

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Милош Ж. Милетић

**Утицај редне, комбиноване и пасивно
паралелне везе на поузданост машинских
система**

завршни рад

Крагујевац, 2014.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Поузданост машинских система

Број индекса: 35/2011

Милош Ж. Милетић

**Утицај редне, комбиноване и пасивно паралелне
везе на поузданост машинских система
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Добривоје Ћатић - ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да опише и анализира системе са редно везаним елементима, комбинованим везама и системе са пасивно паралелним везама елемената, као и утицај тих веза на поузданост машинских система. У раду су такође, дати примери одређивања показатеља исправног рада за наведене начине повезивања елемената у систему.

Препоручена литература:

[1] Вујановић Н.: Теорија поузданости техничких система, Војноиздавачки новински центар, Београд, 1990.

[2] Бекер И., Ивановић Г., Станивуковић Д.: Поузданост техничких система, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2010.

[3] Зеленовић Д., Тодоровић Ј.: Ефективност система у машинству, Научна књига, Београд, 1990.

Крагујевац, 15. 9. 2014.

ментор:

Др Добривоје Ћатић, ред. проф.

Резиме

Циљ овог завршног рада је анализа утицаја редне, комбиноване и пасивно паралелне везе елемената машинских система на поузданост система. Најпре су описани појмови везани за саму поузданост, а затим се говори о поменутих начинима повезивања елемената. Такође, за ове начине повезивања дати су примери практичне примене одређивања показатеља исправног рада.

Кључне речи: поузданост, редна веза, комбинована веза, пасивна паралелна веза.

Abstract

The aim of this final paper is to analyze the impact of terminal, combined and the passive parallel connections of elements of mechanical systems on the reliability of the systems themselves. First there were described concepts that are related to reliability itself and then talked about these ways of connecting elements. Also, there are examples given for these ways of connecting with practical application of the figures uptime.

Key words: reliability, terminal connection, combined connection, passive parallel connections.

САДРЖАЈ

1. Увод.....	5
2. Поузданост у случају редне везе елемената у систему.....	7
3. Поузданост у случају комбиноване везе елемената у систему.....	17
4. Поузданост у случају пасивне паралелне везе елемената у систему.....	28
4.1 Поузданост у случају приправности.....	29
4.1.1 Случај када је прекидач идеалан.....	30
4.1.2 Случај када прекидач није идеалан.....	33
5. Закључак.....	42
6. Литература.....	44

1. УВОД

Технички системи представљају скупове елемената и релацију између њих и њихових карактеристика, повезаних међусобно у целину, на начин погодан за вршење функције. То значи да је за функционисање система, поред квалитета елемената у целини, неопходно одређеност везе између њих.

Нека разматрања у пуној мери односе се, не само на елементе, него и на системе. Ако се ради о системима, то захтева посебно третирање. Основни разлог за ово лежи у чињеници да сваки сложени систем обједињује већи или мањи број саставних елемената (подсистема, склопова, подсклопова, делова), те се о његовој поузданости може судити само ако се анализирају и аналитички обухвате поузданости сваког елемента понаособ [1].

Термин систем односиће се на било коју функционалну целину чија се поузданост жели да утврди. Термин елемент означаваће било који саставни део система, тј. може се одређеним случајевима односити на подсклоп склоп, итд. Сваки део система може имати два стања: у стању рада и у стању отказа. Растављањем система на саставне делове добијају се одређене целине, тј. блокови који описују рад система. То су тзв. блок-дијаграми поузданости које треба разликовати од механичке или електричне конфигурације система. На пример, ако имамо систем који се састоји од три прекидача у редној вези чији је задатак да укључе алармно звоно, онда ће блок-дијаграм поузданости и електрична конфигурација бити исти, тј. могу се представити у виду редне конфигурације. Међутим, ако имамо систем од три термичка осигурача у редној вези, чији је задатак да упозоре на прегревање неког електромотора, онда ће блок-дијаграм поузданости бити представљен у виду паралелне конфигурације, јер је довољно да било који од три термичка осигурача буде исправан за успешно обављање функције [2].

