

1. Pouzdanost složenih sistema

Sistemi predstavljaju skupove elemenata i relacija između njih i njihovih karakteristika povezanih međusobno u celinu na način pogodan za vršenje korisnog rada. Većina konstrukcija u mašinstvu predstavlja sisteme koji se sastoje od pojedinih sklopova, podsklopova, standardnih i opštih delova, itd. Analiza pouzdanosti složenih sistema ili nekog njegovog sklopa ili podsklopa nalaže poznavanje pouzdanosti svakog izvršioca elementarnih funkcija ili parcijalnih funkcija. U ovom delu razmatraće se pouzdanost sistema za poznate pouzdanosti izvršioca funkcija koji čine sistem. Nivo pouzdanosti se utvrđuje u fazi procesa konstruisanja na osnovu analitičkih, laboratorijskih i/ili eksperimentalnih istraživanja. Takođe, u procesu projektovanja i konstruisanja se odlučuje o konfiguraciji složenih sistema (broj delova, sklopova, podsklopova i njihova međusobna povezanost).

Prema načinu vezivanja delova, sklopova i podsklopova složeni sistemi¹ mogu biti formirani kao:

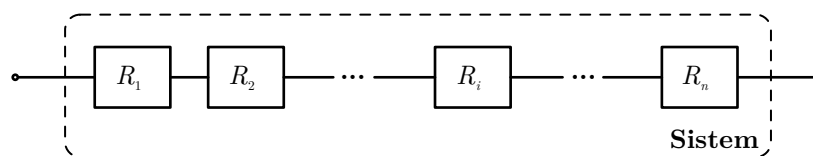
- Sistemi sa rednom vezom (konfiguracijom) elemenata,
- Sistemi sa paralelnom vezom elemenata,
- Sistemi sa kombinovanom vezom elemenata.

Prilikom analize ovih veza uvodi se pretpostavka da su otkazi elemenata sistema međusobno nezavisni.

1.1 Redna veza elemenata sistema

Kod redne veze elemenata pouzdanost sistema i/ili sklopa zavisi od stepena pouzdanosti svakog elementa, tj. izvršioca elementarne funkcije. Otkaz bilo kog elementa sistema izaziva otkaz celog sistema ili sklopa. Ove veze su skoro redovno prisutne kod mehaničkih i električnih sistema.

Šematski prikaz (blok šema) sistema sa rednom vezom elemenata dat je na Slici 1.1.



Slika 1.1: Šematski prikaz sistema sa rednom vezom elemenata

Pouzdanost sistema sa rednom vezom elemenata R_s izračunava se:

$$R_s = R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot R_i \cdot \dots \cdot R_n = \prod_{i=1}^n R_i, \quad (1.1)$$

gde je n broj elemenata složenog sistema redne konfiguracije.

Ako svi elementi sistema imaju istu pouzdanost:

$$R_1 = R_2 = \dots = R_i = \dots = R_n = R, \quad (1.2)$$

¹Postoje i druge konfiguracije složenih sistema, kao što su: Složeni sistemi n od m , Sistemi sa pasivnim elementom, Sistemi sa elementima u pripravnosti ... ali se oni neće razmatrati u okviru ovog kursa

tada se pouzdanost sistema može odrediti saglasno izrazu:

$$R_s = R^n, \quad (1.3)$$

a nepouzdanost sistema saglasno izrazu:

$$F_s = 1 - R_s. \quad (1.4)$$

Ako svi elementi nemaju istu pouzdanost:

$$R_1 \neq R_2 \neq \dots \neq R_i \neq \dots \neq R_n, \quad (1.5)$$

to znači da u konfiguraciji sistema postoje elementi sa najvećom (R_{\max}) i najmanjom pouzdanošću (R_{\min}). U ovom slučaju, pouzdanost sistema sa rednom vezom elemenata manja je od pouzdanosti najslabije komponente sistema čija je pouzdanost minimalna, tj:

$$R_s < R_{\min}. \quad (1.6)$$

Ako se analizira pouzdanost vremenski zavisnih redno konfigurisanih sistema, i ako se za funkciju pouzdanosti pojedinačnih komponenti usvoji eksponencijalni zakon raspodele, pouzdanost sistema je:

$$R_s = R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot R_i \cdot \dots \cdot R_n = e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot \dots \cdot e^{-\lambda_i t} \cdot \dots \cdot e^{-\lambda_n t}, \quad (1.7)$$

odnosno:

$$R_s = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_i + \dots + \lambda_n)t} = e^{-\lambda_s t}, \quad (1.8)$$

gde je:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i - \text{intenzitet otkaza sistema,}$$

λ_i – intenziteti otkaza pojedinačnih elemenata sistema.

