Razvojna vrednotenja
Predloge k predavanjem

Nagode Marko
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Strojništvo
Aškerčeva 6, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

30. julij 2012

Poglavje 1

Uvod

Razlogi, ki lahko privedejo do okvare

- napačna konstrukcija,
- napake v proizvodnji,
- napačna uporaba,
- človeška napaka,
- neprimerno vzdrževanje,
- neprimerna kontrola kakovosti,
- obremenitve iz okolja ipd.

Posledice okvar so lahko

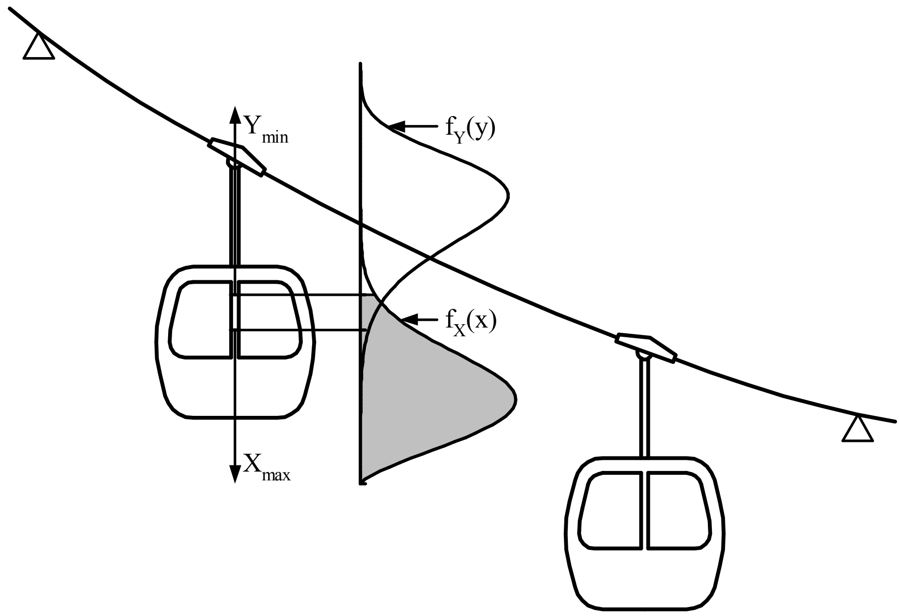
- tako neznatne, da jih uporabnik niti ne opazi,
- lahko pa privedejo do katastrofalnih posledic za človeka in okolje.

Pri vrednotenju na varnost sklepamo, da bo izdelek obratoval varno, če bo

$$\frac{Y_{\text{min}}}{X_{\text{max}}} \geq \text{SF}$$

Sodoben razvojni proces poleg vrednotenj na

- funkcionalnost,
- varnost,
- stroške življenjskega cikla,



Slika 1.1: Krožna kabinska žičnica.

- ekološko vrednost,
- tehnologičnost,
- estetsko vrednost,
- uporabno vrednost,
- ergonomičnost,
- primernost za reciklažo, itd.

obsega še vrednotenja na

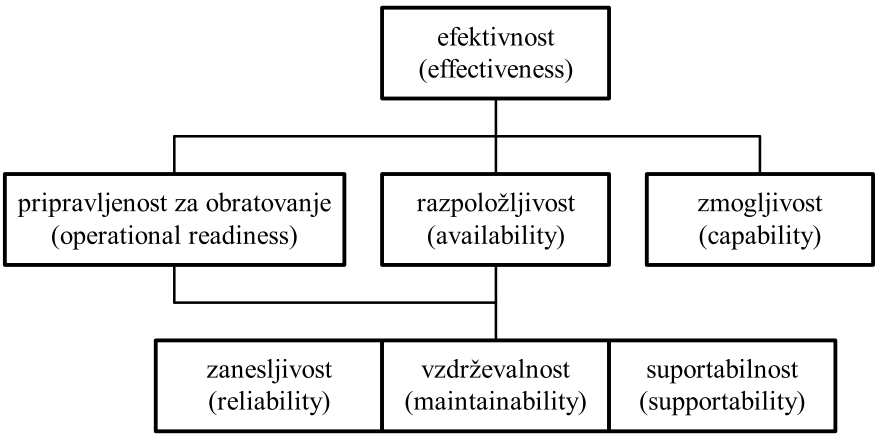
- zanesljivost,
- vzdrževalnost,
- suportabilnost,
- razpoložljivost,
- efektivnost in
- vrednost izdelka.

1.1 Koncept, osnovni pojmi in definicije

Končni cilj vsakega izdelka je kakovostno opravljanje zahtevanih funkcij v okviru dopustnih odstopanj določen čas pri določenih pogojih uporabe, pogojih okolja in pogojih vzdrževanja, ob sprejemljivih stroških in s čim manjšim obremenjevanjem okolja. Funkcijo je mogoče opisati z izhodnimi karakteristikami izdelka (kakovost prenosa sporočila v komunikacijskih sistemih, nosilnost transportne naprave ali zanesljivost zavore), kakovost izdelka pa določajo zanesljivost, vzdrževalnost, suportabilnost, razpoložljivost, efektivnost in vrednost.

Zanesljivost je verjetnost, da bo izdelek določen čas pri določenih pogojih uporabe in pogojih okolja opravljal zahtevane funkcije v okviru dopustnih odstopanj. Pred napovedjo zanesljivosti je potrebno jasno definirati okvare, jih povezati s funkcijami izdelka in izbrati enoto časa. Izbrani časovni interval je lahko opredeljen s koledarskim časom, v letih, urah ali s številom ciklov. Cikel je lahko obrat motorja, obremenitveni cikel ali blok časovne zgodovine obremenitve. Pogoji uporabe in pogoji okolja, v katerih izdelek obratuje, morajo ustrezati projektnim zahtevam.

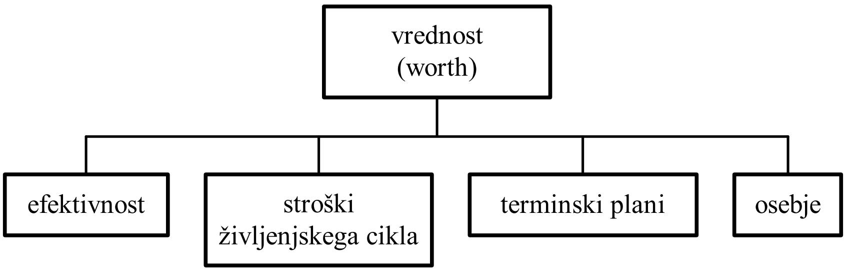
Vzdrževalnost je verjetnost, da bo izdelek, ki se nahaja v stanju nedelovanja, po določenem času in pod določenimi pogoji vzdrževanja mogoče vrniti v stanje delovanja. Vzdrževalnost je običajno funkcija časa in je odvisna od časa popravila. Zakasnitev logistične podpore in zakasnitev vzdrževanja v času popravila nista zajeta in ju praviloma obravnavamo ločeno.



Slika 1.2: Elementi efektivnosti izdelka.

Suportabilnost je definirana kot stopnja, do katere karakteristike izdelka in načrtovani podporni resursi vključno z osebjem dosegajo projektne zahteve. Suportabilnost je funkcija časa in je odvisna od zakasnitve logistične podpore in zakasnitve vzdrževanja.

Zanesljivost, vzdrževalnost in suportabilnost se na višjem nivoju povezujejo v razpoložljivost. **Razpoložljivost** je verjetnost, da bo izdelek v določenem trenutku ali določenem časovnem intervalu, pri določenih pogojih uporabe, pogojih okolja in pogojih vzdrževanja v stanju delovanja. Razpoložljivost je vedno večja ali enaka zanesljivosti, uporabljamo



Slika 1.3: Elementi vrednosti izdelka.

pa jo za izdelke, ki jih popravljamo. Če izdelka ne popravljamo, je razpoložljivost enaka zanesljivosti.

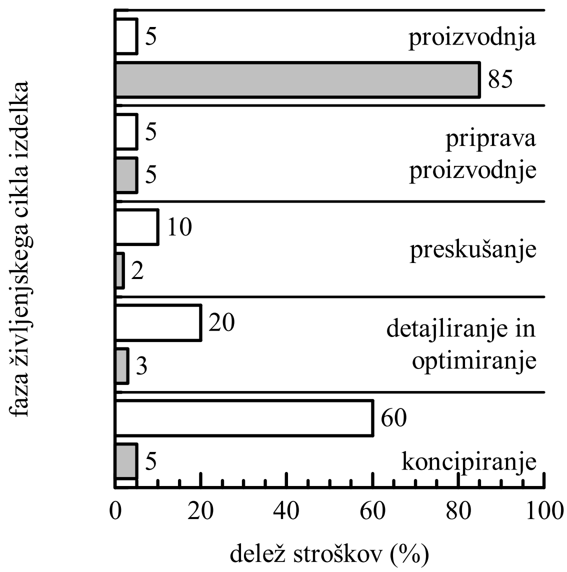
V najširšem smislu določata kakovost izdelka njegovi efektivnost in vrednost. **Efektivnost** je verjetnost, da bo izdelek pri določenih pogojih uporabe, pogojih okolja in pogojih vzdrževanja glede na pripravljenost za obratovanje, razpoložljivost in zmogljivost dosegal projektne zahteve. **Pripravljenost za obratovanje** ustreza vektorju stanj ob prvem vstopu v delovanje, **zmogljivost** pa podaja verjetnost, da bo izdelek glede na stanje, v katerem se nahaja, izpolnil zahtevane funkcije. Razčlenitev efektivnosti prikazuje Slika 1.2.

Vrednost izdelka povezuje efektivnost, stroške življenjskega cikla, terminske plane in osebje (Slika 1.3). Dosedanje analize so pokazale, da je stroške življenjskaga cikla mogoče znižati, če posvetimo dovolj veliko pozornost zanesljivosti, vzdrževalnosti in suportabilnosti že v zgodnjih fazah življenjskega cikla izdelka. Če želimo povečati vrednost, moramo dvigniti efektivnost ob minimalnih stroških, v čim krajšem času in s čim manj osebja.

1.2 Atributi izdelka

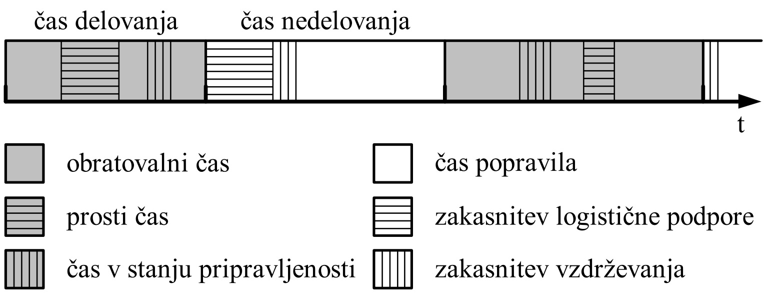
performanse	**efektivnost**	**vrednost**
obratovalne	zanesljivost	- efektivnost
- doseg	- izbor materialov in delov	- zaključni stroški
- hitrost	- podobremenitev	- obratovalni in podporni stroški
- razred natančnosti	- analiza obremenitev in zdržljivosti	- preostala vrednost
- občutljivost	- kompleksnost in tehnologija	- terminski plani
- koristen tovor	- redundanca	- osebje
- izhodna moč	vzdrževalnost	
- enostavna uporaba	- izolacija okvar in diagnostika	
fizične	- standardizacija in izmenljivost delov	
- volumen in gostota	- modularnost in dostopnost	
- masa	- popravilo ali zamenjava	
- oblika	- proaktivno vzdrževanje	
funkcionalne	suportabilnost	
- varnost	- število redundantnih komponent	
- stopnja izpolnitve funkcije	- število rezervnih delov	
	- število vzdrževalnih kanalov	
	razpoložljivost	

Tabela 1.1: Atributi izdelka.



Slika 1.4: Razčlenitev stroškov po fazah življenjskega cikla izdelka.

1.3 Osnovne časovne delitve



Slika 1.5: Časovna slika stanj izdelka.

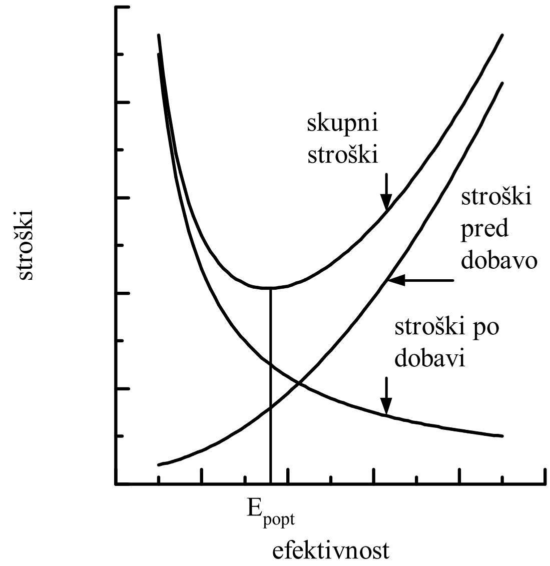
Čas delovanja lahko vključuje

- obratovalni čas,
- prosti čas in čas v stanju pripravljenosti.

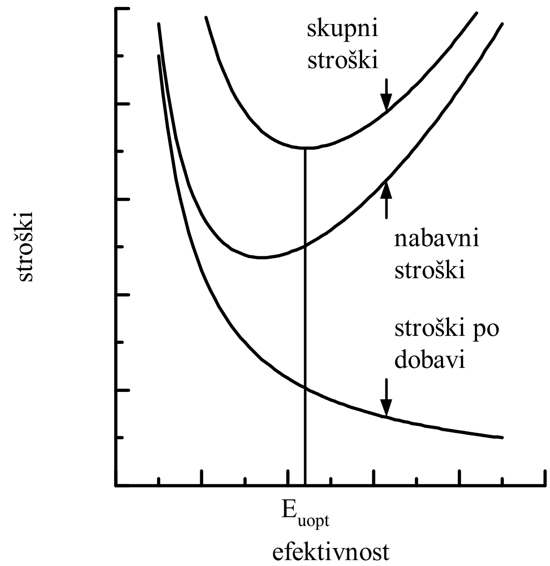
Obratovalni čas je čas, v katerem izdelek opravlja zahtevane funkcije v okviru dopustnih odstopanj. V prostem času ni potrebe po obratovanju, v času pripravljenosti pa izdelek izvaja le omejeno število funkcij oziroma ne obratuje. Prosti čas in čas v stanju pripravljenosti se razlikujeta predvsem v hitrosti prehoda izdelka v stanje obratovanja. Čas nedelovanja se deli na

- zakasnitev logistične podpore,
- zakasnitev vzdrževanja in
- čas popravila.

1.4 Efektivnost in stroški



Slika 1.6: Efektivnost in stroški proizvajalca.



Slika 1.7: Efektivnost in stroški uporabnika.

Poglavje 2

Osnovni modeli zanesljivosti

Razlikujemo štiri karakteristične funkcije, s katerimi popišemo zanesljivost izdelka

- funkcijo zanesljivosti,
- kumulativno funkcijo okvar,
- gostoto porazdelitve verjetnosti okvar in
- intenzivnost okvar.

Z naštetimi funkcijami lahko izračunamo še

- srednji čas do okvar,
- varianco okvar ter
- mediano in mod gostote porazdelitve verjetnosti okvar.

2.1 Porazdelitvena funkcija okvar

Zanesljivost $R(t)$ je verjetnost, da bo čas do okvare $T \geq 0$

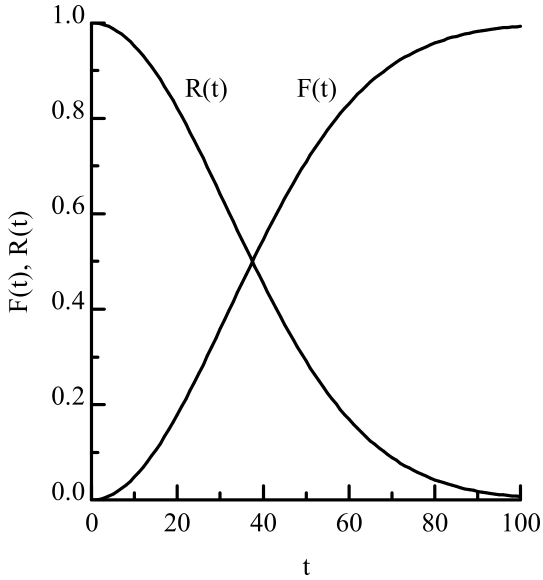
$$R(t) = \Pr\{T \geq t\} = \int_t^\infty f(t)dt \tag{2.1}$$

Kumulativna funkcija okvar $F(t)$ je verjetnost, da bo okvara nastopila pred t

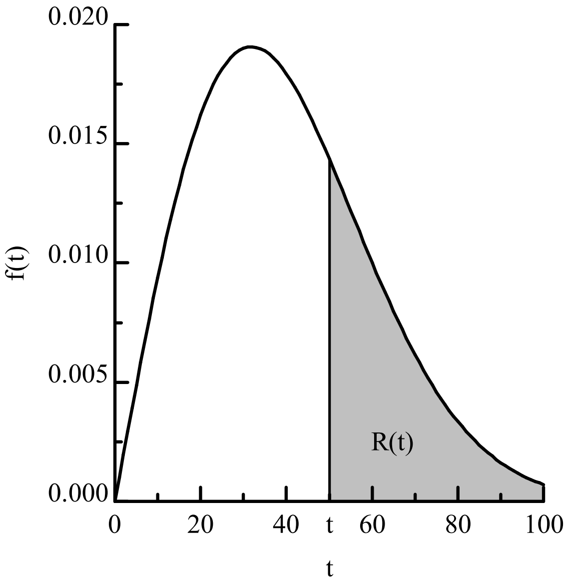
$$F(t) = \Pr\{T < t\} = 1 - R(t) = \int_0^t f(t)dt \tag{2.2}$$

Gostota porazdelitve verjetnosti okvar je definirana kot

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \tag{2.3}$$



Slika 2.1: Funkcija zanesljivosti in kumulativna funkcija okvar.



Slika 2.2: Gostota porazdelitve verjetnosti okvar.

2.2 Srednji čas do okvar

Pričakovani ali srednji čas do okvar MTTF je definiran kot

$$\mathrm{MTTF} = E[T] = \int_0^\infty t f(t) dt \tag{2.4}$$

Pokazati je mogoče, da je

$$\mathrm{MTTF} = \int_0^\infty R(t) dt \tag{2.5}$$

Medialni čas okvar t_{med}

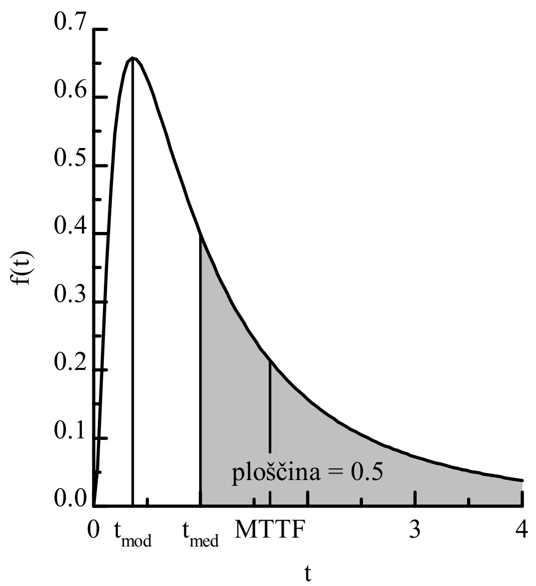
$$R(t_{\mathrm{med}}) = \Pr\{T \geq t_{\mathrm{med}}\} = 0.5$$

Mod gostote porazdelitve verjetnosti okvar t_{mod}

$$f(t_{\mathrm{mod}}) = \max_{0 \leq t < \infty} f(t)$$

Varianca okvar

$$\sigma^2 = E[(T - \mathrm{MTTF})^2] = \int_0^\infty (t - \mathrm{MTTF})^2 f(t) dt \tag{2.6}$$



Slika 2.3: Primerjava med srednjim časom do okvar, mediano in modom.

2.3 Intenzivnost okvar

Intenzivnost okvar $\lambda(t)$ odraža trenutno okvarljivost pri pogoju, da je izdelek do trenutka t v stanju delovanja.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \tag{2.7}$$

Zanesljivost kot funkcija intenzivnosti okvar

$$R(t) = \exp\left\{-\int_0^t \lambda(t)dt\right\} \tag{2.8}$$

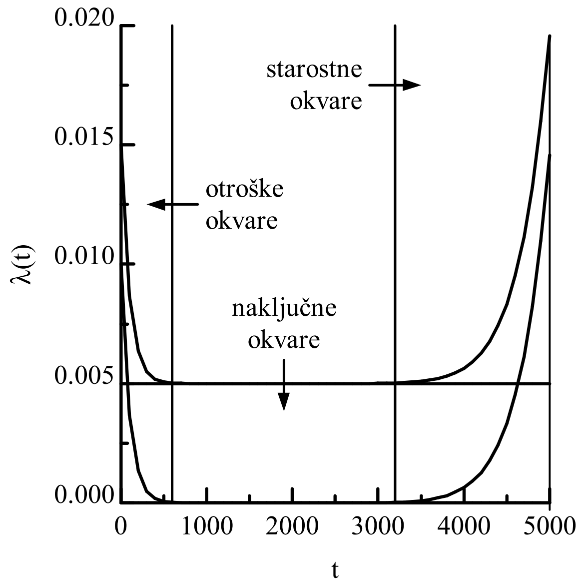
Kumulativna intenzivnost okvar

$$L(t) = \int_0^t \lambda(t)dt \tag{2.9}$$

Povprečna intenzivnost okvar v intervalu $t_1 \leq T \leq t_2$

$$\mathrm{AFR}(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t)dt \tag{2.10}$$

2.4 Diagram banje



Slika 2.4: Diagram banje.

vrsta okvare	**model**	**vzrok okvare**	**preprečevanje**
otroške okvare	DFR	okvare zaradi izdelave izdelki v stanju nedelovanja neprimerna kontrola kakovosti umazanija nestrokovnost	testiranje na utekanje monitoring kontrola kakovosti test sprejemljivosti
naključne okvare	CFR	obratovalni pogoji pogoji okolja človeška napaka naključni dogodki	redundanca varnostni faktor
starostne okvare	IFR	utrujenost materiala korozija staranje obraba	podobremenitev preventivno vzdrževanje zamenjava tehnologija

Tabela 2.1: Vrste, vzroki in preprečevanje okvar.

2.5 Pogojna zanesljivost

Pogojna zanesljivost je verjetnost, da bo izdelek v stanju delovanja do trenutka t pri pogoju, da je bil v stanju delovanja v času utekanja oziroma garancijske dobe T_0.

