756	2732	2709	2685
0,9	2661	2637	2613	2589	2565	2541	2516	2492	2468	2444
1,0	0,2420	2396	2371	2347	2323	2299	2275	2251	2227	2203
1,1	2179	2155	2131	2107	2083	2059	2036	2012	1989	1965
1,2	1942	1919	1895	1872	1849	1826	1804	1781	1758	1736
1,3	1714	1691	1669	1647	1626	1604	1582	1561	1539	1518
1,4	1497	1476	1456	1435	1415	1394	1374	1354	1334	1315
1,5	1295	1276	1257	1238	1219	1200	1182	1163	1145	1127
1,6	1109	1092	1074	1057	1040	1023	1006	0989	0973	0957
1,7	0940	0925	0909	0893	0878	0863	0848	0833	0818	0804
1,8	0790	0775	0761	0748	0734	0721	0707	0694	0681	0669
1,9	0656	0644	0632	0620	0608	0596	0584	0573	0562	0551
2,0	0,0540	0529	0519	0508	0498	0488	0478	0468	0459	0449
2,1	0440	0431	0422	0413	0404	0396	0387	0379	0371	0363
2,2	0355	0347	0339	0332	0325	0317	0310	0303	0297	0290
2,3	0283	0277	0270	0264	0258	0252	0246	0241	0235	0229
2,4	0224	0219	0213	0208	0203	0198	0194	0189	0184	0180
2,5	0175	0171	0167	0163	0158	0154	0151	0147	0143	0139
2,6	0136	0132	0129	0126	0122	0119	0116	0113	0110	0107
2,7	0104	0101	0099	0096	0093	0091	0088	0086	0084	0081
2,8	0079	0077	0075	0073	0071	0069	0067	0065	0063	0061
2,9	0060	0058	0056	0055	0053	0051	0050	0048	0047	0046
3,0	0,0044	0043	0042	0040	0039	0038	0037	0036	0035	0034
3,1	0033	0032	0031	0030	0029	0028	0027	0026	0025	0025
3,2	0024	0023	0022	0022	0021	0020	0020	0019	0018	0018
3,3	0017	0017	0016	0016	0015	0015	0014	0014	0013	0013
3,4	0012	0012	0012	0011	0011	0010	0010	0010	0009	0009
3,5	0009	0008	0008	0008	0008	0007	0007	0007	0007	0006
3,6	0006	0006	0006	0005	0005	0005	0005	0005	0005	0004
3,7	0004	0004	0004	0004	0004	0004	0003	0003	0003	0003
3,8	0003	0003	0003	0003	0003	0002	0002	0002	0002	0002
3,9	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0001	0001

Tabela 2.

$$\text{Laplasova funkcija } \phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^t e^{-\frac{z^2}{2}} \cdot dz$$