Kada se sistem sastoji od n elemenata u rednoj vezi, koji imaju konstantne intenzitete otkaza λ_i (vreme do otkaza svakog elementa ima eksponencijalnu raspodelu), intenzitet otkaza sistema λ_s biće konstantna vrednost. Funkcija pouzdanosti sistema biće:

$$R(t) = e^{-t \sum_{i=1}^n \lambda_i}, \quad (1.9)$$

a očekivano vreme bezotkaznog rada:

$$m_s(t) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} = \frac{1}{\lambda_s} \quad (1.10)$$

U specijalnom slučaju kada su intenziteti otkaza elemenata sistema jednaki, tj.:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_i = \dots = \lambda_n = \lambda \quad (1.11)$$

važi da je intenzitet otkaza sistema:

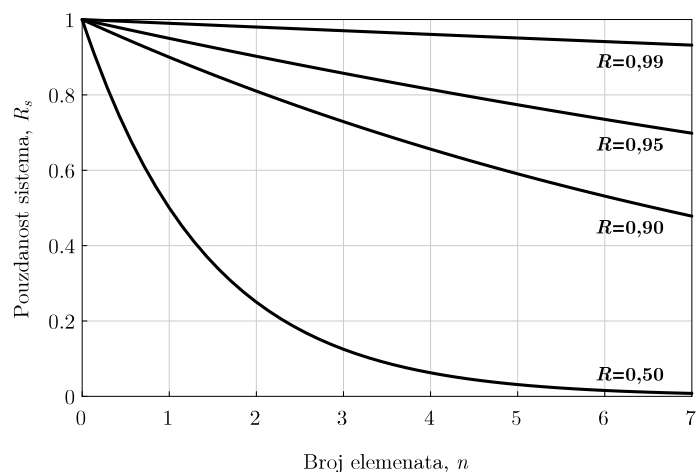
$$\lambda_s = n \cdot \lambda, \quad (1.12)$$

a pouzdanost sistema:

$$R_s = e^{-\lambda \cdot n \cdot t}. \quad (1.13)$$

Efektivnost redne veze

U rednoj konfiguraciji elemenata, nivo pouzdanosti elemenata i njihov broj imaju odlučujući uticaj na pouzdanost sistema. Veza između ovih faktora prikazana je na Slici 1.2, gde su krive pouzdanosti sistema za različite vrednosti pouzdanosti elemenata dobijene korišćenjem jednačine (1.3).

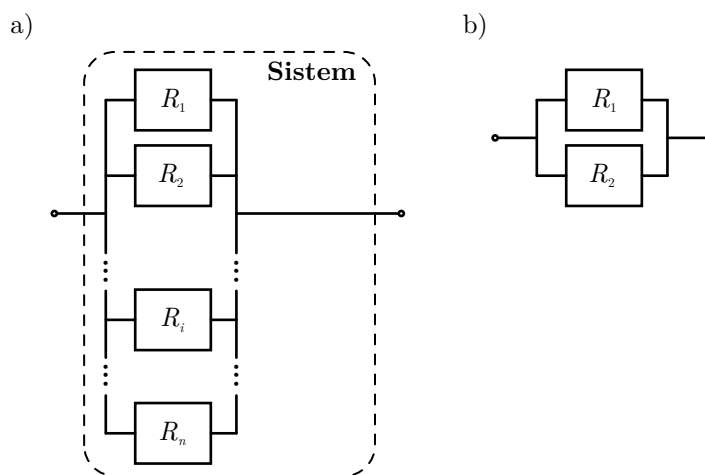


Slika 1.2: Uticaj broja elemenata n i pouzdanosti elemenata R na pouzdanost redno konfigurisanog sistema R_s

Pouzdanost sistema sa rednom vezom elemenata može se povećati smanjenjem broja elemenata i povećanjem nivoa pouzdanosti svakog elementa. Kod malog nivoa pouzdanosti elemenata ($R < 0,6$) pouzdanost sistema se značajno povećava sa smanjenjem broja elemenata. Ovo povećanje pouzdanosti nije izraženo kada je pouzdanost elemenata sistema velika ($R > 0,9$).

1.2 Paralelna veza elemenata sistema

Paralelna konfiguracija susreće se u dva slučaja: 1) kao rezultat strukture samog sistema, 2) kao posledica konstrukcionog rešenja, kada se radi povećanja pouzdanosti ugrađuju rezervni elementi koji ili rade u toku rada sistema, ili se uključuju kada neki element otkáže. Blok dijagram pouzdanosti prikazan je na Slici 1.3a.