У циљу омогућавања анализа ове врсте у Теорији поузданости се посебно анализирају начини повезивања елемената система са становишта обликовања структуре блок-дијаграма поузданости, на основу које треба одредити аналитичке изразе за израчунавање функције поузданости система. После одређивања функције поузданости, могуће је одредити и друге карактеристике система, о којима је било речи у анализи поузданости елемената [1].

Везе повезивања елемената у систем могу бити:

- редне,
- паралелне,
- пасивно паралелне,
- делимично паралелне,
- специфичне (квази-редне и квази-паралелне) и
- комплексне (комбинација наведених веза елемената).

При обликовању блок-дијаграма поузданости, посебно треба водити рачуна о технолошком начину међусобног повезивања елемената система ради вршења одређене функције и везе ових елемената у блок-дијаграму поузданости, зато што технолошка веза елемената не одговара увек и вези ових елемената у блок-дијаграму поузданости.

За квантитативно процењивање блок-дијаграма поузданости постоје разне методе. Зависно од структуре могу се применити једноставни Булови (Bool) поступци или анализе скупа путања и прекида [3].

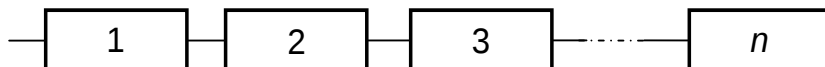
При одређивању функције поузданости система некада је неопходно, а можда и једино могуће, проблем решити са становишта „догађаја“ исправног рада система. Ово се посебно односи на комплексне везе (комбинације редне и паралелне везе) елемената у систему.

У том смислу за формирану блок дијаграм поузданости:

- прво се дефинише „догађај“ исправног рада (или отказа) система и његових елемената, примењујући правила алгебре догађаја, односно Булове алгебре, ради одређивања једначине „догађаја“ исправног рада система,
- а затим правила – „вероватноћа реализације овог догађаја“.

2. ПОУЗДАНОСТ У СЛУЧАЈУ РЕДНЕ ВЕЗЕ ЕЛЕМЕНАТА У СИСТЕМУ

Структура система са редном везом елемената представља најпростији модел система, који се најчешће користи у машинству. Редна веза има веома неповољне особине са становишта утицаја поузданости саставних елемената на поузданост система. Овакав систем се зове и прост систем. Отказ једног елемента изазива отказ система, односно исправност система је условљена исправношћу свих саставних елемената. Блок-дијаграм поузданости таквог система дат је на слици 2.1 [3].



Слика 2.1 Блок-дијаграм поузданости система са редном везом елемената

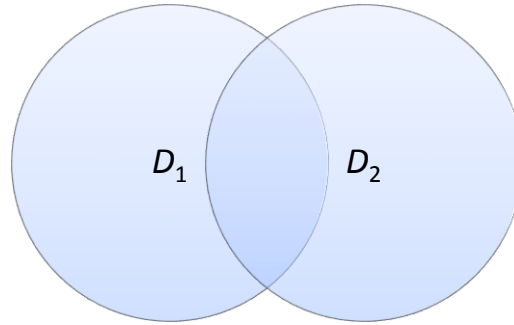
Сваки елемент приказан на слици 2.1 мора успешно да функционише, да би систем који се састоји од n елемената успешно функционисао. Овај систем може да представља неки електронски појачавач који се састоји од n елемената, уређај за управљање ватром који има n подсистема, процедуру лансирања сателита у орбиту која се састоји од n операција и слично [2].