t	Φ(t)	t	Φ(t)	t	Φ(t)	t	Φ(t)	t	Φ(t)
0,00	0,0000	0,55	0,2088	1,10	0,3643	1,65	0,4505	2,42	0,4922
0,01	0,0040	0,56	0,2123	1,11	0,3663	1,66	0,4515	2,44	0,4927
0,02	0,0080	0,57	0,2157	1,12	0,3686	1,67	0,4525	2,46	0,4931
0,03	0,0120	0,58	0,2190	1,13	0,3708	1,68	0,4535	2,48	0,4934
0,04	0,0160	0,59	0,2224	1,14	0,3729	1,69	0,4545	2,50	0,4938
0,05	0,0199	0,60	0,2257	1,15	0,3749	1,70	0,4554	2,52	0,4941
0,06	0,0239	0,61	0,2291	1,16	0,3770	1,71	0,4564	2,54	0,4945
0,07	0,0279	0,62	0,2324	1,17	0,3790	1,72	0,4573	2,56	0,4948
0,08	0,0319	0,63	0,2357	1,18	0,3810	1,73	0,4582	2,58	0,4951
0,09	0,0359	0,64	0,2389	1,19	0,3830	1,74	0,4591	2,60	0,4953
0,10	0,0398	0,65	0,2422	1,20	0,3849	1,75	0,4599	2,62	0,4956
0,11	0,0438	0,66	0,2454	1,21	0,3869	1,76	0,4608	2,64	0,4959
0,12	0,0478	0,67	0,2484	1,22	0,3883	1,77	0,4661	2,66	0,4961
0,13	0,0517	0,68	0,2517	1,23	0,3907	1,78	0,4625	2,68	0,4963
0,14	0,0557	0,69	0,2549	1,24	0,3925	1,79	0,4633	2,70	0,4965
0,15	0,0596	0,70	0,2580	1,25	0,3946	1,80	0,4641	2,72	0,4967
0,16	0,0636	0,71	0,2611	1,26	0,3962	1,81	0,4649	2,74	0,4969
0,17	0,0675	0,72	0,2642	1,27	0,3980	1,82	0,4656	2,76	0,4971
0,18	0,0714	0,73	0,2673	1,28	0,3997	1,83	0,4664	2,78	0,4973
0,19	0,0753	0,74	0,2703	1,29	0,4015	1,84	0,4671	2,80	0,4974
0,20	0,0793	0,75	0,2734	1,30	0,4032	1,85	0,4678	2,82	0,4976
0,21	0,0832	0,76	0,2764	1,31	0,4049	1,86	0,4686	2,84	0,4977
0,22	0,0871	0,77	0,2794	1,32	0,4066	1,87	0,4693	2,86	0,4979
0,23	0,0910	0,78	0,2823	1,33	0,4082	1,88	0,4699	2,88	0,4980
0,24	0,0948	0,79	0,2852	1,34	0,4099	1,89	0,4706	2,90	0,4981
0,25	0,0987	0,80	0,2881	1,35	0,4115	1,90	0,4713	2,92	0,4982
0,26	0,1026	0,81	0,2910	1,36	0,4131	1,91	0,4719	2,94	0,4984
0,27	0,1064	0,82	0,2939	1,37	0,4147	1,92	0,4726	2,96	0,4985
0,28	0,1103	0,83	0,2967	1,38	0,4162	1,93	0,4732	2,98	0,4986
0,29	0,1141	0,84	0,2995	1,39	0,4177	1,94	0,4738	3,00	0,49865
0,30	0,1179	0,85	0,3023	1,40	0,4192	1,96	0,4750	3,20	0,49931
0,31	0,1217	0,86	0,3051	1,41	0,4207	1,97	0,4756	3,40	0,49966
0,32	0,1255	0,87	0,3078	1,42	0,4222	1,98	0,4761	3,60	0,4998
0,33	0,1293	0,88	0,3106	1,43	0,4236	1,99	0,4767	3,80	0,49992
0,34	0,1331	0,89	0,3133	1,44	0,4251	2,00	0,4773	4,00	0,49996
0,35	0,1368	0,90	0,3159	1,45	0,4265	2,02	0,4783	4,50	0,499997
0,36	0,1406	0,91	0,3186	1,46	0,4275	2,04	0,4793	5,00	0,499997
0,37	0,1443	0,92	0,3212	1,47	0,4292	2,06	0,4803		
0,38	0,1480	0,93	0,3238	1,48	0,4306	2,08	0,4812		
0,39	0,1517	0,94	0,3264	1,49	0,4319	2,10	0,4821		
0,40	0,1554	0,95	0,3289	1,50	0,4332	2,12	0,4830		
0,41	0,1591	0,96	0,3315	1,51	0,4345	2,14	0,4838		
0,42	0,1628	0,97	0,3340	1,52	0,4357	2,16	0,4846		
0,43	0,1664	0,98	0,3365	1,53	0,4370	2,18	0,4854		
0,44	0,1700	0,99	0,3389	1,54	0,4382	2,20	0,4861		
0,45	0,1736	1,00	0,3413	1,55	0,4394	2,22	0,4868		
0,46	0,1772	1,01	0,3428	1,56	0,4406	2,24	0,4875		
0,47	0,1808	1,02	0,3461	1,57	0,4418	2,26	0,4881		
0,48	0,1844	1,03	0,3485	1,58	0,4429	2,28	0,4887		
0,49	0,1879	1,04	0,3508	1,59	0,4441	2,30	0,4893		
0,50	0,1915	1,05	0,3531	1,60	0,4452	2,32	0,4898		
0,51	0,1950	1,06	0,3554	1,61	0,4463	2,34	0,4904		
0,52	0,1985	1,07	0,3577	1,62	0,4474	2,36	0,4909		
0,53	0,2019	1,08	0,3599	1,63	0,4484	2,38	0,4913		
0,54	0,2054	1,09	0,3621	1,64	0,4495	2,40	0,4918		