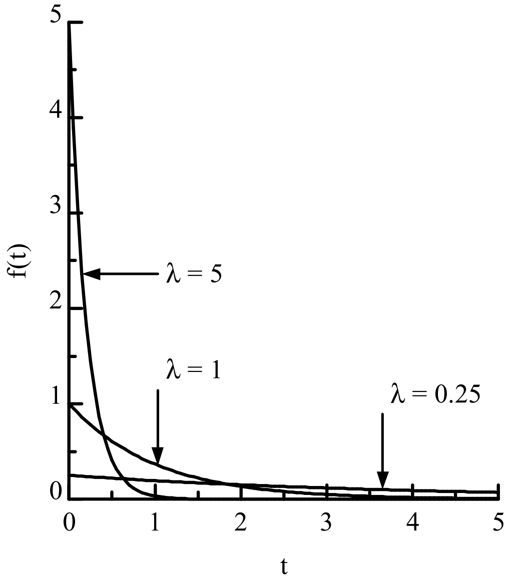
$$R(t|T_0) = \frac{R(t+T_0)}{R(T_0)} \tag{2.11}$$

Srednji čas do okvar z upoštevanjem časa T_0

$$\mathrm{MTTF}(T_0) = \frac{1}{R(T_0)} \int_{T_0}^{\infty} R(t)dt \tag{2.12}$$

2.6 Modeli zanesljivosti

2.7 Eksponentna porazdelitev



Slika 2.5: Eksponentna gostota porazdelitve verjetnosti okvar.

Zanesljivost

$$R(t) = \exp\left\{-\lambda \int_0^t dt\right\} = e^{-\lambda t} \tag{2.13}$$

Kumulativna funkcija okvar

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \tag{2.14}$$

Eksponentna gostota porazdelitve verjetnosti okvar

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} \tag{2.15}$$

Srednji čas do okvar

$$\mathrm{MTTF} = \frac{1}{\lambda} \tag{2.16}$$

Varianca okvar

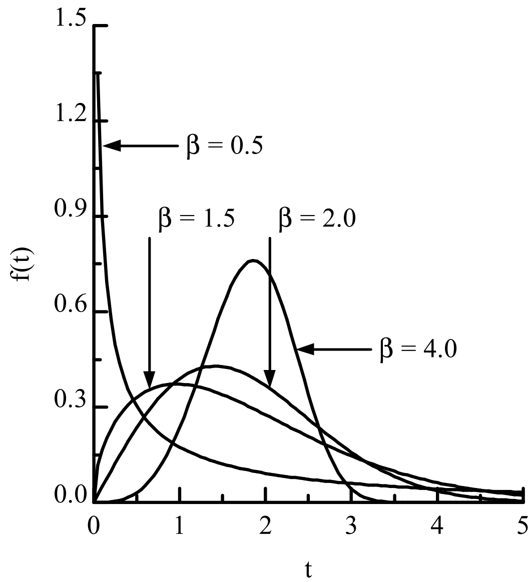
$$\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2} \tag{2.17}$$

Verjetnost, da bo izdelek v stanju delovanja do MTTF

$$R(\mathrm{MTTF}) = e^{-\mathrm{MTTF}/\mathrm{MTTF}} = e^{-1} = 0.367879$$

CFR model je brez spomina.

2.8 Weibullova porazdelitev



Slika 2.6: Weibullova gostota porazdelitve verjetnosti okvar za $\theta = 2.0$.

Intenzivnosti okvar

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\theta}\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \qquad \text{za } \theta > 0,\ \beta > 0 \text{ in } t \geq 0$$

Zanesljivost

$$R(t) = \exp\left\{-\int_0^t \frac{\beta}{\theta}\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} dt\right\} = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}} \tag{2.18}$$

Gostota porazdelitve verjetnosti okvar

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta}\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}} \tag{2.19}$$

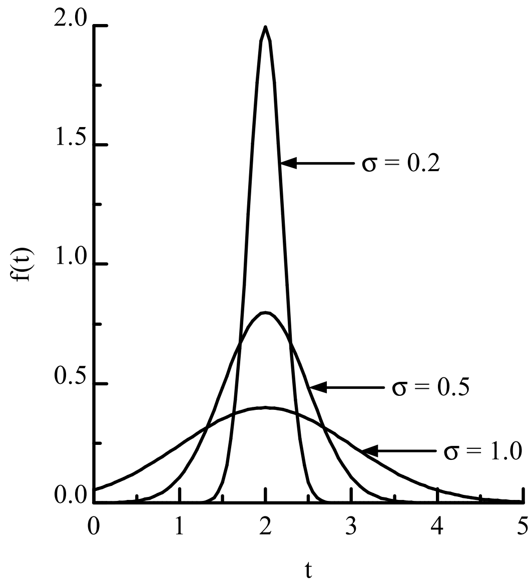
Srednji čas do okvar

$$\text{MTTF} = \theta\Gamma[1 + 1/\beta] \tag{2.20}$$

Varianca okvar

$$\sigma^2 = \theta^2(\Gamma[1 + 2/\beta] - \Gamma^2[1 + 1/\beta]) \tag{2.21}$$

2.9 Normalna porazdelitev



Slika 2.7: Normalna gostota porazdelitve verjetnosti okvar za $\mu = 2.0$.

Normalna gostota porazdelitve verjetnosti okvar

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \tag{2.22}$$

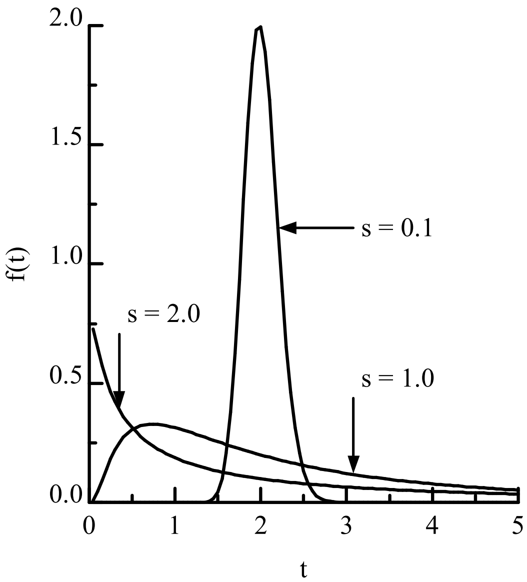
Funkcija zanesljivosti

$$R(t) = 1 - \Phi((t-\mu)/\sigma) \tag{2.23}$$

Srednji čas do okvar

$$\text{MTTF} = \mu \tag{2.24}$$

2.10 Lognormalna porazdelitev



Slika 2.8: Lognormalna gostota porazdelitve verjetnosti okvar za $t_{\text{med}} = 2.0$.

Lognormalna gostota porazdelitve verjetnosti okvar

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}ts} \exp\left\{-\frac{1}{2}\frac{(\ln(t/t_{\text{med}}))^2}{s^2}\right\} \tag{2.25}$$

Zanesljivost izrazimo z Laplaceovo funkcijo

$$R(t) = 1 - \Phi((\ln t - \ln t_{\text{med}})/s) \tag{2.26}$$

Srednji čas do okvar

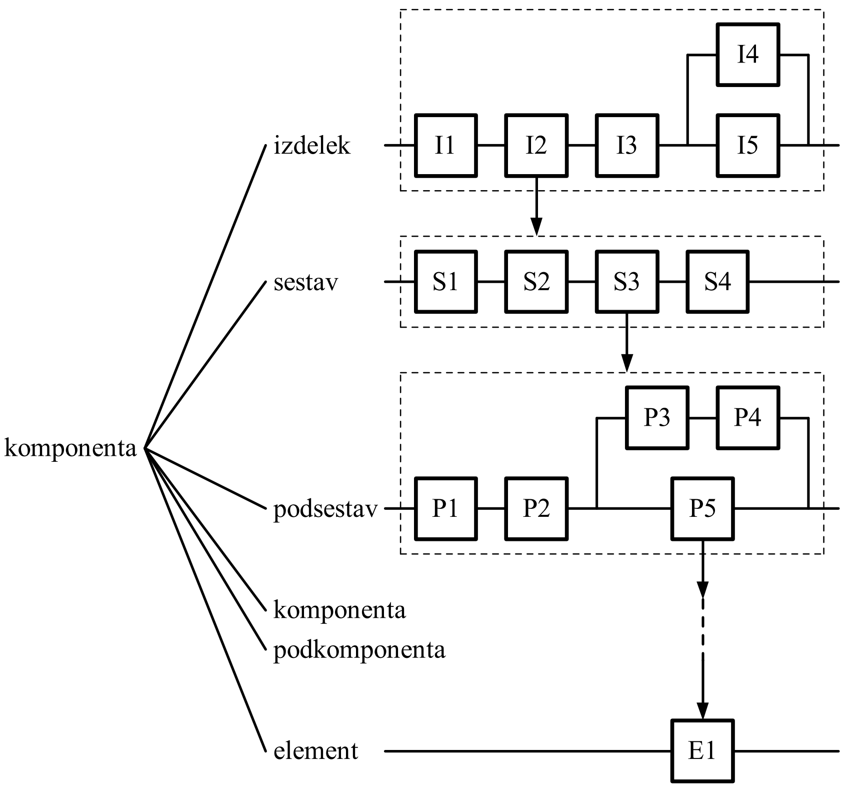
$$\text{MTTF} = t_{\text{med}} \exp(s^2/2) \tag{2.27}$$

Varianca okvar

$$\sigma^2 = t_{\text{med}}^2 \exp s^2(\exp s^2 - 1) \tag{2.28}$$

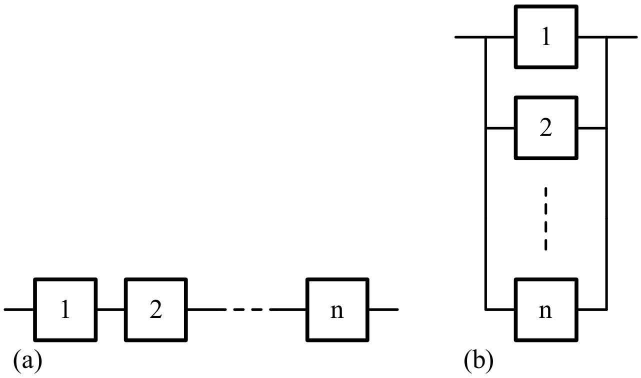
Poglavje 3

Zanesljivost sestavljenih izdelkov



Slika 3.1: Blokovni diagram sestavljenega izdelka.

3.1 Zaporedne in paralelne vezave



Slika 3.2: Zaporedna vezava n komponent (a) in paralelna vezava n komponent (b).

Zanesljivost n zaporedno vezanih komponent

$$R_{\mathrm{s}}(t) = \prod_{i=1}^{n} R_i(t) \tag{3.1}$$

Zanesljivost izdelka, sestavljenega iz n statistično neodvisnih in paralelno vezanih komponent

$$R_{\mathrm{s}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - R_i(t)) \tag{3.2}$$

n	**zaporedna vezava**	**paralelna vezava**
1	9.000000E-01	9.000000E-01
2	8.100000E-01	9.900000E-01
3	7.290000E-01	9.990000E-01
4	6.561000E-01	9.999000E-01
5	5.904900E-01	9.999900E-01
6	5.314410E-01	9.999990E-01
7	4.782969E-01	9.999999E-01
8	4.304672E-01	1.000000E+00
9	3.874205E-01	1.000000E+00
10	3.486784E-01	1.000000E+00

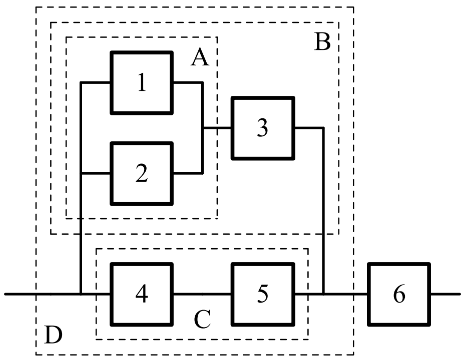
Tabela 3.1: Vpliv števila komponent n, zanesljivosti $R = 0.9$ na zanesljivost zaporedne in paralelne vezave.

3.2 Paralelne vezave k od n

Pogoj za delovanje izdelka je sočasno delovanje vsaj k od n komponent. Verjetnost, da bo vsaj k od skupno n enakih, statistično neodvisnih, paralelno vezanih komponent delovalo, je

$$R_{\mathrm{s}}(t) = \sum_{i=k}^{n} \binom{n}{i} R(t)^i (1 - R(t))^{n-i} \tag{3.3}$$

3.3 Kombinirane vezave



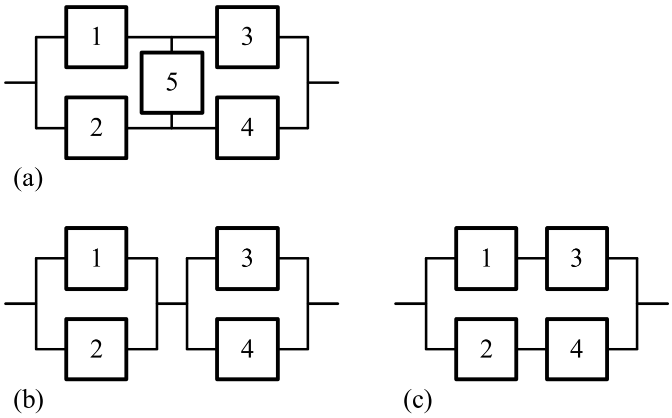
Slika 3.3: Kombinirana vezava.

3.4 Kompleksne vezave

Blokovne diagrame, ki jih ni mogoče razčleniti na zaporedne in paralelne rešujemo po metodi

- dekompozicije,
- naštevanja,
- minimalnih poti,
- minimalnih rezov in z
- Monte Carlo simulacijami.

3.4.1 Dekompozicija



Slika 3.4: Kompleksna vezava (a), komponenta 5 v stanju delovanja (b) in komponenta 5 v stanju nedelovanja (c). $R_1 = R_2 = 0.90$, $R_3 = R_4 = 0.95$ in $R_5 = 0.80$.

3.4.2 Naštevanje

i	1	2	3	4	5	izdelek	P_i stanje delovanja	P_i stanje nedelovanja
1	S	S	S	S	S	S	0.584820	
2	F	S	S	S	S	S	0.064980	
3	S	F	S	S	S	S	0.064980	
4	S	S	F	S	S	S	0.030780	
5	S	S	S	F	S	S	0.030780	
6	S	S	S	S	F	S	0.146205	
7	F	F	S	S	S	F		0.007220
8	S	F	F	S	S	S	0.003420	
9	S	S	F	F	S	F		0.001620
10	S	S	S	F	F	S	0.007695	
11	F	S	F	S	S	S	0.003420	
12	F	S	S	F	S	S	0.003420	
13	F	S	S	S	F	S	0.016245	
14	S	F	S	F	S	S	0.003420	
15	S	F	S	S	F	S	0.016245	
16	S	S	F	S	F	S	0.007695	
17	F	F	F	S	S	F		0.000380
18	S	F	F	F	S	F		0.000180
19	S	S	F	F	F	F		0.000405
20	F	S	F	F	S	F		0.000180
21	F	S	S	F	F	F		0.000855
22	S	F	S	F	F	S	0.000855	
23	F	F	S	F	S	F		0.000380
24	F	F	S	S	F	F		0.001805
25	S	F	F	S	F	F		0.000855
26	F	S	F	S	F	S	0.000855	
27	F	F	F	F	S	F		0.000020
28	S	F	F	F	F	F		0.000045
29	F	S	F	F	F	F		0.000045
30	F	F	S	F	F	F		0.000095
31	F	F	F	S	F	F		0.000095
32	F	F	F	F	F	F		0.000005
							$\Sigma = 0.985815$	$\Sigma = 0.014185$

Slika 3.5: Metoda naštevanja za primer mostične vezave s Slike 3.4.

3.4.3 Funkcija strukture izdelka

Stanje $i$te komponente

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{komponenta v stanju delovanja} \\ 0 & \text{komponenta v stanju nedelovanja} \end{cases} \tag{3.4}$$

Če blokovni diagram vključuje n komponent, je vseh možnih stanj 2^n. Posamezno stanje popišemo z vektorjem stanja

$$\mathbf{X} = [X_1, \ldots, X_n] \tag{3.5}$$

in funkcijo strukture izdelka

$$\Psi(\mathbf{X}) = \begin{cases} 1 & \text{izdelek v stanju delovanja} \\ 0 & \text{izdelek v stanju nedelovanja} \end{cases} \tag{3.6}$$

V primeru zaporedne vezave je

$$\Psi(\mathbf{X}) = \prod_{i=1}^{n} X_i = \min\{X_1, \ldots, X_n\}$$

Funkcija strukture izdelka za paralelno vezavo

$$\Psi(\mathbf{X}) = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - X_i) = \max\{X_1, \ldots, X_n\}$$

Zanesljivost izdelka in funkcija strukture izdelka sta povezani

$$R_\mathrm{s} = E[\Psi(\mathbf{X})] = 0 \cdot \Pr\{\Psi(\mathbf{X}) = 0\} + 1 \cdot \Pr\{\Psi(\mathbf{X}) = 1\} \tag{3.7}$$

Iz (3.4) in (3.7) sledi

$$X_i^n = X_i \quad E[X_i] = R_i$$

Za izdelek, sestavljen iz n statistično neodvisnih in zaporedno vezanih komponent, velja

$$\begin{aligned} R_\mathrm{s} &= \Pr\{\Psi(\mathbf{X}) = 1\} \\ &= \Pr\{\min\{X_1, \ldots, X_n\} = 1\} \\ &= \Pr\{X_1 = 1, \ldots, X_n = 1\} \\ &= \Pr\{X_1 = 1\} \cdots \Pr\{X_n = 1\} \\ &= R_1 \cdots R_n \end{aligned}$$

zanesljivost paralelne vezave statistično neodvisnih komponent pa je

$$\begin{aligned} R_\mathrm{s} &= \Pr\{\Psi(\mathbf{X}) = 1\} \\ &= 1 - \Pr\{X_1 = 0, \ldots, X_n = 0\} \\ &= 1 - \Pr\{X_1 = 0\} \cdots \Pr\{X_n = 0\} \\ &= 1 - (1 - R_1) \cdots (1 - R_n) \end{aligned}$$

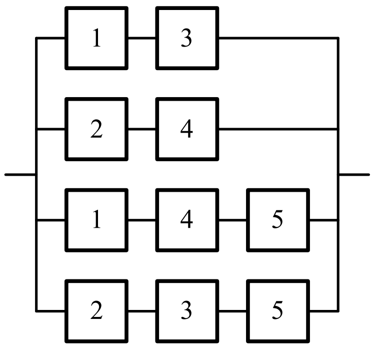
3.4.4 Koherentni izdelki

Izdelek je koherenten, če zvišanje zanesljivosti komponent ne povzroči znižanja zanesljivosti izdelka. Funkcija strukture koherentnega izdelka je monotono naraščajoča, saj za $\mathbf{Y} \geq \mathbf{X}$ velja $\Psi(\mathbf{Y}) \geq \Psi(\mathbf{X})$.

3.4.5 Minimalne poti in rezi

i	minimalna pot P_i	vektor minimalne poti X_i
1	{1,3}	[1,0,1,0,0]
2	{2,4}	[0,1,0,1,0]
3	{1,4,5}	[1,0,0,1,1]
p = 4	{2,3,5}	[0,1,1,0,1]

Tabela 3.2: Minimalne poti mostične vezave.



Slika 3.6: Nadomestna paralelna vezava po metodi minimalnih poti.

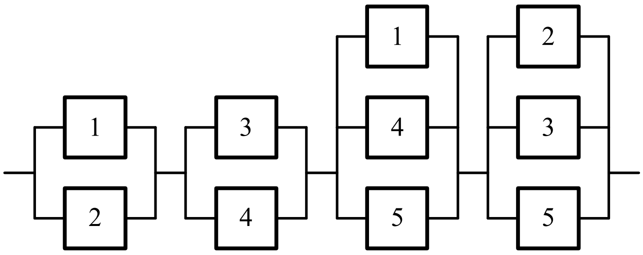
Pot je definirana kot množica komponent v stanju delovanja, ki zagotavlja, da se izdelek nahaja v stanju delovanja. Minimalna pot P_i je minimalna množica komponent v stanju delovanja, ki še zagotavlja delovanje izdelka. Število minimalnih poti je navzgor omejeno in ga označimo s p. Vektor stanja $\mathbf{X}$ je vektor minimalne poti, če je $\Psi(\mathbf{X}) = 1$ in če je $\mathbf{X} < \mathbf{Y}$ za vsak $\mathbf{Y}$, za katerega velja $\Psi(\mathbf{Y}) = 1$.

Funkcijo strukture izdelka izpeljemo po pravilih, ki veljajo za računanje zanesljivosti

$$\Psi(\mathbf{X}) = 1 - \prod_{i=1}^{p}(1 - \prod_{j \in P_i} X_j) \tag{3.8}$$

i	minimalni rez C_i	vektor minimalnega reza X_i
1	{1,2}	[0,0,1,1,1]
2	{3,4}	[1,1,0,0,1]
3	{1,4,5}	[0,1,1,0,0]
c = 4	{2,3,5}	[1,0,0,1,0]

Tabela 3.3: Minimalni rezi mostične vezave.



Slika 3.7: Nadomestna zaporedna vezava po metodi minimalnih rezov.

Rez je definiran kot množica komponent v stanju nedelovanja, ki povzroči, da se izdelek nahaja v stanju nedelovanja. Minimalni rez C_i je minimalna množica komponent v stanju nedelovanja, ki že zagotavlja nedelovanje izdelka. Število minimalnih rezov c je navzgor omejeno. $\mathbf{X}$ je vektor minimalnega reza, če je $\Psi(\mathbf{X}) = 0$ in če je $\mathbf{X} > \mathbf{Y}$ za vsak $\mathbf{Y}$, za katerega velja $\Psi(\mathbf{Y}) = 0$.

Funkcijo strukture izdelka tudi tokrat izpeljemo po pravilih, ki veljajo za računanje zanesljivosti

$$\Psi(\mathbf{X}) = \prod_{i=1}^{c}(1 - \prod_{j \in C_i}(1 - X_j)) \qquad (3.9)$$

3.4.6 Meje izdelka

Groba ocena zgornje meje zanesljivosti

$$R_{\mathrm{su}} = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - R_i) \tag{3.10}$$

Groba ocena spodnje meje zanesljivosti

$$R_{\mathrm{sl}} = \prod_{i=1}^{n} R_i \tag{3.11}$$

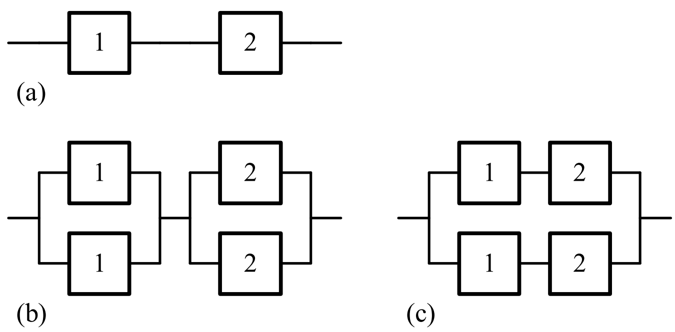
Zgornja meja zanesljivosti

$$R_{\mathrm{su}} = 1 - \prod_{i=1}^{p}(1 - \prod_{j \in P_i} R_j) \tag{3.12}$$

Spodnja meja zanesljivosti

$$R_{\mathrm{sl}} = \prod_{i=1}^{c}(1 - \prod_{j \in C_i}(1 - R_j)) \tag{3.13}$$

3.5 Redundanca na nizkem in visokem nivoju



Slika 3.8: Zaporedna vezava (a), redundanca na nizkem nivoju (b) in redundanca na visokem nivoju (c).