Да би се поступак одређивања поузданости ових структура боље објаснио, претпоставиће се најједноставнији случај, са само два редно везана елемента, чије су поузданости R_1 и R_2 . Поузданости R_1 и R_2 представљају вероватноће да до посматраног тренутка времена неће доћи до појаве отказа на посматраним елементима $R_i(t_i) = P(D_i)$. Ово шематски може да се прикаже као две површи D_1 и D_2 , које свака понаособ представљају вероватноће ових догађаја, тј. вероватноће реализације стања У РАДУ оба елемента. Догађај који репрезентује стање У РАДУ система са ова два редно везана елемента, одређен је преклопном шрафираном површином (слика 2.2).

На основу поставки Булове алгебре, која се користи за анализу логичних односа могућих догађаја, односи дати на слици 2.2 могу се изразити у облику такозваног пресека догађаја D_1 и D_2 :

$$D_s = D_1 \cap D_2. \quad (2.1)$$

Пресек догађаја исказан на дати начин показује да је догађај D_s односно поузданост система, обезбеђен само када је реализован и догађај D_1 и догађај D_2 . У том смислу симбол пресека може да се чита као „и“, односно вероватноће реализације повољних догађаја у том случају представљају њихов производ.



Слика 2.2 Примена Булове алгебре код система са редно везаним елементима

У подручју теорије вероватноће разматрани случај делова система независних у погледу отказа и неопходних за вршење функције критеријума непосредно одговара теорему о сложеној вероватноћи и може се изразити (на основу закона производа) производом вероватноћа саставних догађаја, односно:

$$P(D_S) = P(D_1) \cdot P(D_2), \quad (2.2)$$

односно:

$$P(D_S) = R_S(t) = R_1(t) \cdot R_2(t). \quad (2.3)$$

Овај израз је прикладан за уопштавање, тако за систем од n редно везаних елемената, поузданост се рачуна према изразу:

$$R_S(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t). \quad (2.4)$$

Поузданост система са редном везом елемената је мања од поузданости најнепоузданијег елемента и са повећањем броја елемената у систему укупна поузданост се смањује.

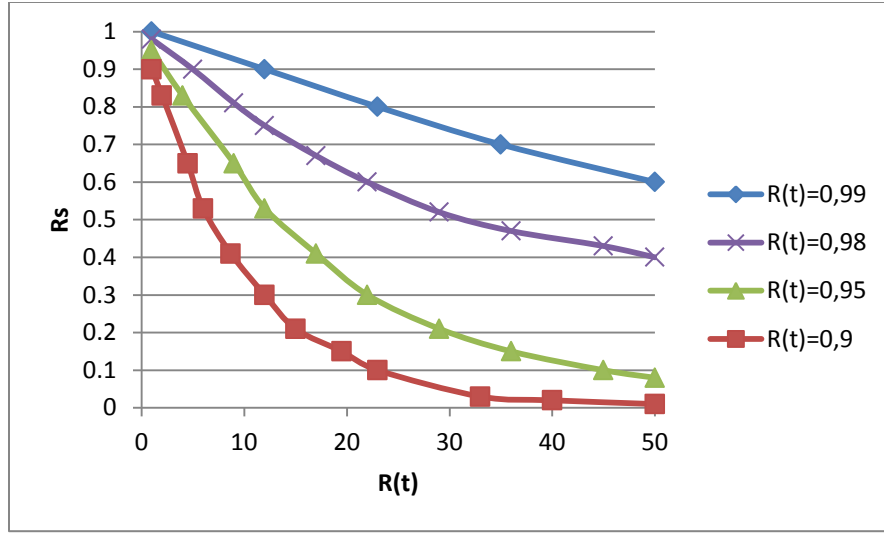
Ако се узме да су поузданости свих елемената редно везаних у систему међусобно једнаке, тј. да је:

$$R_1(t) = R_2(t) = \dots = R_n(t) = R(t), \quad (2.5)$$

онда је вероватноћа исправног рада тог система, односно поузданост система:

$$R_S(t) = R(t)^n. \quad (2.6)$$

Ова зависност поузданости система у функцији броја елемената у редној вези дата је дијаграмски на слици 2.3. Са дијаграма се види да поузданост система редно везаних елемената може да се повећа на рачун смањења броја редно везаних елемената или на рачун повећања поузданости сваког од њих. Ради поређења приказане су три криве за вероватноћу исправног рада елемената за $R(t) = 0,99$; $R(t) = 0,98$ и $R(t) = 0,95$. Види се да вероватноћа исправног рада система зависи како од броја елемената у систему, тако и од нивоа њихове вероватноће исправног рада. Очигледно је да се с повећањем броја елемената вероватноћа исправног рада система смањује. То смањење је израженије када су у систему елементи с мањом вероватноћом исправног рада.



Слика 2.3 Зависност поузданости система од броја елемената у редној вези

Ако су узроци отказа елемената неког машинског система изненадни, онда се као модел за описивање отказа може усвојити експоненцијални закон расподеле.

Под условом да је $t = t_s = t_1 = t_2 = t_n$, поузданост система за редно везане елементе може се написати у облику:

$$R_s(t) = e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot \dots \cdot e^{-\lambda_n t} = e^{-t \sum_{i=1}^n \lambda_i}. \quad (2.7)$$

Интензитет отказа система је:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (2.8)$$

Средње време исправног рада оваког система је:

$$t_{sr} = \int_0^{\infty} R_s(t) dt = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}, \quad (2.9)$$

из чега се види да се средње време исправног рада до отказа смањује са повећањем броја елемената.

Ако се као модел за настајање отказа елемената може усвојити тропараметарска Вејбулова расподела:

$$R_i(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma_i}{\eta_i-\gamma_i}\right)^{\beta_i}}, \quad (2.10)$$

онда се поузданост система за редно везане елементе може написати у облику:

$$R_s(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma_1}{\eta_1-\gamma_1}\right)^{\beta_{1i}}} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma_i}{\eta_2-\gamma_2}\right)^{\beta_2}} \cdot \dots \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma_n}{\eta_n-\gamma_n}\right)^{\beta_n}}, \quad (2.11)$$

односно:

$$-\ln R_s(t) = \left(\frac{t-\gamma_1}{\eta_1-\gamma_1}\right)^{\beta_{1i}} + \left(\frac{t-\gamma_i}{\eta_2-\gamma_2}\right)^{\beta_2} + \dots + \left(\frac{t-\gamma_n}{\eta_n-\gamma_n}\right)^{\beta_n}. \quad (2.12)$$

Неповољни утицаји редног везивања елемената система на његову поузданост најбоље се могу видети из неких бројних примера. У том циљу је у табели 2.1 дат шири приказ система са редном структуром, и то за већи број саставних елемената и за три претпостављене вредности поузданости елемената. Види се да, чак и ако се ради о елементима релативно високе поузданости, код њих је $R_i = 0,99$ (у датом тренутку посматрања), систем са 1000 оваквих редно везаних елемената има занемарљиво ниску поузданост, тј. $R_s = 0,00004$ [4].

Табела 2.1

Укупан број елемената у систему	Поузданост саставног елемента		
	0,99999	0,9999	0,99
1	0,99999	0,9999	0,99
2	0,99998	0,9998	0,9801
10	0,99990	0,9990	0,90438
100	0,99900	0,9900	0,36603
1000	0,99005	0,9048	0,00004
10000	0,36788	0,00005	0,00000

Пример 2.1 Ако се један систем састоји од 10 идентичних елемената у редној конфигурацији са поузданошћу 0,99, при чему су откази елемената независни, колика је поузданост тог система? Колико би била поузданост система ако би уместо 10 било 50, а колика ако би било 70 таквих елемената?