Vejbulova raspodela (19)**

Gustina raspodele, funkcija nepouzdanosti (otkaza):

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}}, \quad t \geq \gamma, \beta > 0, \eta > 0$$

gde je γ – parametar položaja, β – parametar oblika i η – parametar razmere.

Za $\beta = 1$ Vejbulova raspodela prelazi u eksponencijalnu raspodelu čiji je parametar λ u tom slučaju jednak $1/\eta$.

Funkcija raspodele, funkcija nepouzdanosti:

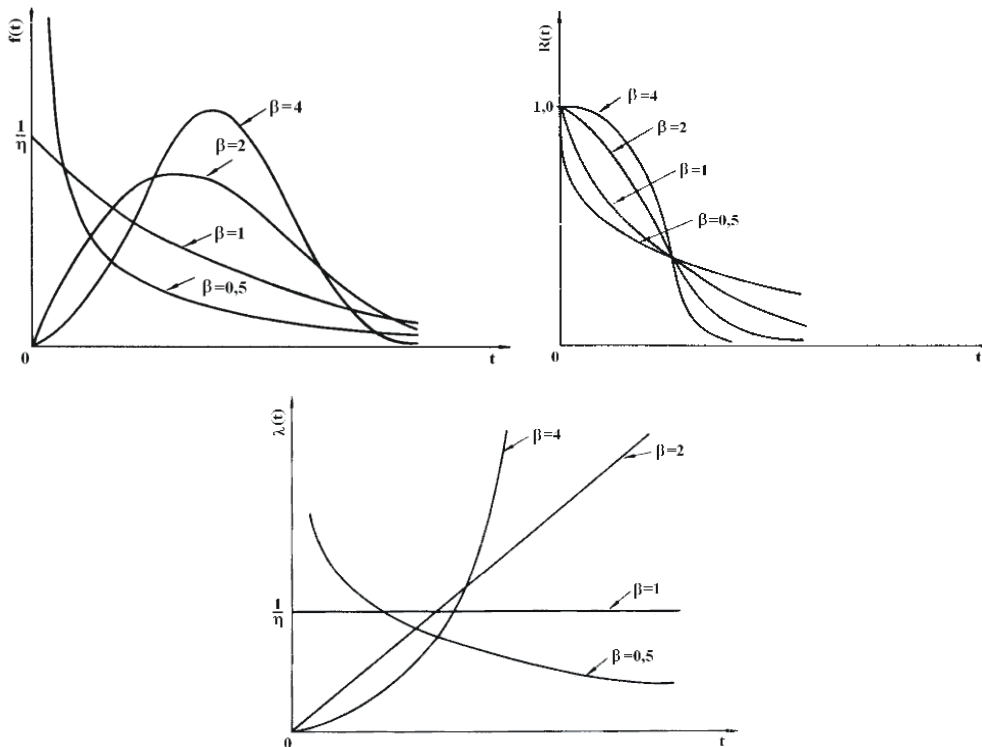
$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}}.$$

Funkcija pouzdanosti:

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

Intenzitet otkaza: (slika 12.)