Zanesljivost izdelka z redundanco na nizkem nivoju

$$R_{\mathrm{l}} = (1 - (1 - R)^2)^2 = R^2(2 - R)^2$$

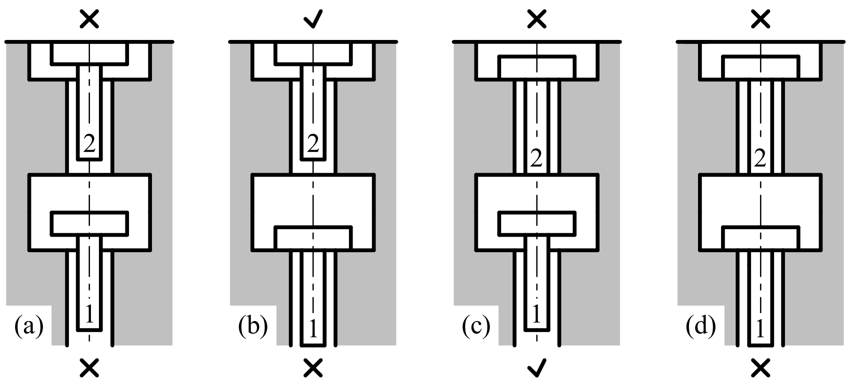
Zanesljivost izdelka z redundanco na visokem nivoju

$$R_{\mathrm{h}} = 1 - (1 - R^2)^2 = R^2(2 - R^2)$$

3.6 Komponente s tremi stanji

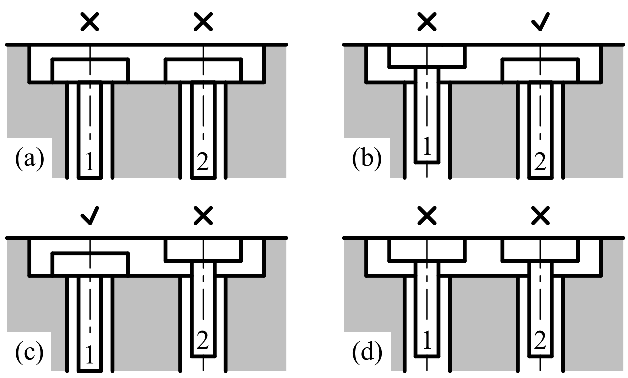
Za komponente s tremi stanji je značilno, da imajo poleg stanja delovanja dve stanji nedelovanja, npr. nedelovanje pri zapiranju (short failure) in nedelovanje pri odpiranju (open failure) ventila ali stikala.

3.6.1 Zaporedne vezave



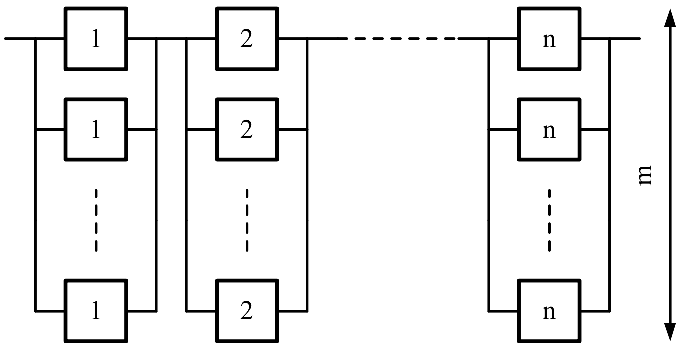
Slika 3.9: Zaporedna vezava. Nedelovanje obeh ventilov pri zapiranju (a), nedelovanje ventila 1 pri odpiranju (b), nedelovanje ventila 2 pri odpiranju (c) in nedelovanje obeh ventilov pri odpiranju (d).

3.6.2 Paralelne vezave



Slika 3.10: Paralelna vezava. Nedelovanje obeh ventilov pri odpiranju (a), nedelovanje ventila 1 pri zapiranju (b), nedelovanje ventila 2 pri zapiranju (c) in nedelovanje obeh ventilov pri zapiranju (d).

3.6.3 Redundanca na nizkem nivoju



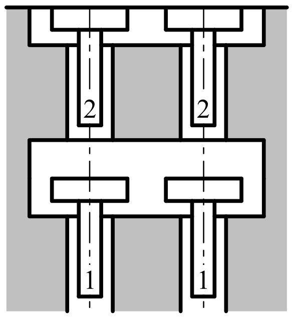
Slika 3.11: Blokovni diagram izdelka sestavljenega iz n zaporedno vezanih sestavov s po m paralelno vezanimi komponentami s tremi stanji.

i	**1** levi ventil	**1** desni ventil	**2** levi ventil	**2** desni ventil	**izdelek** pri zapiranju	**izdelek** pri odpiranju	$\mathbf{P_{si}}$ pri zapiranju	$\mathbf{P_{oi}}$ pri odpiranju
1	S	S	S	S	S	S		
2	F	S	S	S	S	S		
3	S	F	S	S	S	S		
4	S	S	F	S	S	S		
5	S	S	S	F	S	S		
6	F	F	S	S	S	F		0.002209
7	S	F	F	S	F	S	0.011475	
8	S	S	F	F	S	F		0.003249
9	F	S	S	F	F	S	0.011475	
10	F	S	F	S	F	S	0.011475	
11	S	F	S	F	F	S	0.011475	
12	F	F	F	S	F	F	0.002025	0.000141
13	S	F	F	F	F	F	0.001275	0.000171
14	F	S	F	F	F	F	0.001275	0.000171
15	F	F	S	F	F	F	0.002025	0.000141
16	F	F	F	F	F	F	0.000225	0.000009
							$F_s = 0.052725$	$F_o = 0.006091$

Tabela 3.4: Redundanca na nizkem nivoju za $n = m = 2$, $q_{o1} = 0.05$, $q_{o2} = 0.06$, $q_{s1} = 0.15$, $q_{s2} = 0.10$, $P_{s7} = (1 - q_{s1})q_{s1}q_{s2}(1 - q_{s2}) = 0.011475$, $P_{o8} = (1 - q_{o1})^2 q_{o2}^2 = 0.003249$ in $R_l = 1 - (F_o - F_s) = 0.941184$.

Zanesljivost izdelka z redundanco na nizkem nivoju

$$R_l = 1 - (F_o - F_s)$$

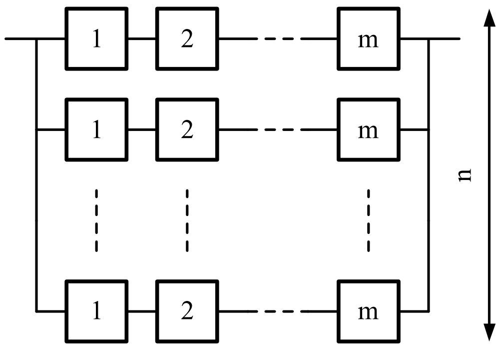


Slika 3.12: Redundanca na nizkem nivoju za $n = m = 2$.

V splošnem velja

$$R_{\mathrm{l}} = \prod_{i=1}^{n}(1 - q_{\mathrm{o}i}^{m}) - \prod_{i=1}^{n}(1 - (1 - q_{\mathrm{s}i})^{m}) \tag{3.14}$$

3.6.4 Redundanca na visokem nivoju



Slika 3.13: Blokovni diagram izdelka sestavljenega iz n paralelno vezanih sestavov s po m zaporedno vezanimi komponentami s tremi stanji.

Zanesljivost izdelka z redundanco na visokem nivoju

$$R_{\mathrm{h}} = \left(1 - \prod_{i=1}^{m} q_{\mathrm{s}i}\right)^{n} - \left(1 - \prod_{i=1}^{m}(1 - q_{\mathrm{o}i})\right)^{n} \tag{3.15}$$

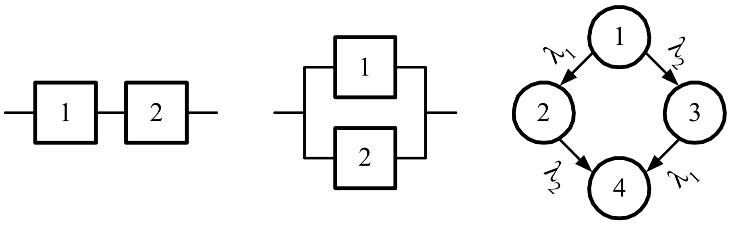
Poglavje 4

Izdelki, odvisni od stanja

4.1 Markova analiza

stanje	**1**	**2**	**izdelek** zaporedna vezava	**izdelek** paralelna vezava
1	S	S	S	S
2	F	S	F	S
3	S	F	F	S
4	F	F	F	F

Tabela 4.1: Možna stanja izdelka.



Slika 4.1: Blokovni diagram in diagram prehodov za izdelek sestavljen iz dveh neodvisnih komponent.

Zanesljivost izdelka, sestavljenega iz dveh zaporedno vezanih komponent

$$R_s(t) = P_1(t)$$

zanesljivost izdelka, sestavljenega iz dveh paralelno vezanih komponent

$$R_s(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t)$$

Ker se izdelek vedno nahaja v enem od stanj, lahko zapišemo

$$P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) = 1 \tag{4.1}$$

Če se izdelek v trenutku t nahaja v stanju 1, je verjetnost, da se bo v trenutku $t + \Delta t$ še vedno nahajal v istem stanju, enaka verjetnosti $P_1(t)$, zmanjšani za verjetnost prehoda v stanji 2 in 3. Verjetnost okvare v intervalu $t \leq T \leq t + \Delta t$ pod pogojem, da komponenta 1 deluje do trenutka t, je

$$\Pr\{t \leq T \leq t + \Delta t | T \geq t\} = \frac{R_1(t) - R_1(t + \Delta t)}{R_1(t)}$$

Verjetnost, da se bo izdelek v trenutku t nahajal v stanju 1 in da bo v intervalu $t \leq T \leq t + \Delta t$ prešel v stanje 2, ustreza povezani verjetnosti obeh dogodkov

$$\frac{R_1(t) - R_1(t + \Delta t)}{R_1(t)} P_1(t)$$

Verjetnost, da se bo izdelek v trenutku $t + \Delta t$ še vedno nahajal v stanju 1, je torej

$$\begin{aligned} P_1(t + \Delta t) = P_1(t) &- \frac{R_1(t) - R_1(t + \Delta t)}{R_1(t)} P_1(t) \\ &- \frac{R_2(t) - R_2(t + \Delta t)}{R_2(t)} P_1(t) \end{aligned} \tag{4.2}$$

Verjetnost, da se bo izdelek v trenutku $t + \Delta t$ nahajal v stanju 2, ustreza verjetnosti, da se izdelek v trenutku t nahaja v stanju 2, povečani za verjetnost prehoda iz stanja 1 v 2 in zmanjšani za verjetnost prehoda iz stanja 2 v 4

$$\begin{aligned} P_2(t + \Delta t) = P_2(t) &+ \frac{R_1(t) - R_1(t + \Delta t)}{R_1(t)} P_1(t) \\ &- \frac{R_2(t) - R_2(t + \Delta t)}{R_2(t)} P_2(t) \end{aligned} \tag{4.3}$$

Na podoben način lahko zapišemo verjetnost, da se bo izdelek v trenutku $t + \Delta t$ nahajal v stanju 3

$$\begin{aligned} P_3(t + \Delta t) = P_3(t) &+ \frac{R_2(t) - R_2(t + \Delta t)}{R_2(t)} P_1(t) \\ &- \frac{R_1(t) - R_1(t + \Delta t)}{R_1(t)} P_3(t) \end{aligned} \tag{4.4}$$

oziroma v stanju 4

$$\begin{aligned} P_4(t + \Delta t) = P_4(t) &+ \frac{R_2(t) - R_2(t + \Delta t)}{R_2(t)} P_2(t) \\ &+ \frac{R_1(t) - R_1(t + \Delta t)}{R_1(t)} P_3(t) \end{aligned} \tag{4.5}$$

Če enačbo (4.2) delimo z Δt, dobimo

$$\begin{aligned}\frac{P_1(t+\Delta t)-P_1(t)}{\Delta t} &= -\frac{R_1(t)-R_1(t+\Delta t)}{\Delta t R_1(t)}P_1(t) \\ &\quad - \frac{R_2(t)-R_2(t+\Delta t)}{\Delta t R_2(t)}P_1(t)\end{aligned}$$

Ker je v limiti

$$\lim_{\Delta t\to 0}\frac{P(t+\Delta t)-P(t)}{\Delta t}=\frac{dP(t)}{dt}=P'(t)$$

in

$$\lim_{\Delta t\to 0}-\frac{R(t+\Delta t)-R(t)}{\Delta t}=f(t)$$

tvorijo enačbe (4.2) do (4.5) sistem navadnih diferencialnih enačb prvega reda

$$\begin{bmatrix}P_1'(t)\\P_2'(t)\\P_3'(t)\\P_4'(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\lambda_1-\lambda_2 & 0 & 0 & 0\\ \lambda_1 & -\lambda_2 & 0 & 0\\ \lambda_2 & 0 & -\lambda_1 & 0\\ 0 & \lambda_2 & \lambda_1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}P_1(t)\\P_2(t)\\P_3(t)\\P_4(t)\end{bmatrix} \tag{4.6}$$

Če so intenzivnosti okvar konstantne, je sistem diferencialnih enačb analitično rešljiv. Verjetnost, da se bo izdelek nahajal v stanju 1, določimo z integracijsko metodo ločitve spremenljivk

$$\int\frac{dP_1(t)}{P_1(t)}=-(\lambda_1+\lambda_2)\int dt+C_1$$

Odtod sledi

$$\ln P_1(t)=-(\lambda_1+\lambda_2)t+C_1$$

in

$$P_1(t)=e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t+C_1}$$

Vrednost integracijske konstante C_1 izračunamo iz pogoja $P_1(0)=1$, ki pravi, da se izdelek v trenutku $t=0$ z verjetnostjo 1 nahaja v stanju 1. Odtod sledi $C_1=0$ in

$$P_1(t)=e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t} \tag{4.7}$$

Verjetnost, da se bo izdelek nahajal v stanju 2, je rešitev linearne diferencialne enačbe

$$P_2'(t)+\lambda_2P_2(t)=\lambda_1e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t}$$

kjer je

$$P_2(t) = e^{-\lambda_2 \int dt} \left\{ \lambda_1 \int e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t+\lambda_2 \int dt} dt + C_2 \right\}$$

oziroma

$$P_2(t) = -e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t} + C_2 e^{-\lambda_2 t}$$

Integracijska konstanta $C_2 = 1$ izhaja iz robnega pogoja $P_2(0) = 0$. Verjetnost, da se bo izdelek v trenutku t nahajal v stanju 2, je torej

$$P_2(t) = -e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t} + e^{-\lambda_2 t} \tag{4.8}$$

Na podoben način je mogoče izračunati tudi

$$P_3(t) = e^{-\lambda_1 t} - e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t} \tag{4.9}$$

Verjetnost, da se bo izdelek nahajal v stanju 4, je

$$P_4(t) = 1 - P_1(t) - P_2(t) - P_3(t) \tag{4.10}$$

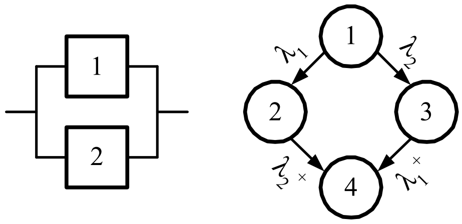
Medtem ko je zanesljivost izdelka sestavljenega iz dveh zaporedno vezanih komponent

$$R_\mathrm{s}(t) = e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t} \tag{4.11}$$

lahko v primeru dveh paralelno vezanih komponent zapišemo

$$R_\mathrm{s}(t) = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t} \tag{4.12}$$

4.2 Izdelki z delitvijo obremenitve



Slika 4.2: Blokovni diagram in diagram prehodov za izdelek z delitvijo obremenitve.

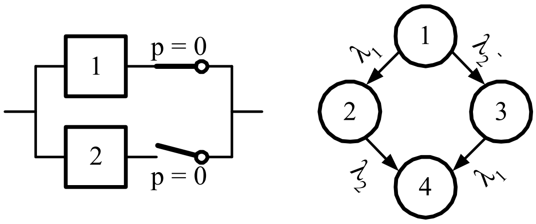
Sistem diferencialnih enačb za izdelek z delitvijo obremenitve

$$\begin{bmatrix} P_1'(t) \\ P_2'(t) \\ P_3'(t) \\ P_4'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_1 - \lambda_2 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_1 & -\lambda_2^+ & 0 & 0 \\ \lambda_2 & 0 & -\lambda_1^+ & 0 \\ 0 & \lambda_2^+ & \lambda_1^+ & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \\ P_4(t) \end{bmatrix} \tag{4.13}$$

Rešitve sistema diferencialnih enačb

$$\begin{aligned} P_1(t) &= e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t} \\ P_2(t) &= \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_2^+}(e^{-\lambda_2^+ t} - e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t}) \\ P_3(t) &= \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_1^+}(e^{-\lambda_1^+ t} - e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t}) \end{aligned} \tag{4.14}$$

4.3 Pasivne paralelne vezave



Slika 4.3: Blokovni diagram in diagram prehodov za pasivno paralelno vezavo.

Sistem diferencialnih enačb za pasivno paralelno vezavo dveh komponent brez napak preklopa $p = 0$

$$\begin{bmatrix} P_1'(t) \\ P_2'(t) \\ P_3'(t) \\ P_4'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_1 - \lambda_2^- & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_1 & -\lambda_2 & 0 & 0 \\ \lambda_2^- & 0 & -\lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \lambda_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \\ P_4(t) \end{bmatrix} \tag{4.15}$$

Rešitve sistema diferencialnih enačb

$$\begin{aligned} P_1(t) &= e^{-(\lambda_1+\lambda_2^-)t} \\ P_2(t) &= \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2^- - \lambda_2}(e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1+\lambda_2^-)t}) \\ P_3(t) &= e^{-\lambda_1 t} - e^{-(\lambda_1+\lambda_2^-)t} \end{aligned} \tag{4.16}$$

Zanesljivost izdelka

$$R_s(t) = e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2^- - \lambda_2}(e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1+\lambda_2^-)t}) \tag{4.17}$$

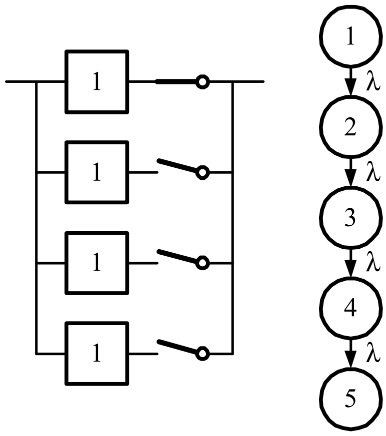
Srednji čas do okvar

$$\mathrm{MTTF} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2^-)} \tag{4.18}$$

4.4 Pasivne paralelne vezave enakih komponent

stanje	1	2	3	4	izdelek
1	S	S	S	S	S
2	F	S	S	S	S
3	F	F	S	S	S
4	F	F	F	S	S
5	F	F	F	F	F

Tabela 4.2: Možna stanja izdelka.



Slika 4.4: Blokovni diagram in diagram prehodov za pasivno paralelno vezavo enakih komponent.

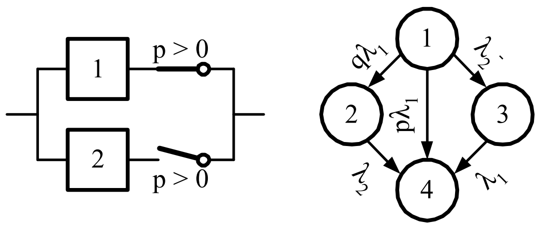
Sistem diferencialnih enačb za pasivno paralelno vezavo štirih komponent

$$\begin{bmatrix} P_1'(t) \\ P_2'(t) \\ P_3'(t) \\ P_4'(t) \\ P_5'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & -\lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & -\lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & -\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \\ P_4(t) \\ P_5(t) \end{bmatrix} \tag{4.19}$$

Zanesljivost izdelka, sestavljenega iz n enakih komponent in pripadajoči srednji čas do okvar

$$\begin{aligned} R_\mathrm{s}(t) &= \sum_{i=1}^{n} P_i(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!} \\ \mathrm{MTTF} &= \int_0^\infty R_\mathrm{s}(t)dt = \sum_{i=0}^{n-1} \int_0^\infty \frac{(\lambda t)^i e^{-\lambda t}}{i!} dt = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{\Gamma[i+1]}{\lambda i!} = \frac{n}{\lambda} \end{aligned} \tag{4.20}$$

4.5 Pasivne paralelne vezave z okvarami preklopa



Slika 4.5: Blokovni diagram in diagram prehodov za pasivno paralelno vezavo z okvarami preklopa.

Sistem diferencialnih enačb za pasivno paralelno vezavo z napakami preklopa

$$\begin{bmatrix} P_1'(t) \\ P_2'(t) \\ P_3'(t) \\ P_4'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -q\lambda_1 - p\lambda_1 - \lambda_2^- & 0 & 0 & 0 \\ q\lambda_1 & -\lambda_2 & 0 & 0 \\ \lambda_2^- & 0 & -\lambda_1 & 0 \\ p\lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \\ P_4(t) \end{bmatrix} \tag{4.21}$$

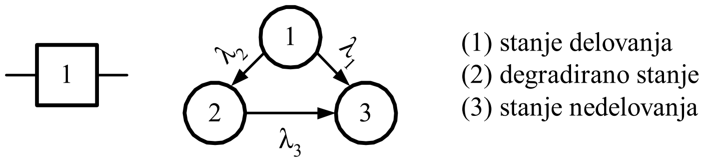
$q = 1 - p$. Rešitve sistema diferencialnih enačb

$$\begin{aligned} P_1(t) &= e^{-(\lambda_1+\lambda_2^-)t} \\ P_2(t) &= \frac{q\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2^- - \lambda_2}(e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1+\lambda_2^-)t}) \\ P_3(t) &= e^{-\lambda_1 t} - e^{-(\lambda_1+\lambda_2^-)t} \end{aligned} \tag{4.22}$$

Zanesljivost izdelka

$$R_\mathrm{s}(t) = e^{-\lambda_1 t} + \frac{q\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2^- - \lambda_2}(e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1+\lambda_2^-)t}) \tag{4.23}$$

4.6 Degradirani izdelki



Slika 4.6: Blokovni diagram in diagram prehodov za degradirani izdelek.

Sistem diferencialnih enačb

$$\begin{bmatrix} P_1'(t) \\ P_2'(t) \\ P_3'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_1 - \lambda_2 & 0 & 0 \\ \lambda_2 & -\lambda_3 & 0 \\ \lambda_1 & \lambda_3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \end{bmatrix} \tag{4.24}$$

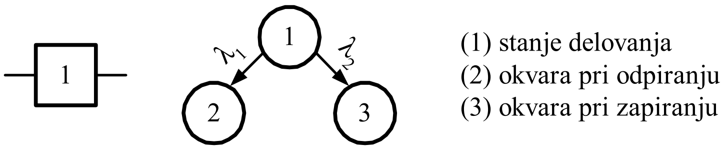
Rešitve sistema diferencialnih enačb

$$\begin{aligned} P_1(t) &= e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t} \\ P_2(t) &= \frac{\lambda_2}{\lambda_1+\lambda_2-\lambda_3}(e^{-\lambda_3 t} - e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t}) \\ P_3(t) &= 1 - P_1(t) - P_2(t) \end{aligned} \tag{4.25}$$

Zanesljivost izdelka

$$R_\mathrm{s}(t) = P_1(t) + P_2(t) \tag{4.26}$$

4.7 Izdelki s tremi stanji



Slika 4.7: Blokovni diagram in diagram prehodov za izdelek s tremi stanji.