Решење:

Применом једначине 2.6 добија се, за случај 10 елемената:

$$R_s = 0,99^{10} = 0,9044,$$

за случај 50 елемената:

$$R_s = 0,99^{50} = 0,6050,$$

а за случај 70 елемената:

$$R_s = 0,99^{70} = 0,4948.$$

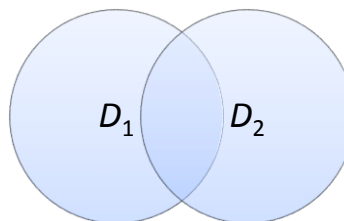
Пример 2.2 Одредити поузданост и нацртати блок шему за два редно везана елемента, ако је поузданост сваког елемента за одређено време рада $R_i(t) = 0,8$.

Решење:

Према претходном, поузданост за два редно везана елемента према слици 2.4 и реализацији повољних догађаја D_1 и D_2 , што је представљено шрафираном површином на слици 2.5 је:



Слика 2.4



Слика 2.5

$$D_S = D_1 \cap D_2$$

$$P(D_S) = P(D_1) \cdot P(D_2) = P_1 \cdot P_2$$

$$P(D_S) = R_S(t_S) = R_1(t_1) \cdot R_2(t_2)$$

односно за:

$$t = t_S = t_1 = t_2$$

и за:

$$R_1(t_1) = R_2(t_2)$$

добива се:

$$R_S(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) = 0,8 \cdot 0,8 = 0,64.$$

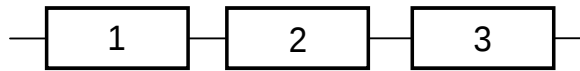
Пример 2.3 Одредити поузданост у тренутку $t = 1000$ h и средње време у раду система који чине три елемента за случај редне конфигурације елемената. Елементе карактерише експоненцијални закон расподеле, интензитет отказа елемената је $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0,9 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$.

Решење:

Поузданост елемената за $t = 1000$ h износи:

$$R_1(t) = R_2(t) = R_3(t) = R(t) = e^{-\lambda \cdot t},$$

$$R(1000) = R_1(1000) = R_2(1000) = R_3(1000) = e^{-\lambda \cdot t} = e^{-0,9 \cdot 10^{-4} \cdot 1000} = 0,91393.$$



Слика 2.6 редна веза елемената

Поузданост система са редном везом елемената:

$$R_S(t) = \prod_{i=1}^{n=3} R_i(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot R_3(t) = R(t)^3 = e^{-3 \cdot \lambda \cdot t},$$

$$R_S(1000) = R(1000)^3 = 0,91393^3 = 0,76338.$$

Средње време у раду за три редно везана елемента:

$$t_{sr} = \int_0^{\infty} R_S(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-3 \cdot \lambda \cdot t} dt = \frac{1}{3 \cdot \lambda} = \frac{1}{3 \cdot 0,9 \cdot 10^{-4}},$$

$$t_{sr} = 3703,704 \text{ h}.$$

Пример 2.4 За систем приказан на слици 2.7 одредити поузданост ако су поузданости елемената система: $R_A=0,9$; $R_B=0,8$; $R_C=0,7$ и $R_D=0,6$.



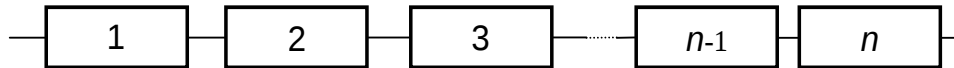
Слика 2.7

$$R_S(t) = R_A(t) \cdot R_B(t) \cdot R_C(t) \cdot R_D(t) = 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,6 = 0,3024.$$

Пример 2.5 Одредити и нацртати дијаграм поузданости система од 1, 2, 5, 10, 20, 100, 500, 1000 и 3450 редно везаних елемената за $t = 0, 500, 1000, 1500, 2000, 10\ 000, 20\ 000, 100\ 000$ и $1\ 000\ 000$ часова, ако закон поузданости експоненцијални са интензитетом отказа сваког елемента од $\lambda = 4 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$.