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}.$$



Slika 12. Vejbulova raspodela.

Srednje vreme bezotkaznog rada:

$$T_0 = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right).$$

Disperzija:

$$D(T) = \eta^2 \cdot \left[\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \right], \text{ gde je } \Gamma(p) - \text{Gama funkcija.}$$

Tabela 3. Vrednosti Gama funkcije: $\Gamma(p)$.

p	$\Gamma(p)$	p	$\Gamma(p)$	p	$\Gamma(p)$	p	$\Gamma(p)$
1,00	1,0000	1,25	0,9064	1,50	0,8862	1,75	0,9191
1,01	0,9943	1,26	0,9044	1,51	0,8866	1,76	0,9214
1,02	0,9888	1,27	0,9025	1,52	0,8870	1,77	0,9238
1,03	0,9835	1,28	0,9007	1,53	0,8876	1,78	0,9262
1,04	0,9784	1,29	0,8990	1,54	0,8882	1,79	0,9288
1,05	0,9735	1,30	0,8975	1,55	0,8889	1,80	0,9314
1,06	0,9687	1,31	0,8960	1,56	0,8896	1,81	0,9341
1,07	0,9642	1,32	0,8946	1,57	0,8905	1,82	0,9368
1,08	0,9597	1,33	0,8934	1,58	0,8914	1,83	0,9397
1,09	0,9555	1,34	0,8922	1,59	0,8924	1,84	0,9426
1,10	0,9514	1,35	0,8912	1,60	0,8935	1,85	0,9456
1,11	0,9474	1,36	0,8902	1,61	0,8947	1,86	0,9487
1,12	0,9436	1,37	0,8893	1,62	0,8959	1,87	0,9518
1,13	0,9399	1,38	0,8885	1,63	0,8972	1,88	0,9551
1,14	0,9364	1,39	0,8879	1,64	0,8986	1,89	0,9584
1,15	0,9330	1,40	0,8873	1,65	0,9001	1,90	0,9618
1,16	0,9298	1,41	0,8868	1,66	0,9017	1,91	0,9652
1,17	0,9267	1,42	0,8864	1,67	0,9033	1,92	0,9688
1,18	0,9237	1,43	0,8860	1,68	0,9050	1,93	0,9724
1,19	0,9209	1,44	0,8858	1,69	0,9068	1,94	0,9761
1,20	0,9182	1,45	0,8857	1,70	0,9086	1,95	0,9799
1,21	0,9156	1,46	0,8856	1,71	0,9106	1,96	0,9837
1,22	0,9131	1,47	0,8856	1,72	0,9126	1,97	0,9877
1,23	0,9108	1,48	0,8857	1,73	0,9147	1,98	0,9917
1,24	0,9085	1,49	0,8859	1,74	0,9168	1,99	0,9958
0,5	1,7725	2,5	1,3249	4,5	11,632	6,5	287,88
1	1	3	2	5	24	7	720
1,5	0,8862	3,5	3,3233	5,5	52,342	7,5	1871,2
2	1	4	6	6	120	8	5040

Ravnomerna raspodela

Gustina raspodele: (slika 13)

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < a \\ \frac{1}{b-a}, & a \leq t \leq b \\ 0, & t > b \end{cases}$$

Funkcija raspodele:

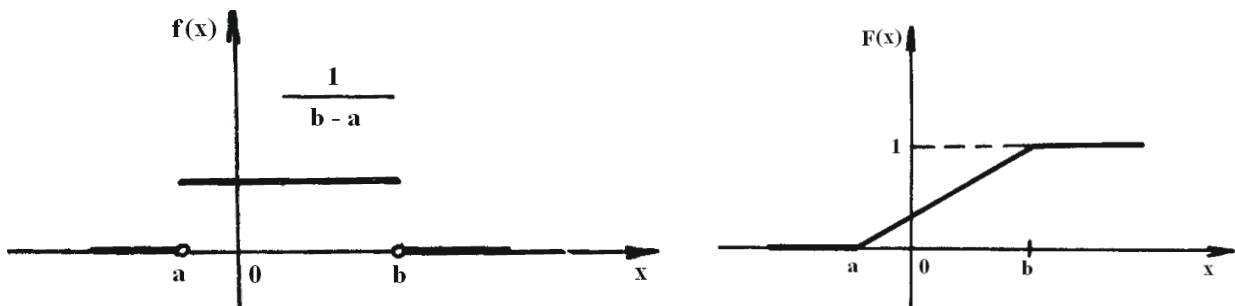
$$F(t) = \begin{cases} 0, & t \leq a \\ \frac{t-a}{b-a}, & a < t < b \\ 0, & t \geq b \end{cases}$$

Matematičko očekivanje (srednje vreme bezotkaznog rada):

$$T_0 = M(t) = \frac{b+a}{2}.$$

Disperzija:

$$D(t) = \frac{(b-a)^2}{12}.$$



Slika 13. Ravnomerna raspodela.

Binomna raspodela

Funkcija gustine verovatnoće: (slika 14)

$$f(x) = P(X = x) = \binom{n}{x} \cdot p^x \cdot (1-p)^{n-x}, \quad x = 0, 1, 2, \dots, n$$

gde je:

$$\binom{n}{x} = \frac{n!}{x!(n-x)!}.$$

Kumulativna funkcija raspodele:

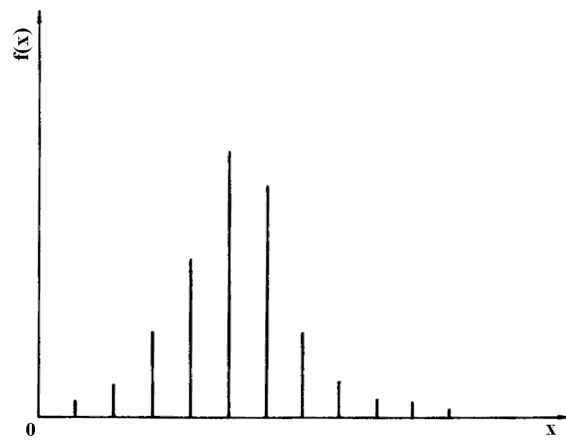
$$F(x) = P(X \leq x) = \sum_{i=0}^x \binom{n}{i} \cdot p^i \cdot (1-p)^{n-i}.$$

Matematičko očekivanje:

$$M(x) = n \cdot p.$$

Disperzija:

$$D(x) = n \cdot p \cdot (1-p).$$



Slika 14. Binomna raspodela.

Poasonova raspodela

Funkcija gustine verovatnoće: (slika 15)

$$f(x) = P(X = x) = \frac{(\lambda \cdot t)^x \cdot e^{-\lambda \cdot t}}{x!}, x = 0, 1, 2, \dots$$

Kumulativna funkcija raspodele:

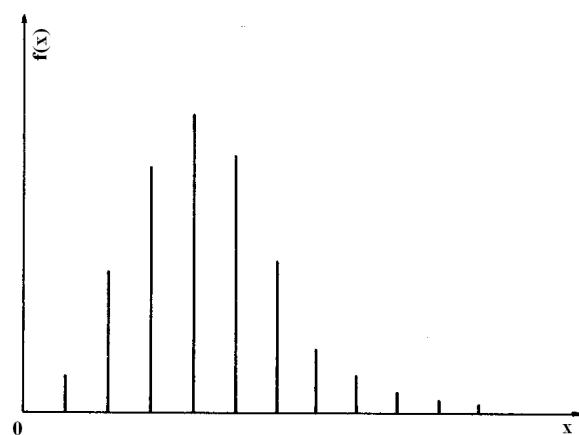
$$F(x) = P(X \leq x) = \sum_{i=0}^x \frac{(\lambda \cdot t)^i \cdot e^{-\lambda \cdot t}}{i!}.$$

Matematičko očekivanje:

$$M(x) = \lambda \cdot t.$$

Disperzija:

$$D(x) = M(x) = \lambda \cdot t.$$



Slika 15. Poasonova raspodela.