Sistem diferencialnih enačb

$$\begin{bmatrix} P_1'(t) \\ P_2'(t) \\ P_3'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_1 - \lambda_2 & 0 & 0 \\ \lambda_1 & 0 & 0 \\ \lambda_2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \end{bmatrix} \tag{4.27}$$

Rešitve sistema diferencialnih enačb

$$\begin{aligned} P_1(t) &= e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t} \\ P_2(t) &= \frac{\lambda_1}{\lambda_1+\lambda_2}(1 - e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t}) \\ P_3(t) &= 1 - P_1(t) - P_2(t) \end{aligned} \tag{4.28}$$

Zanesljivost izdelka

$$R_\mathrm{s}(t) = e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t} \tag{4.29}$$

Poglavje 5

Fizični modeli zanesljivosti

Modele zanesljivosti, ki poleg časa upoštevajo še druge parametre, imenujemo kovariantne. Statični modeli niso odvisni od časa, temveč od obremenitev in zdržljivosti. Za razliko od statičnih modelov, upoštevajo dinamični modeli vpliv zgodovine obremenjevanja. Poleg navedenih statističnih modelov zanesljivosti obstajajo še fizikalni modeli okvar.

5.1 Kovariantni modeli

Primer kovariantnega modela za eksponentno gostoto porazdelitve verjetnosti okvar

$$\lambda(\mathbf{x}) = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_i x_i$$

Zanesljivost komponente z upoštevanjem dodatnih parametrov za primer eksponentne gostote porazdelitve verjetnosti okvar

$$R(t) = e^{-\lambda(\mathbf{x})t}$$

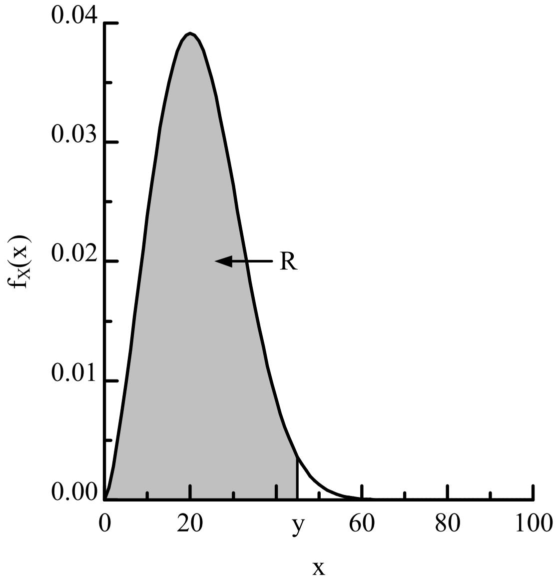
5.2 Statični modeli

Verjetnost, da obremenitev X ne bo večja od x

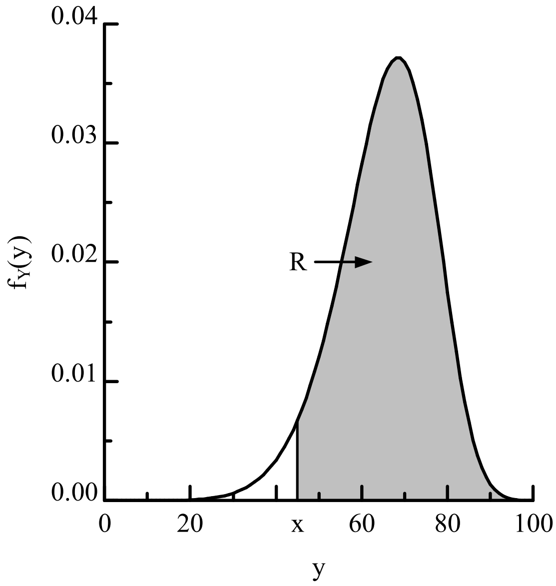
$$\Pr\{X < x\} = F_X(x) = \int_0^x f_X(x)dx \tag{5.1}$$

Verjetnost, da zdržljivost Y ne bo presegla vrednosti y

$$\Pr\{Y < y\} = F_Y(y) = \int_0^y f_Y(y)dy \tag{5.2}$$



Slika 5.1: Zanesljivost za naključno obremenitev in konstantno zdržljivost.



Slika 5.2: Zanesljivost za konstantno obremenitev in naključno zdržljivost.

Če je obremenitev X naključna spremenljivka in zdržljivost konstantna vrednost $Y = y$ (glej Sliko 5.1), je zanesljivost

$$R = \Pr\{X < y\} = F_X(y) = \int_0^y f_X(x)dx \tag{5.3}$$

Če je zdržljivost Y naključna spremenljivka in obremenitev konstantna vrednost $X = x$ (Slika 5.2), je

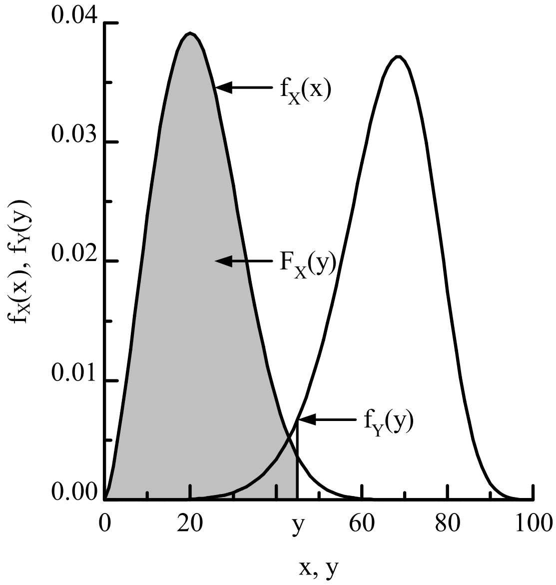
$$R = \Pr\{Y \geq x\} = 1 - F_Y(x) = \int_x^\infty f_Y(y)dy \tag{5.4}$$

Če sta X in Y naključni spremenljivki, je

$$R = \Pr\{X < Y\} = \int_0^\infty F_X(y) f_Y(y)dy \tag{5.5}$$

oziroma

$$R = \Pr\{Y \geq X\} = \int_0^\infty (1 - F_Y(x)) f_X(x)dx \tag{5.6}$$



Slika 5.3: Zanesljivost za naključno obremenitev in zdržljivost.

μ_X/μ_Y	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
R	0.50	0.53	0.56	0.59	0.63	0.67	0.71	0.77	0.83	0.91

Tabela 5.1: Zanesljivost za eksponentni gostoti porazdelitve verjetnosti obremenitev in zdržljivosti.

Če obremenitvam in zdržljivosti pripadata eksponentni gostoti porazdelitve verjetnosti

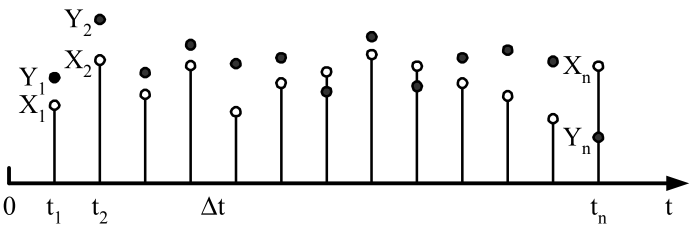
$$f_X(x) = \frac{1}{\mu_X} e^{-\frac{x}{\mu_X}} \qquad f_Y(y) = \frac{1}{\mu_Y} e^{-\frac{y}{\mu_Y}}$$

s srednjo vrednostjo obremenitev μ_X in srednjo vrednostjo zdržljivosti μ_Y, je

$$R = \frac{1}{\mu_X} \int_0^\infty \exp\left\{-\frac{\mu_X + \mu_Y}{\mu_X \mu_Y}\right\} dx = \frac{1}{1 + \mu_X/\mu_Y} \tag{5.7}$$

5.3 Dinamični modeli

5.3.1 Periodična obremenitev



Slika 5.4: Časovna zgodovina obremenitev in zdržljivosti za periodično obremenitev.

Dinamična zanesljivost po n obremenitvah je

$$R_n = \Pr\{X_1 < Y_1, \ldots, X_n < Y_n\}$$

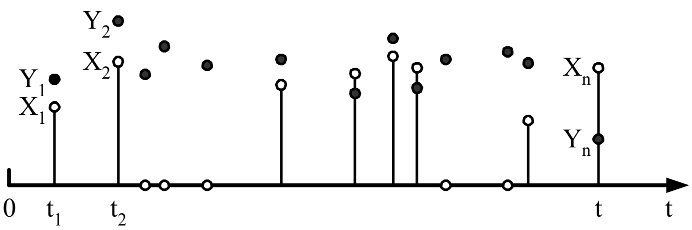
Ker so dogodki $X_1, X_2, \ldots$ in $Y_1, Y_2, \ldots$ statistično neodvisni, velja

$$R_n = \Pr\{X_1 < Y_1\} \cdots \Pr\{X_n < Y_n\} = R^n \tag{5.8}$$

Če je perioda Δt konstantna in $t_0 = 0$ ter $t_i = t_{i-1} + \Delta t$ za $i = 1, 2, \ldots$, je

$$R(t) = R^{t/\Delta t} \tag{5.9}$$

5.3.2 Naključna obremenitev



Slika 5.5: Časovna zgodovina obremenitev in zdržljivosti za naključno obremenitev.

Verjetnost, da se v času t komponenta nahaja v obremenjenem stanju $i$krat, ustreza binomski gostoti porazdelitve verjetnosti

$$f_n(i) = \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i} \tag{5.10}$$

Če je število dogodkov $n \gg 1$, verjetnost p pa zelo majhna, velja

$$f_n(i) = e^{-pn} \frac{(pn)^i}{i!} \tag{5.11}$$

Iz srednje periode $\Delta t = t/n$ sledi $pn = (p/\Delta t)t = \alpha t$, kjer je α srednje število obremenitev na enoto časa. Odtod sledi

$$f_i(t) = e^{-\alpha t} \frac{(\alpha t)^i}{i!} \tag{5.12}$$

Dinamična zanesljivost je utežna vsota vseh možnih dogodkov

$$R(t) = \sum_{i=0}^{\infty} R^i f_i(t) = e^{-\alpha t} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(\alpha t R)^i}{i!} \tag{5.13}$$

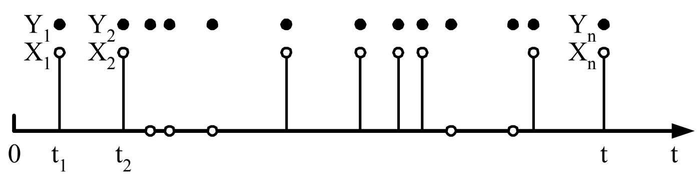
Ker velja

$$e^{\alpha t R} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(\alpha t R)^i}{i!}$$

je

$$R(t) = e^{-(1-R)\alpha t} \tag{5.14}$$

5.3.3 Prva obremenitev naključna



Slika 5.6: Časovna zgodovina obremenitev in zdržljivosti za prvo naključno obremenitev.

Predpostavimo, da sta prva obremenitev X_1 in zdržljivost Y_1 naključni spremenljivki, za vse ostale realizacije obremenitev in zdržljivosti pa velja

$$X_i = X_1 \vee 0 \quad Y_i = Y_1 \quad i = 1, 2, \ldots$$

Dinamična zanesljivost

$$R(t) = R^0 f_0(t) + \sum_{i=1}^{\infty} R^i f_i(t)$$

Ker je $R^i = R$ za vsak $i \geq 1$. Odtod sledi

$$R(t) = f_0(t) + R(1 - f_0(t)) = e^{-\alpha t} + R(1 - e^{-\alpha t}) \tag{5.15}$$

5.4 Fizikalni modeli okvar

Alternativa statističnim modelom zanesljivosti so fizikalni modeli okvar, pri katerih čas do okvare izrazimo s funkcijo

$$\begin{aligned} t = f(&\text{pogoji uporabe,}\\ &\text{pogoji okolja,}\\ &\text{materialne lastnosti,}\\ &\text{tehnologija izdelave,}\\ &\text{geometrija}) \end{aligned}$$

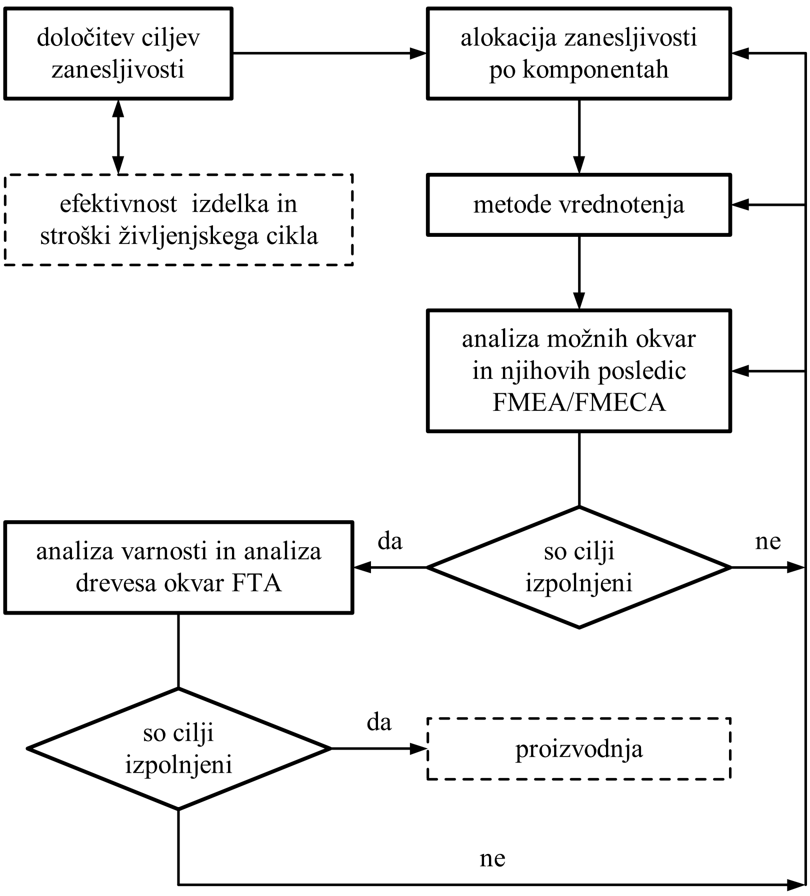
Značilen predstavnik fizikalnega modela okvar je pričakovani obratovalni čas kotalnega ležaja

$$t = a_1 a_2 a_3 \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

v urah, kjer je a_1 faktor zanesljivosti, a_2 faktor materiala, a_3 faktor pogojev uporabe, n vrtilna hitrost v vrt/min, p eksponent ter C in P dinamična nosilnost in ekvivalentna obremenitev v N.

Poglavje 6

Vrednotenje na zanesljivost



Slika 6.1: Proces vrednotenja na zanesljivost.

faze življenjskega cikla	aktivnosti vezane na zanesljivost
koncipiranje	specifikacija zanesljivosti alokacija zanesljivosti metode vrednotenja
detajliranje optimiranje in preskušanje	metode vrednotenja FMEA testiranje rasti zanesljivosti analiza varnosti in FTA
proizvodnja	test sprejemljivosti kontrola kakovosti test na utekanje in monitoring
uporaba in vzdrževanje	preventivno vzdrževanje napovedano vzdrževanje spremembe zamenjava delov

Tabela 6.1: Zanesljivost in faze življenjskega cikla.

6.1 Cilji zanesljivosti

Kazalci zanesljivosti

- srednji čas do okvar MTTF,
- srednji čas med okvarami MTBF,
- ciljna zanesljivost po določenem času ali
- gostota porazdelitve verjetnosti okvar.

Ostale aktivnosti

- potrebno natančno definirati okvare,
- iz zahtev izločiti določene vrste okvar,
- spremljati in beležiti čase delovanj in nedelovanj in
- natančno definirati normalne pogoje uporabe, pogoje okolja in pogoje vzdrževanja.

6.1.1 Stroški življenjskega cikla

zaključni stroški	**obratovalni in podporni stroški**	**preostali stroški**
- raziskave in razvoj	obratovalni stroški	- preostala vrednost
- proizvodnja	- osebje	- stroški odstranitve
- razpošiljanje	- energija in gorivo	
	stroški okvare	
	- garancije	
	- odgovornosti	
	- popravilo ali zamenjava	
	- izguba zaupanja	
	podporni stroški	
	- vzdrževalni resursi	
	- podporni resursi	
	- ostali pripomočki oziroma objekti	

Tabela 6.2: Kategorije stroškov.

Stroški življenjskega cikla

$$\begin{aligned}\text{stroški življenjskega cikla} &= \text{zaključni stroški}\\ &+ \text{obratovalni stroški}\\ &+ \text{stroški okvare}\\ &+ \text{podporni stroški}\\ &- \text{neto preostala vrednost}\end{aligned} \tag{6.1}$$

kjer je

$$\begin{aligned}\text{neto preostala vrednost} &= \text{preostala vrednost}\\ &- \text{stroški odstranitve}\end{aligned}$$

6.2 Alokacija zanesljivosti

Cilj alokacije

$$R_\mathrm{s} = h(R_1(t), \ldots, R_n(t)) \geq R_\mathrm{s}^*(t) \tag{6.2}$$

Zaporedna vezava

$$R_\mathrm{s} = \prod_{i=1}^{n} R_i(t) \geq R_\mathrm{s}^*(t) \tag{6.3}$$

6.2.1 Eksponentna porazdelitev

Iz enačbe (6.3), sledi

$$\prod_{i=1}^{n} e^{-\lambda_i t} \geq e^{-\lambda_s^* t}$$

oziroma

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i \leq \lambda_s^* \tag{6.4}$$

6.2.2 Optimalna alokacija

Cilj optimalne alokacije so minimalni stroški

$$\min C = \sum_{i=1}^{n} C_i(x_i) \tag{6.5}$$

$$\prod_{i=1}^{n} (R_i + x_i) \geq R_s^* \tag{6.6}$$

pri pogoju

$$0 < R_i + x_i \leq B_i < 1 \quad i = 1, \ldots, n \tag{6.7}$$

Funkcijo stroškov rasti zanesljivosti $C_i(x)$ aproksimiramo s polinomom drugega reda

$$\min C = \sum_{i=1}^{n} c_i x_i^2 \tag{6.8}$$

Če zanemarimo (6.7) in izenačimo obe strani neenačbe (6.6), lahko določimo optimalne vrednosti x_i z Lagrangeevo metodo

$$L(x_i, \theta) = \sum_{i=1}^{n} c_i x_i^2 - \theta \left\{ \prod_{i=1}^{n} (R_i + x_i) - R_s^* \right\} \tag{6.9}$$

Ekstrem funkcije $L(x_i, \theta)$ izračunamo tako, da rešimo sistem enačb

$$\begin{aligned} \frac{\partial L(x_i, \theta)}{\partial x_i} &= 2c_i x_i - \theta \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} (R_j + x_j) = 0 \quad i = 1, \ldots, n \\ \frac{\partial L(x_i, \theta)}{\partial \theta} &= \prod_{i=1}^{n} (R_i + x_i) - R_s^* = 0 \end{aligned} \tag{6.10}$$

Zgornjo enačbo pomnožimo z $(R_i + x_i)$ ter preuredimo

$$\theta \prod_{i=1}^{n}(R_i + x_i) = 2c_i x_i (R_i + x_i) = \theta R_\mathrm{s}^*$$

Odtod sledi

$$2c_i x_i^2 + 2c_i R_i x_i - \theta R_\mathrm{s}^* = 0 \tag{6.11}$$

Rešitev kvadratne enačbe (6.11) je njen pozitivni koren

$$x_i = \frac{-2c_i R_i + \sqrt{4c_i^2 R_i^2 + 8c_i \theta R_\mathrm{s}^*}}{4c_i} \tag{6.12}$$

6.2.3 ARINC metoda

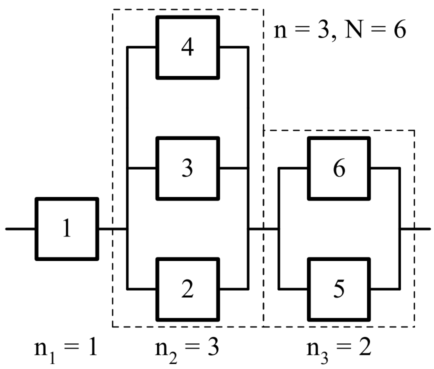
Predpostavimo, da so neodvisne komponente s konstantno intenzivnostjo okvar vezane zaporedno. Če je λ_i trenutna intenzivnost okvar $i$te komponente in je λ_s^* ciljna intenzivnost okvar, potem iz uteži

$$w_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i}$$

izračunamo nove vrednosti intenzivnosti okvar

$$\lambda_i = w_i \lambda_\mathrm{s}^*$$

6.2.4 AGREE metoda



Slika 6.2: Blokovni diagram izdelka in kompleksnost sestavov.

Naj bodo

$$
\begin{aligned}
t &= \text{obratovalni čas izdelka} \\
R_\mathrm{s}^* &= \text{ciljna zanesljivost izdelka} \\
N = \sum_{i=1}^{n} n_i &= \text{skupno število komponent izdelka} \\
t_i &= \text{obratovalni čas } i\text{tega sestava, kjer je } t_i \leq t \\
\lambda_i &= \text{intenzivnost okvar } i\text{tega sestava} \\
w_i &= \text{faktor vpliva}
\end{aligned}
$$

Ker velja

$$\prod_{i=1}^{n} R_\mathrm{s}^{*n_i/N} = R_\mathrm{s}^*$$

lahko z upoštevanjem faktorja vpliva ob predpostavki eksponentne gostote porazdelitve verjetnosti okvar zapišemo verjetnost, da bo okvara $i$tega sestava povzročila okvaro izdelka

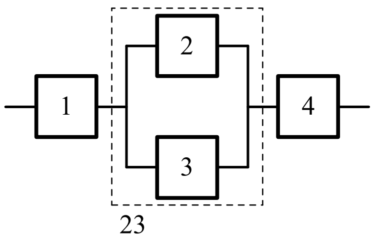
$$w_i(1 - e^{-\lambda_i t_i}) = 1 - R_\mathrm{s}^{*n_i/N}$$

Odtod sledi

$$\lambda_i = -\frac{1}{t_i} \ln \left\{ 1 - \frac{1 - R_\mathrm{s}^{*n_i/N}}{w_i} \right\} \qquad i = 1, \ldots, n \tag{6.13}$$

Ker okvara sestava ne povzroči nujno okvare izdelka, je $\prod_{i=1}^{n} e^{-\lambda_i t_i} \leq R_\mathrm{s}^*$.