Slika 1.3: Šematski prikaz sistema sa paralelnom vezom elemenata

S obzirom na poznatu relaciju:

$$R + F = 1, \quad (1.14)$$

za sistem sa dva paralelno vezana elementa (Slika 1.3b) važe sledeće jednakosti:

$$\begin{aligned} R_1 + F_1 &= 1, \\ R_2 + F_2 &= 1. \end{aligned} \quad (1.15)$$

Iz gornjeg izraza sledi:

$$(R_1 + F_1) \cdot (R_2 + F_2) = 1, \quad (1.16)$$

odnosno u razvijenom obliku:

$$R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot F_2 + F_1 \cdot R_2 + F_1 \cdot F_2 = 1. \quad (1.17)$$

Deo izraza (1.17) koji se odnosi na nepouzdanost sistema sa dva paralelno vezana elementa je:

$$F_s = F_1 \cdot F_2. \quad (1.18)$$

Ostatak izraza (1.17) odnosi se na pouzdanost sistema:

$$R_s = R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot F_2 + F_1 \cdot R_2. \quad (1.19)$$

Za sistem sa dva paralelno vezana elementa takođe važi:

$$R_s + F_s = 1, \quad (1.20)$$

gde su:

R_s - pouzdanost sistema,

F_s - nepouzdanost sistema.

Iz jednačine (1.20) sledi opšti izraz za pouzdanost sistema sa paralelnom vezom elemenata:

$$R_s = 1 - F_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i), \quad (1.21)$$

gde je n broj elemenata sistema.

U slučaju da su svi elementi identični:

$$R_1 = R_2 = \dots = R_i = \dots = R_n = R, \quad (1.22)$$

nepouzdanost svakog od njih će biti $1 - R$, a izraz (1.21) dobija oblik:

$$R_s = 1 - (1 - R)^n. \quad (1.23)$$

Ako svi elementi nemaju istu pouzdanost:

$$R_1 \neq R_2 \neq \dots \neq R_i \neq \dots \neq R_n, \quad (1.24)$$

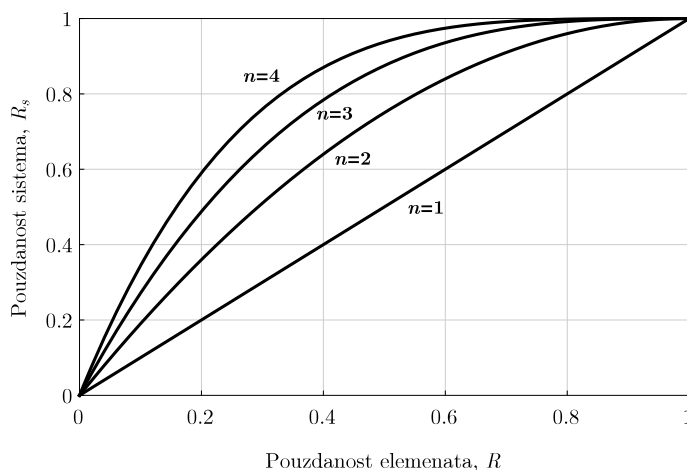
to znači da u konfiguraciji sistema postoje elementi sa najvećom (R_{\max}) i najmanjom pouzdanošću (R_{\min}). U ovom slučaju, pouzdanost sistema sa paralelnom vezom elemenata veća je od pouzdanosti najjače komponente sistema čija je pouzdanost maksimalna, tj:

$$R_s > R_{\max}. \quad (1.25)$$

U ovom razmatranju paralelne konfiguracije polazi se od pretpostavke da svi elementi počinju sa radom u momentu početka rada sistema. Isto tako, pretpostavka je da je za uspešno funkcionisanje sistema dovoljno da je ispravan samo jedan element. Kod mehaničkih sistema, češće su u upotrebi drugačiji oblici paralelne konfiguracije: 1) kada je za upešno funkcionisanje sistema potrebno da bude ispravno više od jednog elementa (sistemi n od m), 2) kada postoji element koji je u pripravnosti, odnosno ne počinje sa radom u momentu početka rada sistema, već kada dođe do otkaza nekog elementa.

Efektivnost paralelne veze

Paralelna konfiguracija elemenata obično se koristi kao jedan od načina za povećanje pouzdanosti sistema. Treba napomenuti da je ova konfiguracija najčešća kod elektronskih uređaja, a da je retka kod mehaničkih sistema. Za predstavljanje uticaja ove konfiguracije na pouzdanost sistema, iskoristiće se izraz (1.23). Zavisnost pouzdanosti sistema za različite vrednosti pouzdanosti elemenata R i različit broj elemenata n prikazana je na Slici 1.4.