Određivanje parametara pojedinih raspodela na osnovu uzorka

Srednja vrednost uzorka (srednje vreme bezotkaznog rada) i disperzija uzorka određuje se:

$$M(T) = T_0 \approx \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i,$$

$$D(T) \approx \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - T_0)^2.$$

Normalna raspodela:

Srednja vrednost: $T_0 \approx \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i,$

Disperzija: $\sigma^2 = D(T) \approx \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - T_0)^2.$

Eksponencijalna raspodela

$$\lambda_1 = \frac{1}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i - \gamma} = \frac{1}{T_0 - \gamma} \text{ - na osnovu srednje vrednosti uzorka } M(T),$$

$$\lambda_2 = \left[\frac{1}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - T_0)^2} \right]^{1/2} = \left[\frac{1}{D(T)} \right]^{1/2} \text{ - na osnovu disperzije uzorka } D(T),$$

$$\lambda = \frac{1}{2} \cdot (\lambda_1 + \lambda_2); \quad \gamma = t_{\min} \text{ - minimalni član uzorka.}$$

Vejbulova raspodela

Rešavanjem sistema transcendentnih jednačina:

$\gamma = t_{\min}$ - minimalni član uzorka,

$$M(T) = T_0 : \quad \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right),$$

$$D(T) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - T_0)^2 = \eta^2 \cdot \left[\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \right],$$

dobijaju se parametri γ , β i η Vejbulove raspodele.

Kada se jednom utvrdi pripadnost uzorka određenoj teorijskoj raspodeli, tada se sve operacije vezane za izračunavanje funkcije pouzdanosti, intenziteta otkaza, za posmatrani element sistema, određuju na osnovu dobijene teorijske raspodele.

Složena pouzdanost elementa (*21)**

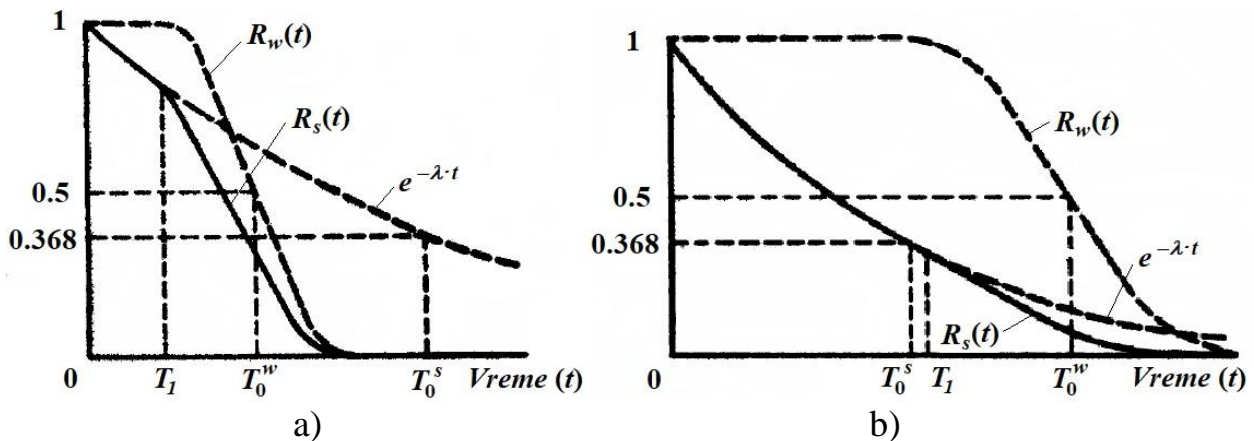
Ako se posmatra rad elementa u odnosu na slučajne otkaze i otkaze zbog dotrajalosti tokom radnog veka, od vremenskog trenutka $t = 0$ kad je element počeo da radi, do nekog vremenskog trenutka t , dobija se zapravo njegova složena pouzdanost (combined reliability). Element će raditi trenutka kada se dogodi prvi otkaz, bilo da je to slučajan otkaz ili otkaz nastao zbog dotrajalosti. Ova složena pouzdanost $R_s(t)$ predstavlja proizvod pouzdanosti u odnosu na slučajne otkaze i pouzdanosti u odnosu na otkaze zbog dotrajalosti:

$$R_s(t) = e^{-\lambda \cdot t} \cdot R_w(t),$$

gde je:

- $\lambda = \text{const.}$ - intenzitet otkaza elementa u odnosu na slučajne otkaze,
- $R_w(t)$ - pouzdanost elementa u odnosu na otkaze zbog dotrajalosti.

U zavisnosti od odnosa T_0^s - srednjeg vreme rada do otkaza u slučaju slučajnih otkaza i T_0^w - srednjeg vreme rada do otkaza u slučaju otkaza zbog dotrajalosti, kriva složene pouzdanosti elementa može da ima dva oblika. Prvi kad je $T_0^s > T_0^w$ (slika 16a) i drugi kad je $T_0^w > T_0^s$ (slika 16b).



Slika 16. Kriva složene pouzdanosti elementa $R_s(t)$.

Od početka rada elementa pa do vremenskog trenutka T_1 , rezultujuća (složena) pouzdanost elementa $R_s(t)$ je jednaka pouzdanosti elementa u odnosu na slučajne otkaze. Drugim rečima u intervalu $(0, T_1)$ pouzdanost elementa u odnosu na otkaze zbog dotrajalosti je jednaka 1 ($R_w(t) = 1$) i ne utiče na rezultujuću pouzdanost. Posle vremenskog trenutka T_1 , pouzdanost elementa u odnosu na otkaze zbog dotrajalosti se smanjuje ($R_w(t) < 1$), tako da rezultujuća pouzdanost elementa

$R_s(t)$ zavisi i od pouzdanosti elementa u odnosu na slučajne otkaze i od pouzdanosti elementa u odnosu na otkaze zbog dotrajalosti.

PITANJA:

1. Definicija elementa sa stanovišta pouzdanosti.
2. Troškovi pouzdanosti.
3. Osnovna stanja sistema u procesu održavanja.
4. Definicija i podela otkaza (kvarova).
5. Potpun otkaz.
6. Delimičan otkaz.
 - a) Podela delimičnih otkaza po nastanku.
 - b) Podela delimičnih otkaza prema postupku u slučaju njihove pojave.
7. Definicija neispravnosti.
8. Definicija funkcije nepouzdanosti.
9. Definicija funkcije pouzdanosti.
10. Grafički prikaz funkcija nepouzdanosti i pouzdanosti.
11. Pokazatelji pouzdanosti.
 - a) Srednje vreme bezotkaznog rada.
 - b) Disperzija vremena bezotkaznog rada.
12. Definicija intenziteta otkaza.
13. Veza funkcije pouzdanosti i intenziteta otkaza.
14. Pouzdanost elementa na vremenskom intervalu.
15. Intenzitet otkaza u zavisnosti od vremena.
16. Raspodele koje opisuju intenzitet otkaza u zavisnosti od vremena.
17. Eksponencijalna raspodela.
18. Normalna raspodela.
19. Vejbulova raspodela.
20. Slučajevi kada može intenzitet otkaza može smatrati konstantnim
21. Složena pouzdanost elementa.