6.2.5 Redundanca



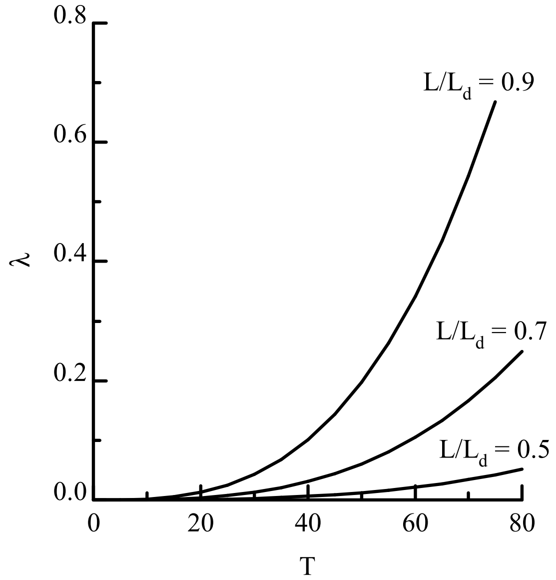
Slika 6.3: Blokovni diagram izdelka.

6.3 Metode vrednotenja

6.3.1 Izbor materialov in delov

- standardni deli ali proizvodnjo delov,
- materialne lastnosti so funkcija različnih dejavnikov.

6.3.2 Podobremenitev

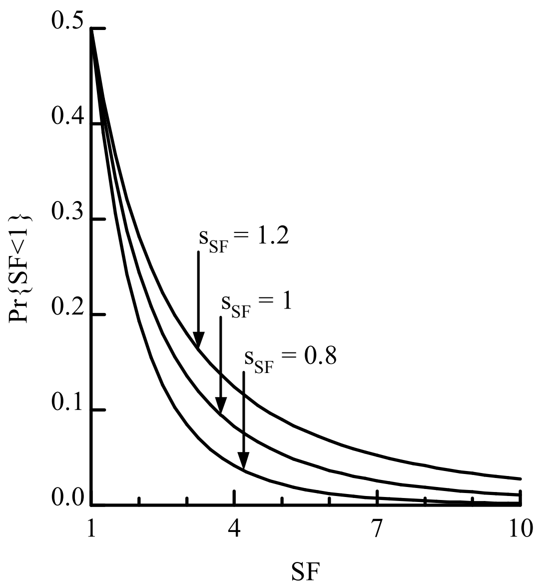


Slika 6.4: Vpliv temperature in obremenitve na intenzivnost okvar.

$$\lambda = \lambda_{\mathrm{b}} \left(\frac{s}{s_{\mathrm{d}}}\right)^{0.7} \left(\frac{L}{L_{\mathrm{d}}}\right)^{4.69} \left(\frac{v_{\mathrm{d}}}{v}\right)^{0.54} \left(\frac{c}{c_{\mathrm{d}}}\right)^{0.67} \left(\frac{T}{T_{\mathrm{d}}}\right)^{3}$$

λ_{b} = intenzivnost okvar, definirana s strani proizvajalca
s = dejanska hitrost
s_{d} = imenska hitrost
L = dejanska obremenitev
L_{d} = imenska obremenitev
υ = dejanska kinematična viskoznost
υ_{d} = imenska kinematična viskoznost
c = dejanski delež nečistoč
c_{d} = imenski delež nečistoč
T = dejanska temperatura
T_{d} = imenska temperatura

6.3.3 Analiza obremenitev in zdržljivosti



Slika 6.5: Verjetnost okvare in varnostni faktor.

Varnostni faktor in meja varnosti

$$\mathrm{SF} = \frac{Y}{X} \qquad \mathrm{SM} = Y - X \tag{6.14}$$

Verjetnost okvare kot funkcije varnostnega faktorja

$$\Pr\{\mathrm{SF} < 1\} = 1 - \Phi\left(\frac{\ln \mathrm{SF}}{s_{\mathrm{SF}}}\right) \tag{6.15}$$

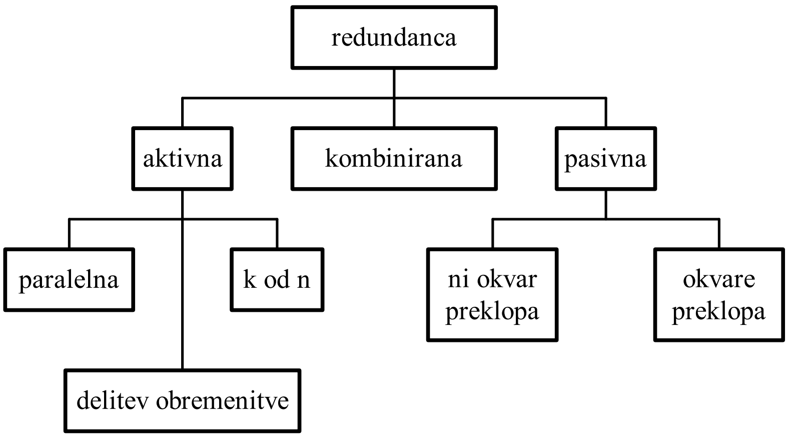
kjer

$$\mathrm{SF} = \frac{m_y}{m_x} \qquad s_{\mathrm{SF}} = \sqrt{s_x^2 + s_y^2}$$

6.3.4 Kompleksnost in tehnologija

- število sestavnih delov izdelka,
- variabilnost uporabljenih delov,
- tehnologija

6.3.5 Redundanca



Slika 6.6: Razčlenitev redundance.

$C := 0$; $n_i := 1$ za $i := 1, \ldots, n$;
$s :=$ false; Izračunaj Δ_i za $i := 1, \ldots, n$;
while $s :=$ false **do**
  $k :=$ maxarg $\{\Delta_1, \ldots, \Delta_n\}$; $C := C + C_{\mathrm{u},k}$;
  if $C < B$ **then**
    $n_k := n_k + 1$; Izračunaj Δ_k;
  else
    $s :=$ true; $C := C - C_{\mathrm{u},k}$;
  end if
end while

Slika 6.7: Marginalna analiza.

Optimizacija aktivne redundance glede na stroške

$$\max \prod_{i=1}^{n} \{1 - (1 - R_i(t))^{n_i}\} \tag{6.16}$$

pri pogoju

$$\sum_{i=1}^{n} C_{\mathrm{u},i} n_i \leq B + \sum_{i=1}^{n} C_{\mathrm{u},i} \tag{6.17}$$

Optimalno število redundantnih komponent določimo z marginalno analizo, ki zahteva ločitev kontrolnih spremenljivk n_i. To dosežemo z logaritmiranjem enačbe (6.16)

$$\max \sum_{i=1}^{n} \ln \{1 - (1 - R_i(t))^{n_i}\} \tag{6.18}$$

Ker je logaritem monotono naraščajoča funkcija, transformacija (6.18) ne vpliva na lego optimuma. Marginalna vrednost

$$\Delta_i = \frac{\ln \{1 - (1 - R_i(t))^{n_i+1}\} - \ln \{1 - (1 - R_i(t))^{n_i}\}}{C_{\mathrm{u},i}}$$

je definirana kot sprememba logaritma zanesljivosti na enoto stroškov ob povečanju števila paralelno vezanih komponent za 1.

6.4 Analize možnih okvar in njihovih posledic

Analiza možnih okvar in njihovih posledic FMEA je iterativen proces odkrivanja potencialnih okvar, njihovih vzrokov in učinkov ter preprečevanja okvar izdelka in procesa, ki je usmerjena k povečevanju varnosti in zadovoljstva kupcev. Vodstvo podjetja mora natančno definirati omejitve, znotraj katerih se bo proces FMEA odvijal. Pri tem je potrebno odgovoriti na niz vprašanj.

- Je skupina FMEA odgovorna le za izvedbo analize ali naj pripravi tudi predloge in/ali realizacijo izboljšav?
- S kolikšnimi sredstvi razpolaga skupina?
- Kateri ostali resursi so ji na voljo?
- Ali je termin za izvedbo analize določen in ali obstajajo druge časovne omejitve, ki jih je potrebno upoštevati?
- Kakšen je postopek, če mora skupina prekoračiti omejitve?

Številka FMEA: 019 Datum začetek: 05.03.02

Datum konec: ______

Člani skupine: Martin M. Andrej N. Marta L.

Boštjan V. Franc G.

Vodja skupine: Martin M.

1. Ali so zastopana vsa področja?

   Da Ne Aktivnost: ______

2. So v skupini zastopani različni nivoji in vrste znanja?

   Da Ne Aktivnost: ______

3. Je predstavnik uporabnikov udeležen v skupini?

   Da Ne Aktivnost: Prodaja in marketing zastopata uporabnika.

4. Kdo je zadolžen za izdelavo zapiskov in vzdrževanje dokumentacije? Andrej N.

Omejitve skupine FMEA

5. Skupina FMEA je pristojna za naslednje naloge.

   FMEA Predlogi izboljšav Realizacija izboljšav

6. S kolikšnimi sredstvi razpolaga skupina? 5000 EUR
7. Ima skupina skrajni rok za izvedbo projekta? 15.04.02
8. Ali obstajajo druge časovne omejitve? ______
9. Kakšen je postopek za spremembo omejitev?

   Revizija omejitev z vodjo oddelka .

10. Kako bo FMEA predstavljena ostalim v podjetju?

    Zaključno poročilo.

11. Jasno navedite cilje FMEA.

    Izvedite FMEA izdelka za novi model gasilnega aparata X-1050.

    Analiza mora biti zaključena pred začetkom FMEA procesa 01.05.02.

Slika 6.8: Nastopni formular skupine FMEA.

- Kako naj skupina seznani ostale subjekte podjetja z rezultati analize?

FMEA izdelka in procesa obsegata 10 korakov

- pregled procesa,
- identifikacija potencialnih vrst okvar,
- identifikacija potencialnih učinkov okvar,
- ocena stopnje resnosti potencialnih učinkov okvar,
- ocena verjetnosti realizacije potencialnih vrst okvar,
- ocena verjetnosti odkrivanja potencialnih vrst in/ali učinkov okvar,

- izračun indeksa kritičnosti potencialnih učinkov okvar,
- določitev kritičnih potencialnih vrst okvar,
- izvedba korektivnih ukrepov in
- ponovni izračun indeksa kritičnosti potencialnih učinkov okvar.

6.4.1 Pregled procesa

6.4.2 Identifikacija potencialnih vrst okvar

potencialni vzrok ali mehanizem okvare	**potencialna vrsta okvare**	**potencialni učinek okvare**
biološki vplivi	gnitje	razpad izolacije
ciklično utrujanje	utrujenostni lom	nestabilna vožnja
človeška napaka	zakasnela reakcija	letalska nesreča
degradacija	magnetna degradacija	padec permeabilnosti
depolimerizacija	kratek stik	padec upornosti
izhlapevanje	pretrganje žarilne niti	žarnica ne sveti
izjemne obremenitve	udar strele	izpad radijskega in televizijskega signala
kemične in elektrolitske spremembe	elektrolitska korozija	izguba kontakta
okvara kontakta	hladen kontakt	relé ne deluje
korozija	prerjavenje	puščanje rezervoarja
lezenje	deformacija	slabo vodenje
mehanske obremenitve	trenutni lom	izguba moči in povečan hrup
nekvalitetne komponente	izlitje zavorne tekočine	ni zavorne sile
onesnaženje	izguba kontakta	padec napetosti
temperaturno nihanje	utrujenostna razpoka	padec tlaka
trenje	obraba	izgube in hrup
vlaga	zarositev	slaba vidljivost

Tabela 6.3: Potencialni vzroki, vrste in učinki potencialnih okvar.

6.4.3 Identifikacija potencialnih učinkov okvar

Pri identifikaciji učinkov se vprašujemo, kakšne so posledice okvare.

Predmet (izdelek/proces): gasilni aparat X-1050
FMEA skupina: gasilni aparat X-1050 FMEA skupina
Vodja skupine: Martin M.

Številka FMEA: 019
Datum (priprava): 05.03.02 (pregled): 01.05.02
Stran: 1 od 2

predmet in funkcija	potencialna vrsta okvare	potencialni učinek okvare	S	C	potencialni vzrok/mehanizem okvare	O	način kontrole		D	RPN	korektivni ukrep	odgovornost in rok za izvedbo	izveden ukrep	S	O	D	RPN
							preprečevanje	detekcija									
cev	razpoke	ob aktiviranju se ne sproži	10		izpostavljenost visoki vročini ali mrazu med transportom	5	- uporaba izolacijskih materialov za pakiranje - transport pri klimatsko kontroliranih pogojih		6	300	uporaba cevi iz materiala, ki ni občutljiv na temperaturo	Martin M. 01.04.02	zamenjava obstoječe cevi s cevjo iz materiala, ki ni občutljiv na temperaturo	10	2	6	120
	luknjice	nizek iztisni tlak	8		poškodba cevi med proizvodnjo	8	- prepoved uporabe ostrih predmetov med proizvodnjo		4	256	zaščita cevi s prevleko iz kevlarja	Marta L. 15.04.02	nakup zaščitne prevleke za cev	8	5	4	160
	zamašitev	ni iztiskanja	10		tujek v cevi	6		- vhodna kontrola - test cevi s komprimi-ranim zrakom	3	180				10	6	3	180
jeklenka																	
mehanizem ventila																	
indikator polnosti																	

Slika 6.9: FMEA izdelka/procesa.

6.4.4 Ocena stopnje resnosti potencialnih učinkov okvar

Stopnja resnosti S je številčna vrednost med 1 in 10, ki jo pridružimo potencialni vrsti okvare glede na najhujši učinek. Ker ima lahko vsaka vrsta okvare različne učinke in lahko vsakemu učinku ustreza različna stopnja resnosti, je potrebno S pridružiti učinkom in ne vrstam okvar.

6.4.5 Ocena verjetnosti realizacije potencialnih vrst okvar

Verjetnost realizacije potencialnih vrst okvar O je številčna vrednost med 1 in 10, ki podaja verjetnost, da se bosta določena vrsta ali mehanizem okvare pojavila v življenjskem ciklu izdelka ali procesa. V fazi ocenjevanja skupina poskuša odgovoriti na različna vprašanja.

- Kakšna je frekvenca okvar podobnih komponent, ki so že na tržišču?
- Je obravnavana komponenta podobna predhodni generaciji komponent?
- Kolikšne spremembe so bile storjene ob prehodu s stare na novo generacijo?
- Gre za popolnoma drugačno ali celo popolnoma novo komponento?
- Je prišlo do spremembe pogojev uporabe in/ali pogojev okolja?
- Je bila izvedena statistična ocena verjetnosti realizacije okvar?

6.4.6 Ocena verjetnosti odkrivanja potencialnih vrst in/ali učinkov okvar

Verjetnost odkrivanja D je številčna vrednost med 1 in 10, ki podaja verjetnost odkrivanja vrst ali učinkov okvar.

6.4.7 Izračun indeksa kritičnosti potencialnih učinkov okvar

Indeks kritičnosti je definiran kot produkt stopnje resnosti S, verjetnosti realizacije O in verjetnosti odkrivanja D

$$\mathrm{RPN} = S \times O \times D \tag{6.19}$$

in se giblje med 1 in 1000. Ker v procesu ocenjevanja vrednosti S, O in D prihaja do razlik med člani skupine, je za dosego soglasja smiselno uporabiti eno od naslednjih tehnik

- glasovanje v skupini,

	stopnja resnosti S		verjetnost realizacije O		verjetnost odkrivanja D
ocena	**opis**	**definicija**	**opis**	**frekvenca**	
10	ekstremna brez opozorila	okvara lahko privede do poškodbe uporabnika brez opozorila	zelo visoka: okvara skoraj	≥ 100 na tisoč	skoraj nična
9	ekstremna z opozorilom	okvara povzroči neskladje z uradnimi predpisi z opozorilom	neizogibna	50 na tisoč	zelo neznatna
8	zelo visoka	izdelek je pokvarjen in izgubi svojo prvotno funkcijo	visoka: ponavljajoča	20 na tisoč	neznatna
7	visoka	okvara povzroči visoko stopnjo nezadovoljstva pri uporabniku	se okvara	10 na tisoč	zelo majhna
6	srednja	okvara poslabša delovanje sestava ali komponente	srednja: občasna	5 na tisoč	majhna
5	majhna	okvara povzroči tolikšno izgubo performans, da se uporabnik pritožuje	okvara	2 na tisoč	srednja
4	zelo majhna	okvaro je mogoče preseči s prilagajanjem uporabnika izdelku ali procesu, vpliv na performanse je neznaten		1 na tisoč	srednje visoka
3	neznatna	okvara predstavlja neznatno motnjo za uporabnika, vpliva na performanse izdelka ali procesa ni	nizka: sorazmerno	0.5 na tisoč	visoka
2	zelo neznatna	okvara ni takoj očitna in ima le neznaten učinek na izdelek ali proces	redka okvara	0.1 na tisoč	zelo visoka
1	skoraj nična	učinek okvare ni opazen	neznatna:	≤ 0.01 na tisoč	skoraj 100%

Tabela 6.4: Priporočene ocene za stopnjo resnosti, verjetnost realizacije in verjetnost odkrivanja.

- vključitev eksperta,
- preložitev odločitve na enega od članov skupine,
- razvrščanje okvar in/ali učinkov po velikosti glede na S, O ali D,
- podaljšano razpravo ali
- izglasovanje višje ocene.

6.4.8 Določitev kritičnih potencialnih vrst okvar

Potencialne vrste okvar razvrščamo glede na indeks kritičnosti po velikosti od najvišje do najnižje vrednosti. Izbrati je potrebno mejno vrednost indeksa kritičnosti.

6.4.9 Izvedba korektivnih ukrepov

V fazi izvedbe korektivnih ukrepov poskušamo potencialne vrste okvar z visokim RPN ali S omiliti oziroma odpraviti. V nadaljevanju so našteti ukrepi, ki lahko prispevajo k znižanju indeksa kritičnosti.

S Uporaba osebnih zaščitnih sredstev (čelada, zaščitna očala, zaščitne rokavice). Varnostna stikala. Uporaba materialov kot npr. varnostno steklo, ki ob odpovedi ne povzroča tako hudih poškodb.

O Dvig indeksa zmogljivosti procesa $\mathrm{C_{pk}}$ z uporabo metod načrtovanja preskusov in/ali modifikacij opreme. Proces nenehnih izboljšav. Uporaba mehanizmov, ki jih je potrebno aktivirati, da bi izdelek ali proces deloval (vrtna kosilnica ima vzvod, ki ga je potrebno med obratovanjem stalno stiskati).

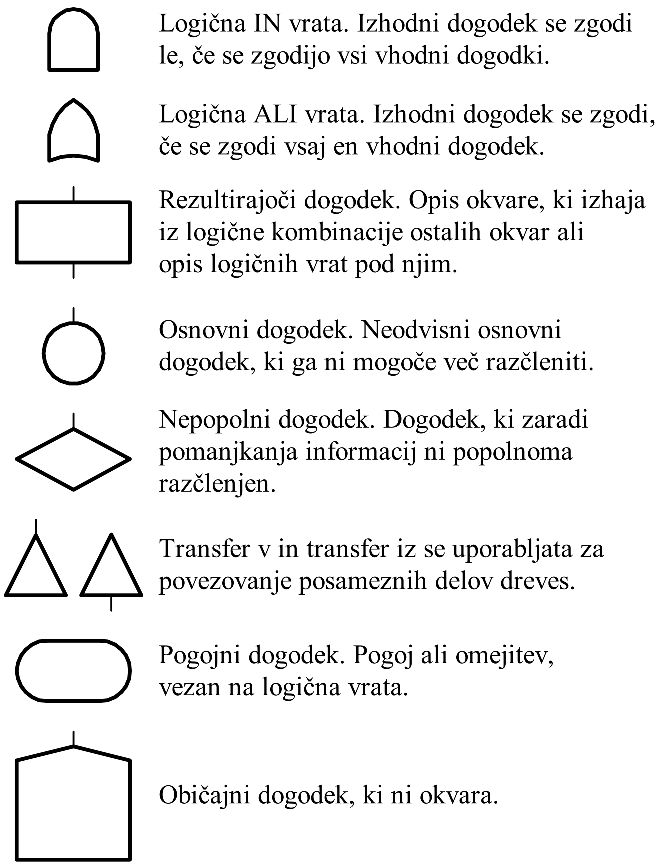
D Statistična kontrola procesa. Uporaba redno kalibriranih merilnih naprav. Preventivno vzdrževanje kot sredstvo za pravočasno odkrivanje potencialnih okvar. Uporaba kodiranja (barve in oblike), ki uporabnika obvešča o tem kaj je prav in kaj ne.

6.4.10 Ponoven izračun indeksa kritičnosti potencialnih učinkov okvar

6.5 Analiza varnosti in drevesa okvar

Zanesljivost in varnost sta tesno povezani. Varnost je stanje izdelka, ki ne privede do poškodb, poklicnih bolezni ali izgube življenja ljudi, resnih okvar opreme in škodljivih posledic za okolje (MIL-STD-882). Analizo varnosti izvajamo predvsem v primerih, kjer bi lahko določena vrsta okvare privedla do katastrofalnih posledic za človeka ali okolje.

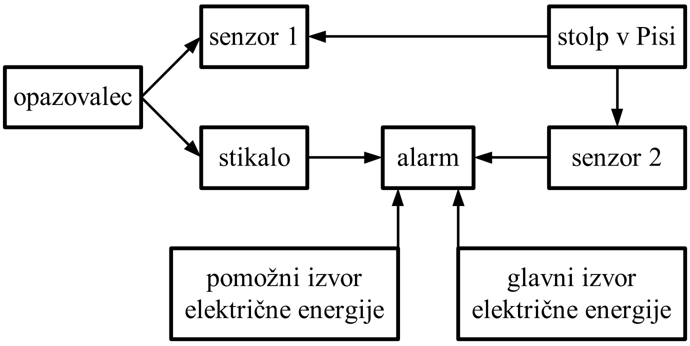
6.5.1 Analiza drevesa okvar



Slika 6.10: Simboli analize drevesa okvar.

Analiza drevesa okvar FTA je grafična metoda odkrivanja potencialnih, z vidika varnosti kritičnih okvar. Poteka od zgoraj navzdol in vključuje štiri osnovne korake

- definicijo izdelka, njegovih meja in zgornjega dogodka,
- konstrukcijo drevesa okvar,
- kvalitativno oceno kombinacij dogodkov, ki privedejo do zgornjega dogodka in
- kvantitativno oceno verjetnosti realizacije zgornjega dogodka.

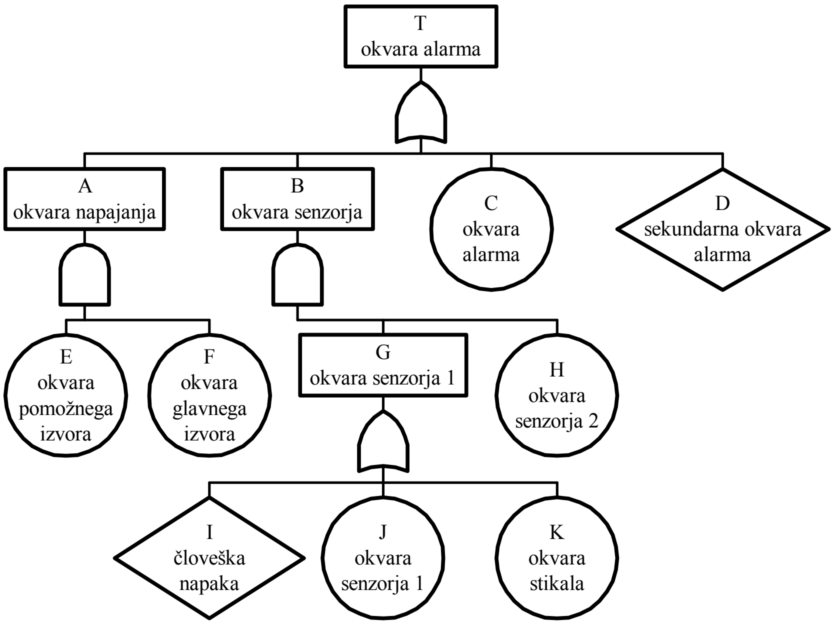


Slika 6.11: Shema alarmne naprave.