Решење:

За n редно везаних елемената, који чине систем, шема поузданости је приказана на слици 2.8



Слика 2.8

Поузданост система за редно везане елементе гласи:

$$R_S(t_S) = R_1(t_1) \cdot R_2(t_2) \cdot \dots \cdot R_n(t_n).$$

У случају експоненцијалног закона расподеле поузданост (под условом да је $t = t_s = t_1 = t_2 = \dots = t_n$) може се написати у облику:

$$R_S(t) = e^{-\lambda_s \cdot t} = e^{-\lambda_1 \cdot t} \cdot e^{-\lambda_2 \cdot t} \dots e^{-\lambda_n \cdot t},$$

где је:

λ_s - интензитет отказа система,

λ_i - интензитет отказа елемената система.

С обзиром да је у овом систему $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n$, поузданост система гласи:

$$R_S(t) = R_i(t)^n = e^{-t \sum_{i=1}^n \lambda_i}.$$

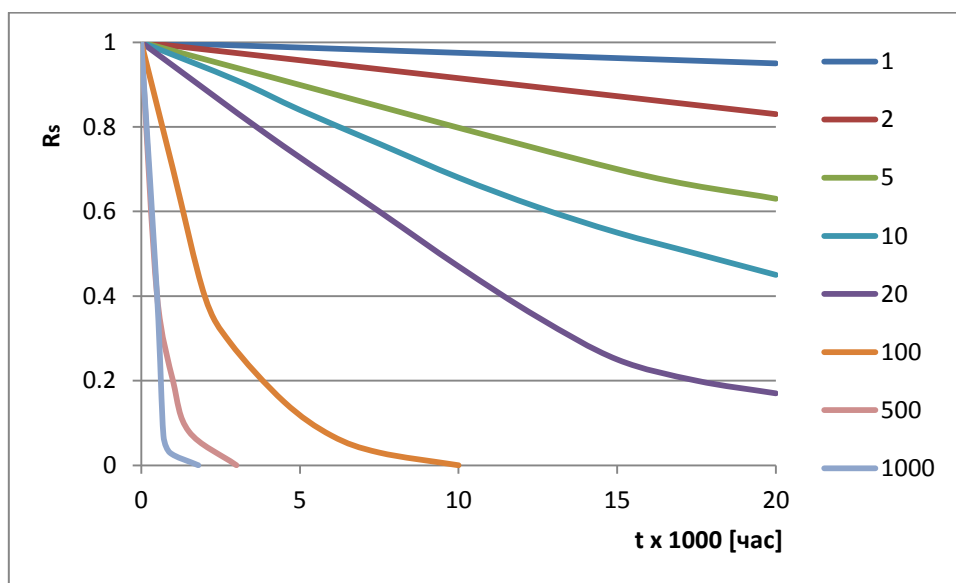
На пример, за 2 елемента и за $t = 10000$ часова, поузданост система је:

$$R_S(10000) = e^{-10000(4+4)10^{-6}} = 0,924.$$

Према услови задатка у табели 2.2 су за одређени број елемената у систему n и времену рада t дате вредности поузданости система. Очигледно је да се са повећањем броја елемената у систему, поузданост система знатно смањује, што је такође приказано и на слици 2.9. На слици 2.9 и у табели 2.2 је такође приказана и промена поузданости током времена t .

Табела 2.2

$R_s(t) = e^{-t \sum_{i=1}^n \lambda_i}$									
$t \backslash n$	1	2	5	10	20	100	500	1000	3450
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
500	0,998	0,996	0,990	0,980	0,960	0,819	0,368	0,135	0,001
1000	0,996	0,992	0,980	0,961	0,923	0,670	0,135	0,018	0,000
1500	0,994	0,988	0,970	0,942	0,887	0,548	0,049	0,002	-
2000	0,992	0,984	0,961	0,923	0,852	0,448	0,018	0,000	-
10000	0,961	0,924	0,820	0,672	0,451	0,019	0,000	-	-
20000	0,923	0,852	0,670	0,449	0,201	0,003	-	-	-
60000	0,787	0,619	0,301	0,091	0,008	0,000	-	-	-
100000	0,670	0,445	0,135	0,018	0,000	-	-	-	-
1000000	0,018	0,000	0,000	0,000	-	-	-	-	-