Slika 1.4: Uticaj broja elemenata n i pouzdanosti elemenata R na pouzdanost paralelno konfigurisanog sistema R_s

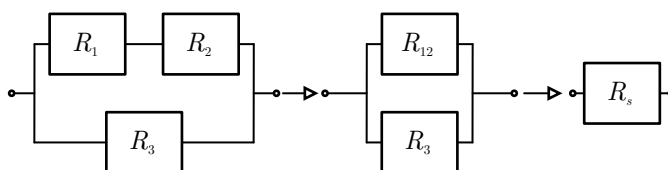
U oblasti velike pouzdanosti elemenata $R > 0,8$, formiranje paralelne veze sa više od 2 elementa nema velikog efekta na pouzdanost sistema. Veći broj elemenata je opravdan kada je pouzdanost elemenata mala $R < 0,8$. Prema tome, pouzdanost sistema sa paralelnom vezom može se povećati povećanjem broja elemenata i/ili povećanjem njihove pouzdanosti. Povećanje pouzdanosti elemenata ograničeno je raspoloživom zapreminom, zahtevanom masom, ekonomskim i ekološkim efektima. Boljom tehnologijom izrade, tačnijim postupcima proračuna, izborom optimalnog konstrukcionog rešenja ili rekonstrukcijom postojećih rešenja može se povećati pouzdanost elemenata sistema. Generalno, povećanje pouzdanosti elemenata povlači povećanje stepena sigurnosti, što se reflektuje na povećanje mase.

Primeri paralelne veze kod mehaničkih sistema:

Rezervni točkovi kod transportnih vozila, sijalice i osigurači kod automobila, rezervni motori kod aviona i ski liftova, rezervni sistemi za spuštanje stajnog trapa kod aviona, pomoćne grane kod višegranskih reduktora, paralelni sistemi dopremanje vode i rashlađivanje kod termoenergetskih postrojenja (naročito kod nuklearnih elektrana), itd.

1.3 Kombinovana veza elemenata sistema

Na osnovu rednih i paralelnih veza, složene veze se redukuju na jednostavnije oblike, Sl. 1.5 i Sl. 1.6.



Slika 1.5: Primer sistema sa kombinovanom vezom elemenata

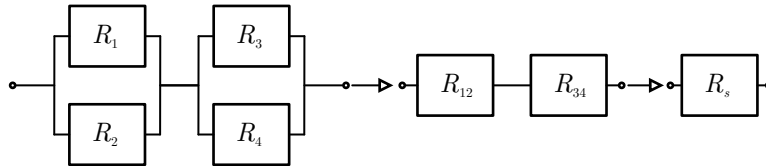
Redukciji složenog sistema sa Slici 1.5 na jednostavniji oblik odgovaraju sledeće jednačine:

$$R_{12} = R_1 \cdot R_2,$$

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - R_i) = 1 - (1 - R_3) \cdot (1 - R_{12}). \quad (1.26)$$

Redukciji složenog sistema sa Sl. 1.6 na jednostavniji oblik odgovaraju sledeće jednačine:

$$\begin{aligned} R_{12} &= 1 - (1 - R_1) \cdot (1 - R_2), \\ R_{34} &= 1 - (1 - R_3) \cdot (1 - R_4), \\ R_s &= R_{12} \cdot R_{34} = [1 - (1 - R_1) \cdot (1 - R_2)] \cdot [1 - (1 - R_3) \cdot (1 - R_4)]. \end{aligned} \quad (1.27)$$



Slika 1.6: Primer sistema sa kombinovanom vezom elemenata

Korišćena literatura

1. Vujanović N. (1990) **Teorija pouzdanosti tehničkih sistema**, Vojnoizdavački i novinski centar;
2. Ristivojević M. (2022) **Pouzdanost konstrukcija**, izvodi sa predavanja;
3. Ognjanović M. (2007) **Razvoj i dizajn mašina**, Mašinski fakultet Beograd;
4. Ivanović G. (1987) **Pouzdanost tehničkih sistema – zbirka rešenih zadataka**, Mašinski fakultet Beograd;
5. Ramović R. (2005) **Pouzdanost sistema – elektronskih, telekomunikacionih i informacionih**, Elektrotehnički fakultet Beograd;
6. Milčić D. (2005) **Pouzdanost mašinskih sistema**, Mašinski fakultet Niš;
7. Bertsche B. (2008) **Reliability in Automotive and Mechanical Engineering**, Inst. Maschinenelemente Universität Stuttgart;
8. Kecigöglü D. (2003) **Robust Engineering: Design-By-Reliability**, Department of Aerospace and Mechanical Engineering The University of Arizona;