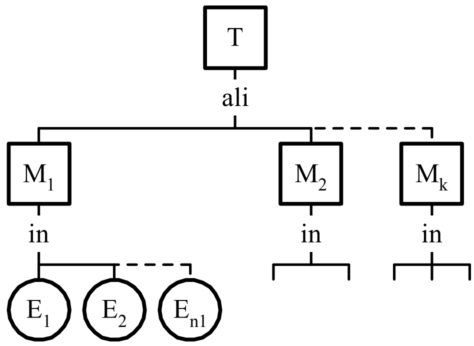
Ločimo primarne in sekundarne okvare ter napake povelja. Okvare je mogoče deliti tudi na aktivne in pasivne.

Zgornji dogodek T je mogoče izraziti kot funkcijo osnovnih in nepopolnih dogodkov

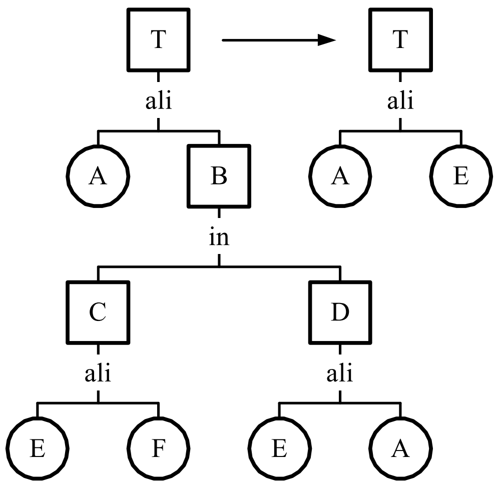
$$\begin{aligned} T &= A \cup B \cup C \cup D \\ &= (E \cap F) \cup (G \cap H) \cup C \cup D \\ &= (E \cap F) \cup ((I \cup J \cup K) \cap H) \cup C \cup D \end{aligned} \tag{6.20}$$



Slika 6.12: Analiza drevesa okvar za primer alarmne naprave.



Slika 6.13: Ekvivalentno drevo minimalnih rezov.



Slika 6.14: Drevo okvar in ekvivalentno drevo okvar.

iteracija		(a)
1	**2**	**3**
A	E,F	E,F
B	G,H	I,H
C	C	J,H
D	D	K,H
		C
		D

iteracija				(b)
1	**2**	**3**	**4**	**5**
A	A	A	A	A
B	C,D	E,D	E,E	E
		F,D	E,A	
			F,E	
			F,A	

Slika 6.15: Minimalni rezi Slika 6.12 (a) in Slika 6.14 (b).

6.5.2 Minimalni rezi

Minimalni rez je minimalna množica osnovnih dogodkov, ki povzročijo zgornji dogodek. Če je M_i $i$ti minimalni rez, lahko zgornji dogodek T izrazimo z unijo vseh k minimalnih rezov

$$T = M_1 \cup M_2 \cup \cdots \cup M_k \tag{6.21}$$

kjer velja $M_i = E_1 \cap E_2 \cap \cdots \cap E_{ni}$. E_i označuje osnovni dogodek.

6.5.3 Kvantitativna analiza

V okviru kvantitativne analize ocenimo verjetnost realizacije zgornjega dogodka pri pogoju, da so verjetnosti realizacij osnovnih in nepopolnih dogodkov znane. V pomoč pri analizi je ekvivalentno drevo minimalnih rezov, saj velja

$$P(T) = P(M_1 \cup M_2 \cup \cdots \cup M_k) \tag{6.22}$$

Če predstavljajo minimalni rezi nepovezane dogodke, je

$$P(T) = P(M_1) + P(M_2) + \cdots + P(M_k) \tag{6.23}$$

Če so osnovni dogodki E_i statistično neodvisni, pa je

$$P(M_i) = P(E_1 \cap E_2 \cap \cdots \cap E_{ni}) = P(E_1)P(E_2)\cdots P(E_{ni}) \tag{6.24}$$

Ker so verjetnosti $P(M_i)$ majhne, daje enačba (6.23) zadovoljive rezultate tudi v primeru povezanih dogodkov.

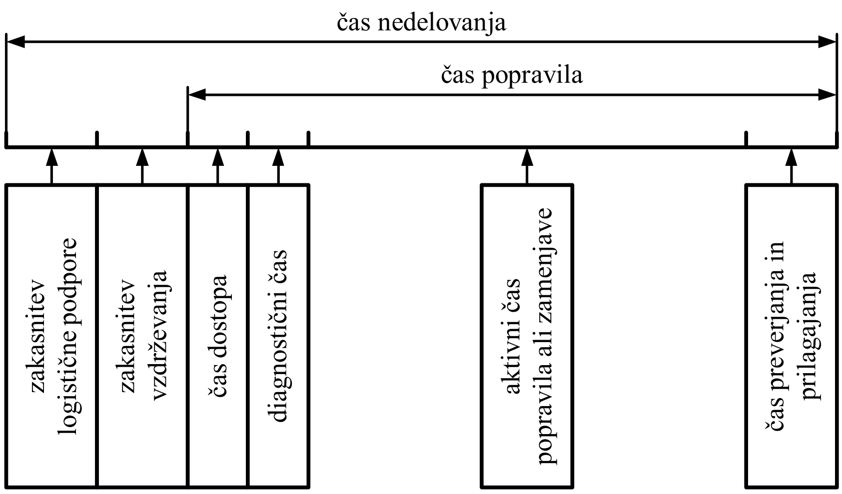
Poglavje 7

Vzdrževalnost

Razlikujemo

- kurativno,
- preventivno in
- napovedano vzdrževanje.

7.1 Analiza časa nedelovanja



Slika 7.1: Razčlenitev časa nedelovanja.

Zakasnitev logistične podpore vključuje

- čas čakanja na rezervne dele,

- začetni administrativni čas,
- začetni proizvodni ali nabavni čas,
- čas popravila komponent in
- transportni čas.

Zakasnitev vzdrževanja vključuje

- čas čakanja na vzdrževalne resurse,
- čas čakanja na ostale pripomočke oziroma objekte,
- administrativni čas in
- transportni čas.

K vzdrževalnim resursom prištevamo

- osebje,
- testno in podporno opremo,
- orodja,
- priročnike in druge tehnične podatke ter
- ostale pripomočke oziroma objekte.

7.2 Porazdelitvena funkcija popravil

Naj bo čas popravila T zvezna naključna spremenljivka z gostoto porazdelitve verjetnosti $h(t)$ in kumulativno funkcijo popravil

$$\Pr\{T < t\} = H(t) = \int_0^t h(t)dt \tag{7.1}$$

Srednji čas popravil izhaja iz

$$\mathrm{MTTR} = \int_0^\infty th(t)dt = \int_0^\infty (1 - H(t))dt \tag{7.2}$$

varianca pa iz

$$\sigma^2 = \int_0^\infty (t - \mathrm{MTTR})^2 h(t)dt \tag{7.3}$$

Če je porazdelitvena funkcija popravil eksponentna s $h(t) = re^{-rt}$ in je intenzivnost popravil $r = 1/\mathrm{MTTR}$, velja

$$H(t) = \int_0^t \frac{e^{-t/\mathrm{MTTR}}}{\mathrm{MTTR}} dt = 1 - e^{-t/\mathrm{MTTR}} \tag{7.4}$$

Za popis raztrosa časov popravil pogosto uporabljamo tudi lognormalno porazdelitveno funkcijo

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} t s} \exp\left\{-\frac{1}{2}\frac{(\ln(t/t_{\mathrm{med}}))^2}{s^2}\right\} \tag{7.5}$$

kjer sta t_{med} medialni čas popravil in s parameter oblike. Verjetnost, da bo popravilo opravljeno do trenutka t, je

$$\Pr\{T < t\} = H(t) = \Phi\left(\frac{1}{s} \ln \frac{t}{t_{\mathrm{med}}}\right) \tag{7.6}$$

Srednji čas popravil določa enačba

$$\mathrm{MTTR} = t_{\mathrm{med}} e^{s^2/2} \tag{7.7}$$

7.3 Čas popravila

Naj bo MTTR_i srednji čas popravil $i$te komponente, $m_{\mathrm{um}i}$ pričakovano število nenačrtovanih popravil ter q_i število komponent vrste i. Srednji čas popravil izdelka lahko izrazimo kot utežno vsoto

$$\mathrm{MTTR_s} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i m_{\mathrm{um}i} \mathrm{MTTR}_i}{\sum_{i=1}^n q_i m_{\mathrm{um}i}} \tag{7.8}$$

Pričakovano število nenačrtovanih popravil $i$te komponente je

$$m_{\mathrm{um}i} = \begin{cases} \frac{t_{\mathrm{o}i}}{\mathrm{MTBF}_i} & \text{obnovljivi procesi} \\ \int_0^{t_{\mathrm{o}i}} \rho_i(t) dt & \text{procesi minimalnih popravil} \end{cases}$$

Paralelna vezava enakih komponent k od n! Popravilo lahko izvedemo na različne načine

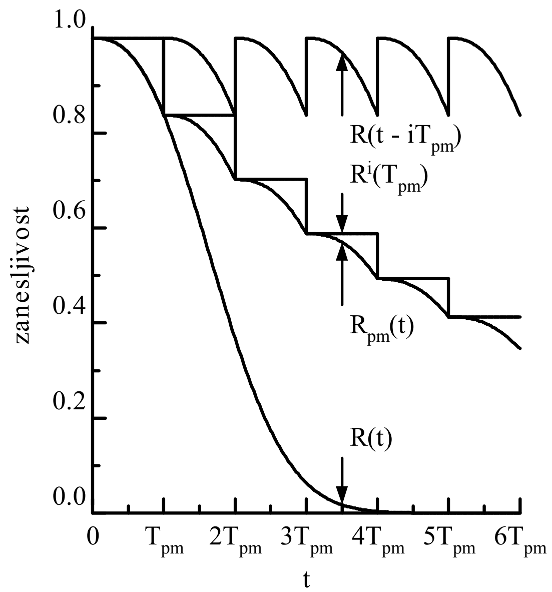
- popravilo komponente takoj po okvari,
- popravilo ene komponente po odpovedi $n - k + 1$ komponent,
- popravilo ene komponent ob sočasnem vzdrževanju vseh komponent po odpovedi $n - k + 1$ komponent in
- popravilo vseh komponent ob sočasnem vzdrževanju vseh komponent po odpovedi $n - k + 1$ komponent.

7.4 Zanesljivost in preventivno vzdrževanje

Zanesljivost v prvem in drugem intervalu podajata enačbi

$$\begin{aligned} R_{\mathrm{pm}}(t) &= R(t) && \text{za } 0 \leq t < T_{\mathrm{pm}} \\ R_{\mathrm{pm}}(t) &= R(T_{\mathrm{pm}})R(t - T_{\mathrm{pm}}) && \text{za } T_{\mathrm{pm}} \leq t < 2T_{\mathrm{pm}} \end{aligned}$$

Z $R(T_{\mathrm{pm}})$ označimo verjetnost preživetja do prvega preventivnega vzdrževanja, z $R(t - T_{\mathrm{pm}})$ pa verjetnost preživetja v naslednjem intervalu $t - T_{\mathrm{pm}}$, če je bila komponenta v trenutku T_{pm} obnovljena v stanje 'kot nov'. Splošno velja



Slika 7.2: Vpliv preventivnega vzdrževanja na zanesljivost (naraščajoča intenzivnost okvar).

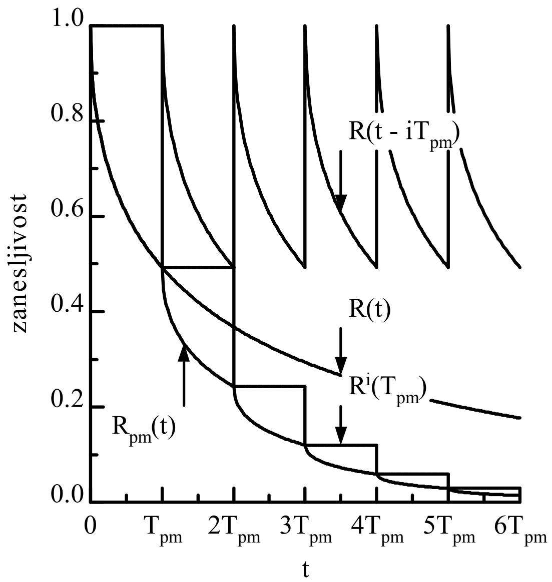
$$R_{\mathrm{pm}}(t) = R^i(T_{\mathrm{pm}})R(t - iT_{\mathrm{pm}}) \quad \text{za } iT_{\mathrm{pm}} \leq t < (i+1)T_{\mathrm{pm}} \tag{7.9}$$

kjer je $R^i(T_{\mathrm{pm}})$ verjetnost preživetja do $i$tega preventivnega vzdrževanja in $R(t - iT_{\mathrm{pm}})$ verjetnost delovanja brez okvar v intervalu $t - iT_{\mathrm{pm}}$. Izpeljimo še srednji čas med okvarami

$$\begin{aligned} \mathrm{MTBF} = \int_0^\infty R_{\mathrm{pm}}(t)dt &= \sum_{i=0}^\infty \int_{iT_{\mathrm{pm}}}^{(i+1)T_{\mathrm{pm}}} R_{\mathrm{pm}}(t)dt \\ &= \sum_{i=0}^\infty R^i(T_{\mathrm{pm}}) \int_{iT_{\mathrm{pm}}}^{(i+1)T_{\mathrm{pm}}} R(t - iT_{\mathrm{pm}})dt \\ &= \sum_{i=0}^\infty R^i(T_{\mathrm{pm}}) \int_0^{T_{\mathrm{pm}}} R(t)dt \\ &= \frac{\int_0^{T_{\mathrm{pm}}} R(t)dt}{1 - R(T_{\mathrm{pm}})} \end{aligned}$$

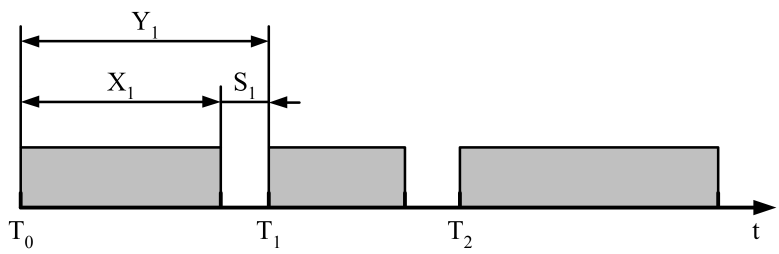
V nekaterih primerih je potrebno upoštevati tudi verjetnost p, da se okvara pojavi med procesom popravila. Zanesljivost po i vzdrževalnih posegih z upoštevanjem verjetnosti p je

$$R_{\mathrm{pm}}(t) = R^i(T_{\mathrm{pm}})(1-p)^i R(t - iT_{\mathrm{pm}}) \quad \text{za } iT_{\mathrm{pm}} \leq t < (i+1)T_{\mathrm{pm}}$$



Slika 7.3: Vpliv preventivnega vzdrževanja na zanesljivost (padajoča intenzivnost okvar).

7.5 Naključni točkovni procesi



Slika 7.4: Primer časovne slike stanj komponente.

Relacije med posameznimi naključnimi spremenljivkami podajajo enačbe

$$Y_i = X_i + S_i = T_i - T_{i-1} \quad T_i = \sum_{j=1}^{i} Y_j \tag{7.10}$$

Zapišimo še pričakovane vrednosti časov delovanj in nedelovanj

$$E[X_i] = \mathrm{MTBF} \qquad E[S_i] = \mathrm{MTR} \tag{7.11}$$

7.5.1 Obnovitveni proces

Če je $S_i \approx 0$, predstavlja naključna spremenljivka X_i čas delovanja med $i-1$ in $i$to okvaro, naključna spremenljivka T_i pa čas delovanja do $i$te okvare. Če so naključne spremenljivke X_i statistično neodvisne in jim pripada enaka gostota porazdelitve verjetnosti okvar $f(t)$, porazdelitev verjetnosti časov delovanj T_i za $i \to \infty$ konvergira k normalni gostoti porazdelitve verjetnosti

$$f_i(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left\{-\frac{(t-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right\} \tag{7.12}$$

s srednjo vrednostjo

$$\mu_i = E[T_i] = \sum_{j=1}^{i} E[X_j] = iE[X_i] = i\mathrm{MTBF} \tag{7.13}$$

in varianco

$$\begin{aligned}
\sigma_i^2 &= E[(T_i - i\mathrm{MTBF})^2] \\
&= E[(\sum_{j=1}^{i}(X_j - \mathrm{MTBF}))^2)] \\
&= \sum_{j=1}^{i}\sum_{k=1}^{i} E[(X_j - \mathrm{MTBF})(X_k - \mathrm{MTBF})] \\
&= \sum_{j=1}^{i} E[(X_j - \mathrm{MTBF})^2] = i\sigma^2
\end{aligned} \tag{7.14}$$

saj je

$$E[(X_j - \mathrm{MTBF})(X_k - \mathrm{MTBF})] = 0 \qquad j \neq k$$

Naključni točkovni proces lahko izrazimo tudi s številom okvar v intervalu $[0, t]$. Naj bo $N(t)$ diskretna naključna spremenljivka, ki podaja kumulativno število okvar v intervalu $[0, t]$. Odtod sledi

$$\begin{aligned}
\Pr\{N(t) = 0\} &= \Pr\{T_1 > t\} \\
\Pr\{N(t) = i\} &= \Pr\{T_i \leq t < T_{i+1}\} \\
&= \Pr\{T_i \leq t\} - \Pr\{T_{i+1} \leq t\} \\
&= F_i(t) - F_{i+1}(t)
\end{aligned} \tag{7.15}$$

kjer je kumulativna funkcija okvar

$$F_0(t) = \begin{cases} 0 & \text{za } t \leq 0 \\ 1 & \text{za } t > 0 \end{cases}$$

oziroma

$$F_i(t) = \int_0^t F_{i-1}(t-u) f(u) du \quad i = 1, 2, \ldots$$

Homogeni Poissonov proces

Če je

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \tag{7.16}$$

z intenzivnostjo okvar $\lambda = 1/\text{MTBF}$, velja

$$\begin{aligned} F_0(t) &= 1 \\ F_1(t) &= 1 - e^{-\lambda t} \\ F_2(t) &= 1 - e^{-\lambda t} - \lambda t e^{-\lambda t} \\ F_3(t) &= 1 - e^{-\lambda t} - \lambda t e^{-\lambda t} - \frac{(\lambda t)^2}{2} e^{-\lambda t} \end{aligned}$$

sestavimo splošen obrazec za kumulativno funkcijo okvar

$$F_i(t) = 1 - \sum_{j=0}^{i-1} \frac{(\lambda t)^j}{j!} e^{-\lambda t} \quad i = 0, 1, \ldots \tag{7.17}$$

Odtod sledi

$$\Pr\{N(t) = i\} = \sum_{j=0}^{i} \frac{(\lambda t)^j}{j!} e^{-\lambda t} - \sum_{j=0}^{i-1} \frac{(\lambda t)^j}{j!} e^{-\lambda t} = \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} \tag{7.18}$$

Obnovitvena funkcija

Obnovitvena funkcija podaja pričakovano število okvar v trenutku t

$$m(t) = \sum_{i=1}^{\infty} i \Pr\{N(t) = i\} \tag{7.19}$$

Če v enačbi $\Pr\{N(t) = i\}$ nadomestimo z $F_i(t) - F_{i+1}(t)$, dobimo

$$m(t) = \sum_{i=1}^{\infty} F_i(t) \tag{7.20}$$

7.5.2 Proces minimalnih popravil

Staranje izdelka lahko obravnavamo kot naključni točkovni proces in ga popišemo s funkcijo intenzivnosti

$$\rho(t) = \frac{dE[N(t)]}{dt} \tag{7.21}$$

Funkcija intenzivnosti in obnovitvena funkcija sta povezani, saj velja

$$m(t) = E[N(t)] = \int_0^t \rho(t)dt \tag{7.22}$$

7.5.3 Remont

Če je gostota porazdelitve verjetnosti okvar $f(t)$ izdelka znana, je pričakovana perioda remonta

$$\begin{aligned} E[T_{\mathrm{ov}}] &= R(T_{\mathrm{pm}})E[t|t \geq T_{\mathrm{pm}}] + F(T_{\mathrm{pm}})E[t|t < T_{\mathrm{pm}}] \\ &= R(T_{\mathrm{pm}})T_{\mathrm{pm}} + F(T_{\mathrm{pm}}) \int_0^\infty t f(t|t < T_{\mathrm{pm}})dt \end{aligned}$$

Ker iz Bayesovega teorema sledi

$$f(t|t < T_{\mathrm{pm}}) = \begin{cases} 0 & \text{za } t \geq T_{\mathrm{pm}} \\ \frac{f(t)}{F(T_{\mathrm{pm}})} & \text{za } t < T_{\mathrm{pm}} \end{cases}$$

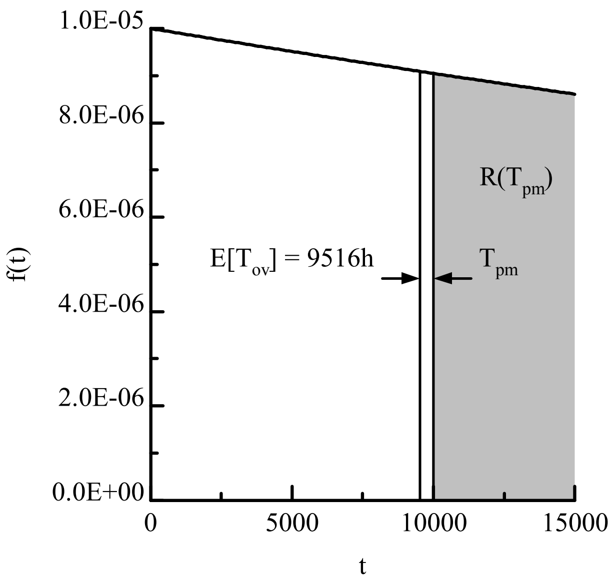
lahko končno pišemo

$$E[T_{\mathrm{ov}}] = R(T_{\mathrm{pm}})T_{\mathrm{pm}} + \int_0^{T_{\mathrm{pm}}} t f(t)dt = \int_0^{T_{\mathrm{pm}}} R(t)dt \tag{7.23}$$

Izračun pričakovane periode remonta za primer eksponentne gostote porazdelitve verjetnosti okvar

$$E[T_{\mathrm{ov}}] = \int_0^{T_{\mathrm{pm}}} e^{-\lambda t}dt = \frac{1}{\lambda}(1 - e^{-\lambda T_{\mathrm{pm}}})$$

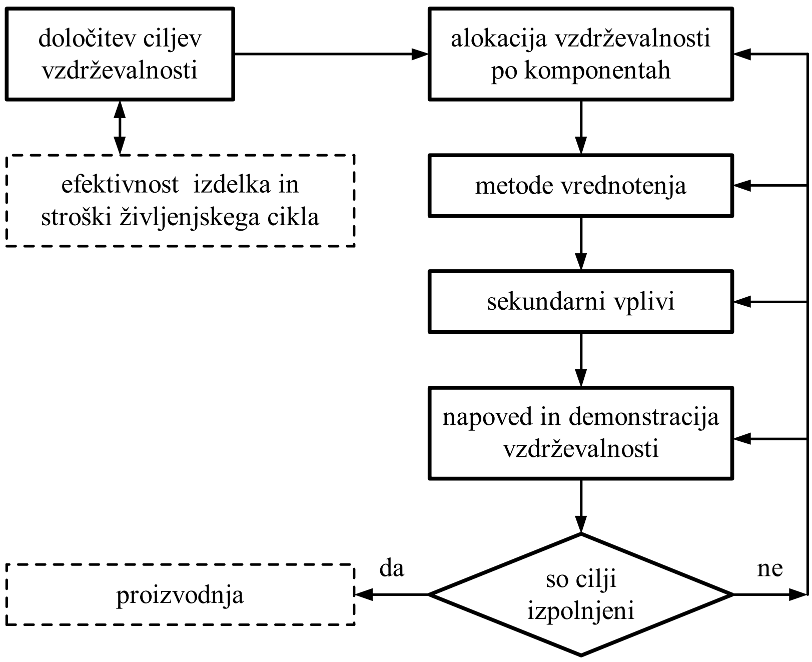
z $\lambda = 0.00001h^{-1}$ in periodo remonta $T_{\mathrm{pm}} = 10000\mathrm{h}$ prikazuje Slika 7.5.



Slika 7.5: Primer izračuna pričakovane periode remonta.

Poglavje 8

Vrednotenje na vzdrževalnost



Slika 8.1: Proces vrednotenja na vzdrževalnost.

8.1 Cilji vzdrževalnosti

Razlikujemo več kvantitativnih kazalcev vzdrževalnosti

- srednji čas popravil MTTR in standardna deviacija popravil σ,
- medialni čas popravil t_{med},
- čas $t_{25\%}$ in/ali $t_{75\%}$, ki ustreza 25% oziroma 75% verjetnosti izvedbe popravil,

- maksimalni čas t_p popravil,

$$\Pr\{T < t_p\} = H(t_p) < p \tag{8.1}$$

- razširjeni srednji čas popravil M,

$$M = \frac{m_{\mathrm{um}}(t_{\mathrm{o}})\mathrm{MTTR} + m_{\mathrm{pm}}(t_{\mathrm{o}})\mathrm{MPMT}}{m_{\mathrm{um}}(t_{\mathrm{o}}) + m_{\mathrm{pm}}(t_{\mathrm{o}})} \tag{8.2}$$

- srednji čas nedelovanj MTR in

$$\mathrm{MTR} = \mathrm{SDT} + \mathrm{MDT} + \mathrm{MTTR} \tag{8.3}$$

- število vzdrževalnih ur na obratovalno uro MH/OH.

$$\frac{\mathrm{MH}}{\mathrm{OH}} = \frac{m_{\mathrm{um}}(t)\mathrm{MTTRCREW}_{\mathrm{um}}}{t} \tag{8.4}$$

  Če v izračunu MH/OH upoštevamo tudi pričakovano število preventivnih vzdrževanj, dobimo

$$\frac{\mathrm{MH}}{\mathrm{OH}} = \frac{m_{\mathrm{um}}(t)\mathrm{MTTRCREW}_{\mathrm{um}} + m_{\mathrm{pm}}(t)\mathrm{MPMTCREW}_{\mathrm{pm}}}{t}$$

Poleg kvantitativnih kazalcev vzdrževalnosti je potrebno za kompleksne izdelke

- izbrati vrsto vzdrževanja za vsako komponento (popravilo ali zamenjava),
- izdelati program preventivnih vzdrževanj,
- izbrati nivo vzdrževanja za vsako vrsto okvare in komponento (lokalen, v servisu, pri proizvajalcu),
- določiti potrebne vzdrževalne resurse za vsako vrsto vzdrževanja in
- predvideti število vzdrževalnih kanalov, redundantnih komponent in rezervnih delov.

Ločimo tri vrste komponent

- popravljivo,
- delno popravljivo in
- nepopravljivo

ter tri nivoje vzdrževanja

vzdrževalnost primarni nivo	vzdrževalnost sekundarni nivo
- zanesljivost	- vzdrževalni resursi
- nivo vzdrževanja	- sekundarni vplivi
- izolacija okvar	- preventivno vzdrževanje
- diagnostika	- stroški življenjskega cikla
- standardizacija	- ostali pripomočki oziroma objekti
- izmenljivost delov	
- modularnost	- organizacija vzdrževanja
- dostopnost	- usposabljanje
- popravilo ali zamenjava	- nivo usposobljenosti
	- število rezervnih delov

Tabela 8.1: Primarni in sekundarni dejavniki vzdrževalnosti.

- lokalni nivo,
- srednji nivo in
- najvišji nivo.

V procesu ugotavljanja primernega nivoja vzdrževalnosti izhajamo iz stroškov. Ob upoštevanju

$$m_{\mathrm{um}}(t) = \begin{cases} \frac{t}{\mathrm{MTBF}} & \text{obnovljivi procesi} \\ \int_0^t \rho(t)dt & \text{procesi minimalnih popravil} \end{cases}$$

podaja zvezo med stroški zanesljivosti in vzdrževalnosti enačba

$$C = C_{\mathrm{u}} + m_{\mathrm{um}}(t_{\mathrm{o}})(F_{\mathrm{f}} + C_{\mathrm{f}}\mathrm{MTTR}) \tag{8.5}$$

8.2 Alokacija vzdrževalnosti po komponentah

Predpostavimo, da je ciljna vzdrževalnost na nivoju izdelka definirana z $\mathrm{MTTR}_{\mathrm{s}}^*$ in da enačba (7.8) predstavlja osnovo za alokacijo srednjih časov popravil MTTR_i komponent. Ker je $\mathrm{MTTR}_{\mathrm{s}}^*$ utežna vsota MTTR_i z utežmi

$$w_i = \frac{q_i m_{\mathrm{um}i}}{\sum_{i=1}^n q_i m_{\mathrm{um}i}}$$

ki predstavljajo relativno število popravil komponent, lahko izvedemo alokacijo vzdrževalnosti

$$\mathrm{MTTR}_i = \frac{\mathrm{MTTR}_{\mathrm{s}}^*}{n w_i} \quad i = 1, \ldots, n \tag{8.6}$$

Alternativa enačbi (8.6) je $\mathrm{MTTR}_i = \mathrm{MTTR}_{\mathrm{s}}^*$ za vse komponente. S pomočjo enačbe (7.8) lahko v praksi izračunamo vrednosti MTTR_i tudi s poskušanjem.

8.3 Metode vrednotenja

8.3.1 Izolacija okvar in diagnostika

Diagnostika je definirana kot proces lokacije okvar na nivoju, ki omogoča obnovo izdelka v stanje delovanja. Ločimo več oblik diagnostike

- manualna,
- avtomatična,
- samodiagnostika. Zmogljivost avtomatske detekcije okvar AFIC je definirana kot

$$\mathrm{AFIC} = \underbrace{\frac{\text{število detektiranih okvar}}{\text{število vseh okvar}}}_{\text{verjetnost detekcije okvar}} \underbrace{\frac{\text{število izoliranih okvar}}{\text{število detektiranih okvar}}}_{\text{verjetnost izolacije okvar}}$$

Druga cenilka BITE je stopnja lažnih alarmov

$$\mathrm{FAR} = \frac{\text{število detektiranih okvar} - \text{število pravih okvar}}{\text{število detektiranih okvar}}$$

Stopnja lažnih odstranitev FRR

$$\mathrm{FRR} = \frac{\text{število odstranitev, ki se pozneje izkažejo za nepotrebne}}{\text{število vseh odstranjenih komponent}}$$

8.3.2 Standardizacija in izmenljivost delov

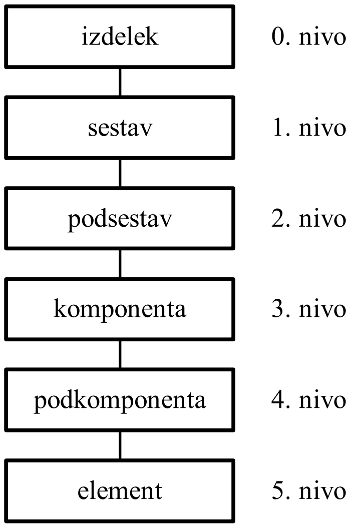
8.3.3 Modularnost in dostopnost

Izdelek je sestavljen iz primarnih enot, imenovanih tudi LRU (line replaceable unit) in sekundarnih enot SRU (shop replaceable unit). Enota LRU predstavlja najvišji nivo modularnosti, ki se dalje deli na SRU module. SRU moduli so lahko spet sestavljeni iz SRU modulov na nižjem nivoju. Na najnižjem nivoju so elementi (vijaki, kovice, upori, tranzistorji).

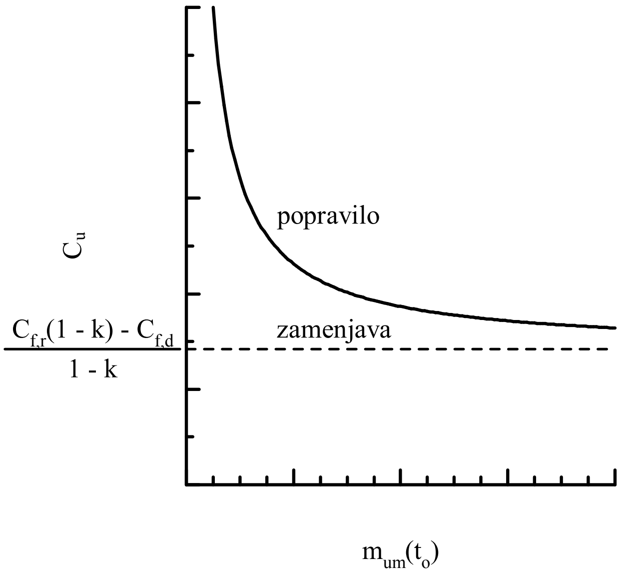
Vrednotenje na dostopnost obravnava konfiguracijo izdelka od najvišjega nivoja do komponent, ki se neposredno menjajo.

8.3.4 Popravilo ali zamenjava

Ekonomski kazalci, ki vplivajo na odločitev za popravilo ali zamenjavo. Naj bo $m_{\mathrm{um}}(t_{\mathrm{o}})$ pričakovano število nenačrtovanih popravil v intervalu $[0, t_{\mathrm{o}}]$, C_{u} zaključni stroški na enoto, $F_{\mathrm{f,r}}$ fiksni stroški popravila, $F_{\mathrm{f,d}}$ fiksni stroški zamenjave, $C_{\mathrm{f,r}}$ variabilni stroški



Slika 8.2: Nivojska razčlenitev izdelka.



Slika 8.3: Popravilo ali zamenjava za primer $F_{\mathrm{f,d}} < F_{\mathrm{f,r}}$ in $C_{\mathrm{f,d}} < C_{\mathrm{f,r}}$.

popravila na enoto, $C_{\mathrm{f,d}}$ variabilni stroški zamenjave na enoto in k delež okvar, ki jih ni mogoče popraviti ($0 \leq k < 1$). Od tod sledi

$$\begin{aligned} \text{stroški popravil} &= F_{\mathrm{f,r}} + (C_{\mathrm{f,r}}(1-k) + C_{\mathrm{u}}k)m_{\mathrm{um}}(t_{\mathrm{o}}) \\ \text{stroški zamenjav} &= F_{\mathrm{f,d}} + (C_{\mathrm{f,d}} + C_{\mathrm{u}})m_{\mathrm{um}}(t_{\mathrm{o}}) \end{aligned} \tag{8.7}$$

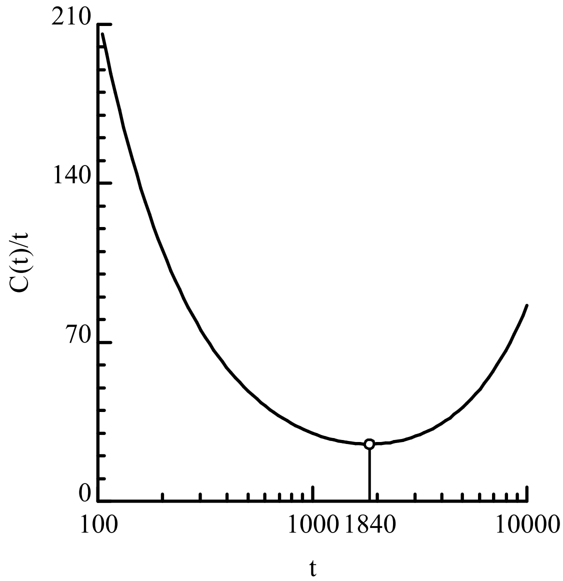
Če je izpolnjena neenačba

$$F_{\mathrm{f,d}} + (C_{\mathrm{f,d}} + C_{\mathrm{u}})m_{\mathrm{um}}(t_{\mathrm{o}}) \leq F_{\mathrm{f,r}} + (C_{\mathrm{f,r}}(1-k) + C_{\mathrm{u}}k)m_{\mathrm{um}}(t_{\mathrm{o}})$$

se odločimo za zamenjavo. Izrazimo še C_{u} kot funkcijo $m_{\mathrm{um}}(t_{\mathrm{o}})$

$$C_{\mathrm{u}} \leq \frac{F_{\mathrm{f,r}} - F_{\mathrm{f,d}}}{m_{\mathrm{um}}(t_{\mathrm{o}})(1-k)} + \frac{C_{\mathrm{f,r}}(1-k) - C_{\mathrm{f,d}}}{1-k} \tag{8.8}$$

Model zamenjave



Slika 8.4: Stroški popravil na enoto časa za $C_{\mathrm{u}} + F_{\mathrm{o}} = 21.000$ EUR, $C_{\mathrm{o}} = 5$ EUR, $F_{\mathrm{f}} + C_{\mathrm{f}}\mathrm{MTTR} = 500$ EUR, $a = 1 \times 10^{-6}$ in $b = 2.3$.

Če zanemarimo podporne stroške, neto preostalo vrednost in obresti, je funkcija stroškov

$$C(t) = C_{\mathrm{u}} + F_{\mathrm{o}} + C_{\mathrm{o}}t + (F_{\mathrm{f}} + C_{\mathrm{f}}\mathrm{MTTR}) \int_0^t \rho(t)dt \tag{8.9}$$

Če predpostavimo, da funkcija intenzivnosti ustreza potenčnemu zakonu $\rho(t) = abt^{b-1}$, lahko izrazimo še stroške $C(t)$ na enoto časa t

$$C = \frac{C(t)}{t} = \frac{C_{\mathrm{u}} + F_{\mathrm{o}}}{t} + C_{\mathrm{o}} + at^{b-1}(F_{\mathrm{f}} + C_{\mathrm{f}}\mathrm{MTTR}) \tag{8.10}$$

Minimum funkcije C poiščemo tako, da enačbo (8.10) odvajamo po t

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{C_{\mathrm{u}} + F_{\mathrm{o}}}{t^2} + a(b-1)t^{b-2}(F_{\mathrm{f}} + C_{\mathrm{f}}\mathrm{MTTR}) = 0 \tag{8.11}$$

Rešitev enačbe (8.11) je optimalni čas zamenjave

$$t = \left(\frac{C_{\mathrm{u}} + F_{\mathrm{o}}}{a(b-1)(F_{\mathrm{f}} + C_{\mathrm{f}}\mathrm{MTTR})}\right)^{1/b} \tag{8.12}$$

8.3.5 Proaktivno vzdrževanje

Preventivno vzdrževanje

Perioda preventivnih vzdrževanj T_{pm} se določa na osnovi stroškovne analize, ki temelji na iskanju optimuma med stroški nenačrtovanih popravil C_{um} in stroški preventivnih vzdrževanj C_{pm}. Če je pričakovano število okvar med dvema zaporednima vzdrževanjema

$$E[N(t)] = \int_0^{T_{\mathrm{pm}}} \rho(t)dt$$

so pričakovani stroški nenačrtovanih popravil na enoto časa

$$\frac{C_{\mathrm{um}}}{T_{\mathrm{pm}}} \int_0^{T_{\mathrm{pm}}} \rho(t)dt$$

Stroški nenačrtovanih in načrtovanih popravil na enoto časa so tedaj

$$C(T_{\mathrm{pm}}) = \frac{C_{\mathrm{pm}}}{T_{\mathrm{pm}}} + \frac{C_{\mathrm{um}}}{T_{\mathrm{pm}}} \int_0^{T_{\mathrm{pm}}} \rho(t)dt \tag{8.13}$$

Nadomestimo najprej funkcijo intenzivnosti $\rho(t)$ z abt^{b-1} in razrešimo integral

$$C(T_{\mathrm{pm}}) = \frac{C_{\mathrm{pm}}}{T_{\mathrm{pm}}} + aT_{\mathrm{pm}}^{b-1}C_{\mathrm{um}} \tag{8.14}$$

Perioda T_{pm}, ki sovpada z minimumom funkcije $C(T_{\mathrm{pm}})$, ustreza optimalni periodi preventivnih vzdrževanj. Od tod sledi

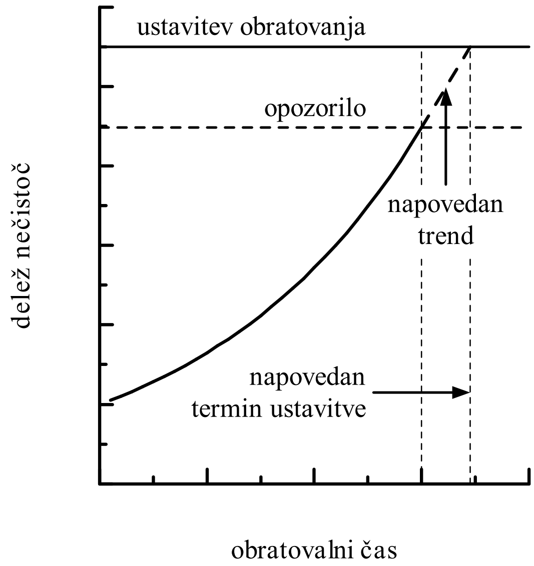
$$\frac{dC(T_{\mathrm{pm}})}{dT_{\mathrm{pm}}} = -\frac{C_{\mathrm{pm}}}{T_{\mathrm{pm}}^2} + a(b-1)T_{\mathrm{pm}}^{b-2}C_{\mathrm{um}} = 0 \tag{8.15}$$

in

$$T_{\mathrm{pm}} = \left(\frac{C_{\mathrm{pm}}}{a(b-1)C_{\mathrm{um}}}\right)^{1/b} \tag{8.16}$$

Konstanta b mora biti večja od 1, sicer enačba (8.14) nima minimuma.

Napovedano vzdrževanje



Slika 8.5: Merjenje deleža nečistoč v olju.

8.4 Sekundarni vplivi

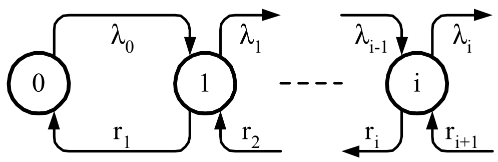
Zanesljivost človeka je definirana kot

$$R_{\mathrm{h}} = 1 - \frac{e}{n}$$

kjer sta n število opravljenih nalog in e število neuspešno opravljenih nalog.

8.5 Vzdrževalnost in oskrba z rezervnimi deli

8.5.1 Proces rojstev in smrti in zakasnitev vzdrževanja



Slika 8.6: Diagram prehodov za proces rojstev in smrti.

Na osnovi diagrama stanj lahko zapišemo sistem diferencialnih enačb

$$
\begin{aligned}
&P_0'(t) = r_1 P_1(t) - \lambda_0 P_0(t) \\
&P_i'(t) = \lambda_{i-1} P_{i-1}(t) + r_{i+1} P_{i+1}(t) - (\lambda_i + r_i) P_i(t) \quad i = 1, 2, \ldots
\end{aligned}
$$

Ko $t \to \infty$, $dP_i/dt \to 0$ in $P_i(t) \to P_i$. Sistem navadnih diferencialnih enačb prvega reda tako preide v sistem linearnih enačb

$$
\begin{aligned}
&0 = r_1 P_1 - \lambda_0 P_0 \\
&0 = \lambda_{i-1} P_{i-1} + r_{i+1} P_{i+1} - (\lambda_i + r_i) P_i \quad i = 1, 2, \ldots
\end{aligned}
$$

Iz prve, druge in tretje enačbe sledi

$$
P_1 = \frac{\lambda_0}{r_1} P_0,\ P_2 = \frac{\lambda_0 \lambda_1}{r_1 r_2} P_0 \text{ in } P_3 = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2}{r_1 r_2 r_3} P_0
$$

Ker se obrazec ponavlja, velja

$$
P_i = C_i P_0 = \prod_{j=1}^{i} \frac{\lambda_{j-1}}{r_j} P_0 \quad i = 1, 2, \ldots \tag{8.17}
$$

Če je skupno število enakih komponent v obratovanju n in če obstaja s redundantnih komponent, je število možnih stanj enako $n + s + 1$. Ker je verjetnost gotovega dogodka $\sum_{i=0}^{n+s} P_i = 1$, je

$$
P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{n+s} C_i} \tag{8.18}
$$

Izračunajmo še pričakovano število komponent v nedelovanju

$$
L_\mathrm{r} = \sum_{i=1}^{n+s} i P_i \tag{8.19}
$$

in v delovanju

$$
L_\mathrm{o} = n \sum_{i=0}^{s} P_i + \sum_{i=s+1}^{n+s} (n + s - i) P_i \tag{8.20}
$$

Intenzivnosti okvar komponente $\lambda = 1/\mathrm{MTBF}$. Ob upoštevanju enačb (8.20) in

$$
\lambda_i = \begin{cases} \lambda n & \text{za } i \le s \\ \lambda (n + s - i) & \text{za } i > s \end{cases} \tag{8.21}
$$

je pričakovana intenzivnost okvar

$$
E[\lambda] = \sum_{i=0}^{n+s} \lambda_i P_i = \lambda n \sum_{i=0}^{s} P_i + \lambda \sum_{i=s+1}^{n+s} (n + s - i) P_i = \lambda L_\mathrm{o} \tag{8.22}
$$

Intenzivnost popravil r_i je funkcija stanja i in števila vzdrževalnih kanalov

$$r_i = \begin{cases} ri & \text{za } i \leq k \\ rk & \text{za } i > k \end{cases} \tag{8.23}$$

Intenzivnost popravil komponente $r = 1/(\mathrm{MTTR} + \mathrm{SDT})$, srednji čas zakasnitve vzdrževanja pa določa enačba

$$\mathrm{MDT} = \frac{L_\mathrm{r}}{E[\lambda]} - \frac{1}{r} \tag{8.24}$$

8.5.2 Zakasnitev logistične podpore

V nadaljevanju bomo analizirali še vpliv števila rezervnih delov p na srednji čas zakasnitve logistične podpore. Pričakovano število naročil je, izhajajoč iz procesa rojstev in smrti,

$$\mathrm{EBO} = \sum_{i=p+1}^{s+n} (i-p) P_i \tag{8.25}$$

Izračun verjetnosti P_i je enak kot v Poglavju 8.5.1. Srednji čas zakasnitve logistične podpore na nivoju rezervnega dela je sedaj

$$\mathrm{SDT} = \frac{\mathrm{EBO}}{L_\mathrm{r}} \mathrm{MTTR} \tag{8.26}$$

Ker so enačbe (8.19), (8.24) in (8.26) povezane, jih rešujemo iterativno.

Komponenta je sestavljena iz p različnih delov na nižjih nivojih, ki jih držimo na zalogi. Pričakovana zakasnitev logistične podpore na najvišjem nivoju SDT je torej funkcija vrste in števila rezervnih delov p_i. Izrazimo jo lahko kot utežno vsoto

$$\mathrm{SDT} = \frac{\sum_{i=1}^{p} q_i E[\lambda_i] \mathrm{SDT}_i}{\sum_{i=1}^{p} q_i E[\lambda_i]} \tag{8.27}$$

kjer je q_i število enakih delov, $E[\lambda_i]$ pričakovana intenzivnost okvar $i$tega dela, ocenjena po enačbi (8.22) in SDT_i pripadajoči srednji čas zakasnitve logistične podpore.

8.6 Napoved in demonstracija vzdrževalnosti

8.6.1 Napoved vzdrževalnosti

8.6.2 Demonstracija vzdrževalnosti

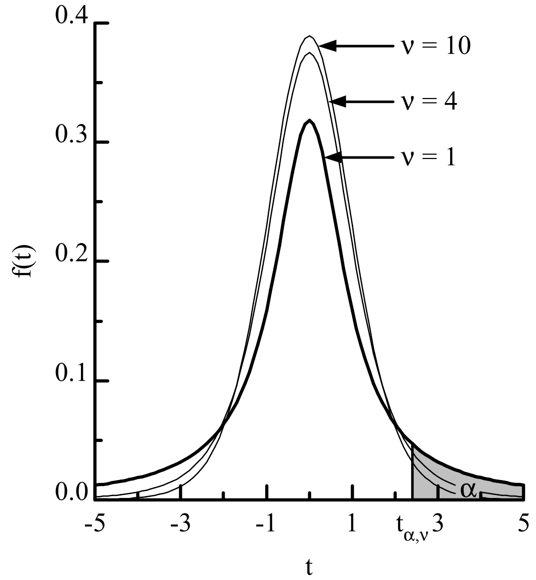
Če je n naključno izbrano skupno število simuliranih okvar in q_i število komponent vrste i, je $q_i \lambda_i n / \sum_{i=1}^{n} q_i \lambda_i$ število simuliranih okvar $i$te vrste.

Predmet: ____________ Datum: ____________

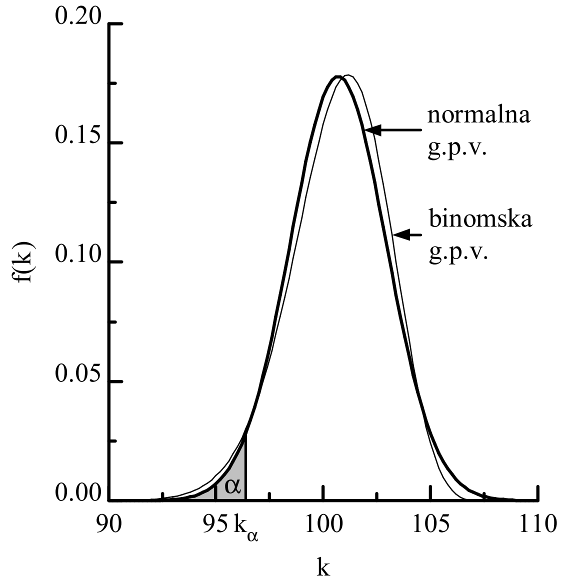
Nivo popravil: izdelek ☐ sestav ☐ podsestav ☐ komponenta ☐ podkomponenta ☐ element ☐ Stran: ____ od ____

predmet	vrsta okvare	število enakih komponent q_i	intenzivnost okvar λ	čas popravila: čas dostopa	čas popravila: diagnostični čas	čas popravila: aktivni čas zamenjave	čas popravila: aktivni čas popravila	čas popravila: čas prilagajanja	čas popravila: čas preverjanja	$MTTR_i$	$\lambda \times q_i \times MTTR_i$
modul 1		2									
	A		0.121	0.20	0.50	0.05	2.15	0.00	0.03	2.93	0.71
	B		0.023	0.30	0.60	0.10	0.00	0.08	0.45	1.53	0.07
	C		0.008	0.30	1.00	0.08	0.33	0.05	0.00	1.76	0.03
	D		0.210	0.20	0.40	0.00	1.10	0.21	0.12	2.03	0.85
Σ			0.362								1.66
modul 2		3									
	E		0.301	0.31	0.80	0.30	0.00	0.20	0.30	1.91	1.72
	F		0.076	0.11	0.60	0.00	1.33	0.05	0.20	2.29	0.52
	G		0.045	0.05	0.75	0.00	1.50	0.00	0.20	2.50	0.34
Σ			0.422								2.58
Σ			0.784	MTTR = 4.24/(2×0.362+3×0.422) = 2.13							4.24

Slika 8.7: Primer napovedi vzdrževalnosti z uporabo tabel.



Slika 8.8: Studentova gostota porazdelitve verjetnosti.



Slika 8.9: Normalna in binomska gostota porazdelitve verjetnosti za $n = 106$, $\hat{p} = 0.95$ in $n\hat{p}(1 - \hat{p}) = 5.035$.

Naj bodo $t_1, \ldots, t_n$ izmerjeni časi popravil ter

$$\widehat{\mathrm{MTTR}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} t_i \text{ in } \hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(t_i - \widehat{\mathrm{MTTR}})^2}$$

ocenjen srednji čas in standardna deviacija popravil. Iz centralnega limitnega teorema sledi, da z naraščanjem n porazdelitev naključne spremenljivke $\hat{\text{MTTR}}$ konvergira k normalni porazdelitvi s srednjo vrednostjo $E[\hat{\text{MTTR}}] = \text{MTTR}$ in standardno deviacijo $\sigma_{\hat{\text{MTTR}}} = \hat{\sigma}/\sqrt{n}$. Naključni spremenljivki

$$t = \frac{\hat{\text{MTTR}} - \text{MTTR}}{\hat{\sigma}/\sqrt{n}}$$

približno ustreza Studentova porazdelitev z $\nu = n - 1$ prostostnimi stopnjami. Ker je gostota porazdelitve verjetnosti

$$f(t) = \frac{\Gamma[(\nu+1)/2]}{\Gamma[\nu/2]\sqrt{\pi\nu(1+t^2/\nu)^{\nu+1}}} \tag{8.28}$$

simetrična glede na vrednost nič (Slika 8.8), velja

$$\Pr\{t < t_{\alpha,\nu}\} = \Pr\{t > -t_{\alpha,\nu}\} = 1 - \alpha$$

Od tod sledi

$$\Pr\{\text{MTTR} < \hat{\text{MTTR}} + \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} t_{\alpha,n-1}\} = 1 - \alpha \tag{8.29}$$

Predpostavimo, da je ciljna vzdrževalnost definirana z MTTR^*. Če velja

$$\hat{\text{MTTR}} + \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} t_{\alpha,n-1} \leq \text{MTTR}^* \tag{8.30}$$

lahko s stopnjo zaupanja $1 - \alpha$ trdimo, da bo ciljni MTTR^* dosežen.

Kadar je cilj vzdrževalnosti izražen s t_p, poiščemo spodnjo mejo zaupanja. Verjetnost, da bo do trenutka t_p realiziranih k popravil, izrazimo s $\hat{p} = k/n$. Ob upoštevanju DeMoivre-Laplaceovega teorema sledi

$$\Pr\{k > k_\alpha\} = \Pr\{k > n\hat{p} - z_\alpha\sqrt{n\hat{p}(1-\hat{p})}\} = 1 - \alpha$$

kjer normirani odklon z_α izhaja iz Laplaceove funkcije $\Phi(z_\alpha) = 1 - \alpha$. Če je izpolnjena neenačba

$$\hat{p} - z_\alpha\sqrt{\frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{n}} \geq p^* \tag{8.31}$$

lahko s stopnjo zaupanja $1 - \alpha$ sklepamo, da bo ciljni delež popravil p^* do trenutka t_{p^*} dosežen ali presežen.

Poglavje 9

Razpoložljivost

$$\text{razpoložljivost} = \frac{\text{čas delovanja}}{\text{čas delovanja} + \text{čas nedelovanja}} \tag{9.1}$$

9.1 Koncept in definicije

Razpoložljivost je verjetnost, da bo komponenta v določenem trenutku ali v določenem časovnem intervalu pri določenih pogojih uporabe, pogojih okolja in pogojih vzdrževanja v stanju delovanja.

Povprečna razpoložljivost v intervalu $[0, T]$

$$A(T) = \frac{1}{T}\int_0^T A(t)dt \tag{9.2}$$

Posplošitev povprečne razpoložljivosti

$$A(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2} A(t)dt \tag{9.3}$$

Stacionarna razpoložljivost

$$A = \lim_{t\to\infty} A(t) \tag{9.4}$$

9.1.1 Vgrajena razpoložljivost

Vgrajena razpoložljivost

$$A_{\mathrm{i}} = \lim_{t\to\infty} A(t) = \frac{\mathrm{MTBF}}{\mathrm{MTBF} + \mathrm{MTTR}} \tag{9.5}$$

9.1.2 Dosežena razpoložljivost

Dosežena razpoložljivost A_a je definirana kot

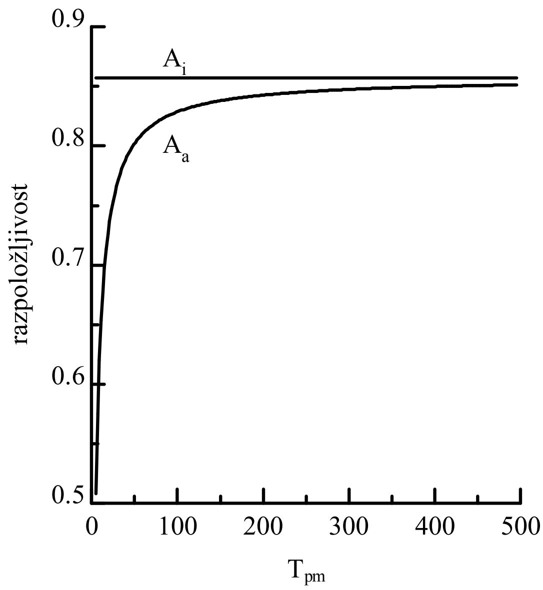
$$A_\mathrm{a} = \frac{\mathrm{MTBM}}{\mathrm{MTBM} + M} \tag{9.6}$$

Srednji čas med popravili

$$\mathrm{MTBM} = \frac{t_\mathrm{o}}{m_\mathrm{um}(t_\mathrm{o}) + m_\mathrm{pm}(t_\mathrm{o})} \tag{9.7}$$

Pričakovano število preventivnih vzdrževanj $m_\mathrm{pm}(t_\mathrm{o})$ za primer konstantne periode preventivnih vzdrževanj T_pm določa enačba

$$m_\mathrm{pm}(t_\mathrm{o}) = \frac{t_\mathrm{o}}{T_\mathrm{pm}}$$



Slika 9.1: Razpoložljivost in perioda preventivnih vzdrževanj.

9.1.3 Operativna razpoložljivost

$$A_\mathrm{o} = \frac{\mathrm{MTBM}}{\mathrm{MTBM} + M'} \tag{9.8}$$

M' izračunamo tako, da v enačbi (8.2) MTTR nadomestimo z MTR.

9.1.4 Posplošena operativna razpoložljivost

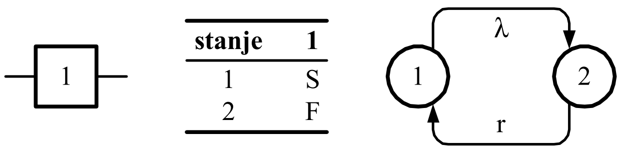
Naj bo

$$\text{RT} = \text{povprečni prosti čas} + \text{povprečni čas v stanju pripravljenosti}$$

Če je v času RT intenzivnost okvar enaka nič, lahko zapišemo še enačbo za posplošeno operativno razpoložljivost

$$A_{\mathrm{g}} = \frac{\text{MTBM} + \text{RT}}{\text{MTBM} + \text{RT} + M'} \tag{9.9}$$

9.2 Eksponentni model razpoložljivosti



Slika 9.2: Blokovni diagram, tabela stanj in drevo prehodov za komponento z možnostjo popravil.

Verjetnosti, da se bo komponenta nahajala v enem od možnih stanj, dobimo z rešitvijo sistema enačb

$$\begin{bmatrix} P_1'(t) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda & r \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{bmatrix} \tag{9.10}$$

S substitucijo $P_2(t) = 1 - P_1(t)$ prevedemo enačbo v linearno diferencialno enačbo prvega reda

$$P_1'(t) + (\lambda + r)P_1(t) = r$$

Integracijski faktor je $e^{(\lambda+r)t}$, splošni integral pa

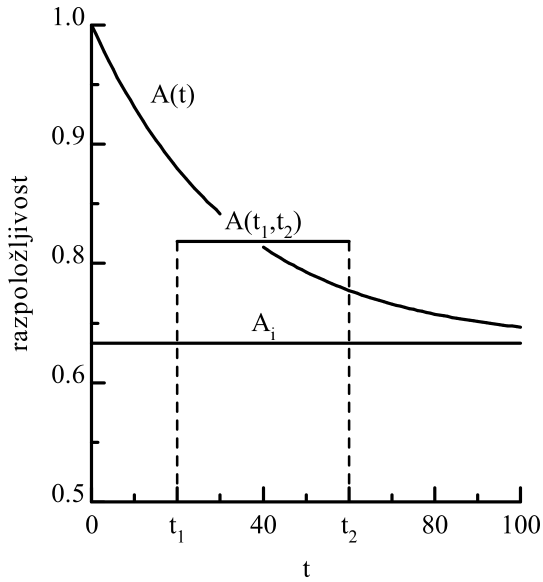
$$P_1(t) = e^{-(\lambda+r)t}\left(\int re^{(\lambda+r)t}dt + C\right)$$

Vrednost integracijske konstante C določimo iz robnega pogoja $P_1(0) = 1$

$$C = 1 - \frac{r}{\lambda + r} = \frac{\lambda}{\lambda + r}$$

Verjetnost, da se bo komponenta v trenutku t nahajala v stanju 1, je torej

$$P_1(t) = \frac{r}{\lambda + r} + \frac{\lambda}{\lambda + r}e^{-(\lambda+r)t} \tag{9.11}$$



Slika 9.3: Razpoložljivost komponente za primer $\lambda = 0.01$ in $r = 0.02$.

Ker je stanje 1 razpoložljivo, je trenutna razpoložljivost $A(t) = P_1(t)$. Povprečna razpoložljivost v intervalu $[t_1, t_2]$ je

$$\begin{aligned} A(t_1, t_2) &= \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (\frac{r}{\lambda + r} + \frac{\lambda}{\lambda + r} e^{-(\lambda+r)t}) dt \\ &= \frac{r}{\lambda + r} + \frac{\lambda}{(\lambda + r)^2 (t_2 - t_1)} (e^{-(\lambda+r)t_1} - e^{-(\lambda+r)t_2}) \end{aligned} \tag{9.12}$$

V limiti $t \to \infty$ trenutna razpoložljivost konvergira k

$$A_\mathrm{i} = \frac{r}{\lambda + r} = \frac{\mathrm{MTBF}}{\mathrm{MTBF} + \mathrm{MTTR}} \tag{9.13}$$

9.3 Razpoložljivost sestavljenih izdelkov

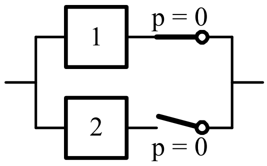
Medtem ko je razpoložljivost izdelka, sestavljenega iz n zaporedno vezanih komponent,

$$A_\mathrm{s}(t) = \prod_{i=1}^{n} A_i(t) \tag{9.14}$$

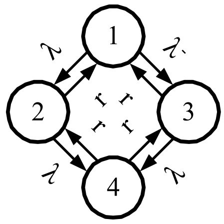
je razpoložljivost izdelka, sestavljenega iz n paralelno vezanih komponent,

$$A_\mathrm{s}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - A_i(t)) \tag{9.15}$$

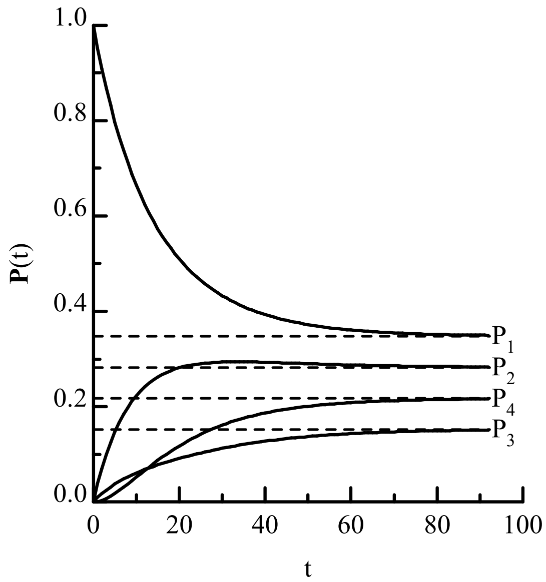
9.3.1 Pasivne paralelne vezave



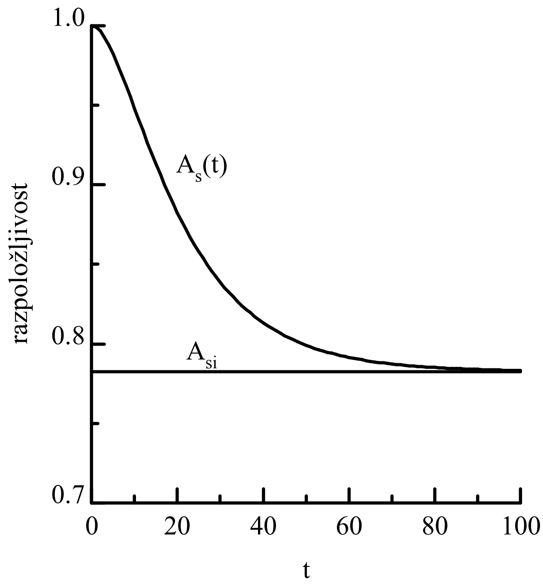
stanje	1	2	izdelek
1	S	S	S
2	F	S	S
3	S	F	S
4	F	F	F



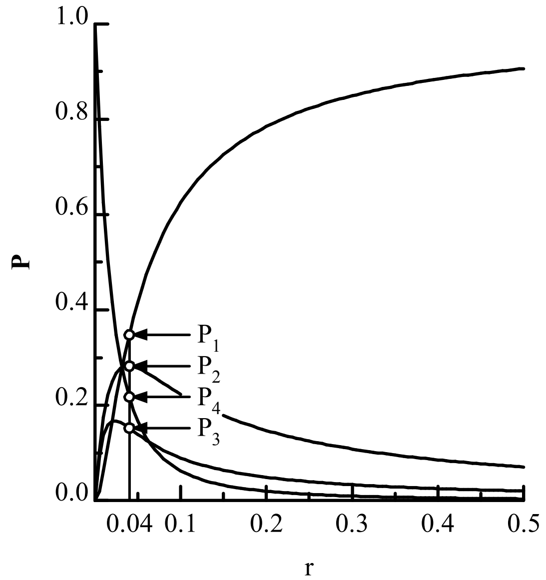
Slika 9.4: Blokovni diagram, tabela stanj in drevo prehodov za pasivno paralelno vezavo z možnostjo popravil.



Slika 9.5: Vektor stanj kot funkcija časa t.

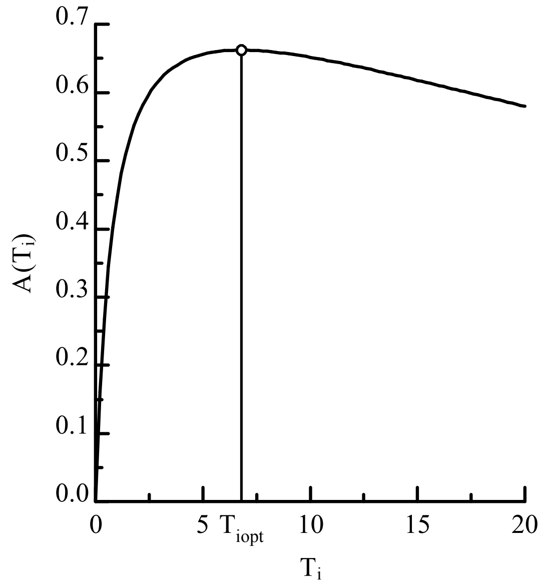


Slika 9.6: Razpoložljivost pasivne paralelne vezave za primer $\lambda = 0.04$, $\lambda^- = 0.01$ in $r = 0.04$.



Slika 9.7: Vpliv intenzivnosti popravil na vektor stanj **P**.

9.4 Kontrola in razpoložljivost



Slika 9.8: Funkcija razpoložljivosti $A(T_\mathrm{i})$ za primer $\lambda = 0.04$, MIT $= 1$ in MTTR $= 5$.

Pričakovani čas med dvema kontrolnima pregledoma je

$$T_\mathrm{i} + \mathrm{MIT} + \mathrm{MTTR}(1 - R(T_\mathrm{i}))$$

Za oceno razpoložljivosti potrebujemo še pričakovani čas do okvare. Ta lahko nastopi v intervalu $[0, T_\mathrm{i}]$. Pričakovani čas do okvare je v tem primeru

$$E[t|T \leq T_\mathrm{i}] = \int_0^\infty t f(t|T \leq T_\mathrm{i}) dt = \frac{\int_0^{T_\mathrm{i}} t f(t) dt}{F(T_\mathrm{i})}$$

Če okvara v omenjenem intervalu ne nastopi, ustreza pričakovani čas delovanja periodi kontrolnih pregledov. Skupni pričakovani čas delovanja

$$\int_0^{T_\mathrm{i}} t f(t) dt + R(T_\mathrm{i}) T_\mathrm{i} = \int_0^{T_\mathrm{i}} R(t) dt$$

Kvocient obeh časov je stacionarna razpoložljivost

$$A(T_\mathrm{i}) = \frac{\int_0^{T_\mathrm{i}} R(t) dt}{T_\mathrm{i} + \mathrm{MIT} + \mathrm{MTTR}(1 - R(T_\mathrm{i}))} \tag{9.16}$$

Iščemo periodo kontrolnih pregledov T_i, pri kateri bo razpoložljivost maksimalna.

9.5 Vrednotenje izdelka

$$\mathrm{MTTR} = \frac{1 - A_\mathrm{i}}{A_\mathrm{i}} \mathrm{MTBF} \tag{9.17}$$

9.5.1 Alokacija vzdrževalnosti

$$A_i = \sqrt[n]{A_\mathrm{s}} \quad \mathrm{MTTR}_i \leq \frac{1 - A_i}{A_i} \mathrm{MTBF}_i$$