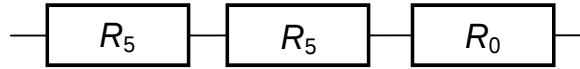
Слика 2.9

Пример 2.6 За напајање система за хлађење мотора потребног протока $Q=10$ l/s конструктору стоје на располагању пумпе капацитета $Q_5 = 5$ l/s, поузданости $R_5 = 0,85$ и пумпе капацитета $Q_{10} = 10$ l/s, поузданости $R_{10} = 0,80$. Поузданост хладњака и осталих елемената је $R_0 = 0,90$. Одредити поузданост и нацртати блок шему система, ако се систем реши са:

- две пумпе капацитета $Q_5 = 5$ l/s,
- једном пумпом капацитета $Q_{10} = 0,80$ l/s,
- паралелном везом варијанте а) и б),
- која је варијанта најпоузданија, доказати.

Решење:

а) Да би се обезбедио проток флуида од 10 l/s морају да раде обе пумпе од $Q_5 = 5$ l/s, које су технолошки паралелно везане. Међутим, код одређивања поузданости ове две пумпе ће бити редно везане, јер отказом једне пумпе не испуњава се задати критеријум од $Q = 10$ l/s. Према претходном блок-дијаграм за одређивање поузданости приказан је на слици 2.10.



Слика 2.10

А поузданост:

$$R_S = R_5 \cdot R_5 \cdot R_0 = 0,85 \cdot 0,85 \cdot 0,9 = 0,650.$$

б) Према услови, овде технолошка веза одговара редној вези поузданости, слика 2.11.

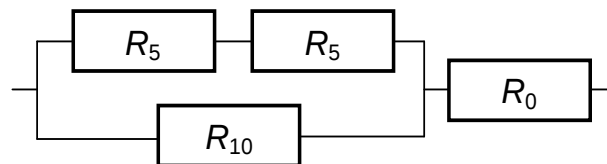


Слика 2.11

А поузданост система:

$$R_S = R_{10} \cdot R_0 = 0,85 \cdot 0,9 = 0,765.$$

ц) Паралном везом варијанте а) и б) добија се шема приказана на слици 2.12



Слика 2.12

Поузданост система је:

$$R_S = [1 - (1 - R_5 \cdot R_5)(1 - R_{10})] R_0 = [1 - (1 - 0,85 \cdot 0,85)(1 - 0,85)] \cdot 0,9 = 0,862.$$

д) Најпоузданија варијанта је са слике 2.12 јер је:

$$R_c > R_b > R_a, \text{ односно, } 0,862 > 0,765 > 0,650.$$

Пример 2.7 Два елемента техничког система везана су редно и имају густине времена исправног рада: $f_1(t) = \frac{t}{\theta_1} \cdot e^{-t^2/2\theta_1}$ и $f_2(t) = \frac{t}{\theta_2} \cdot e^{-t^2/2\theta_2}$ где су $\theta_1 = \text{const}$ и

$\theta_2 = \text{const}$ - параметри за одговарајуће елементе. Одредити изразе за:

а) интензитет отказа система $h_s(t)$;

б) вероватноћу исправног рада система $R_s(t)$;

в) густину расподеле времена исправног рада система $f_s(t)$.

Ако су параметри $\theta_1 = 300$ h и $\theta_2 = 400$ h одредити:

г) вероватноћу исправног рада система $R_s(t)$ за време од 200 h;

д) вредност времена t при којој је вероватноћа исправног рада система једнака 0,9.

Решење:

$$\text{а) } h_s(t) = \sum_{i=1}^n h_i(t) = \sum_{i=1}^2 h_i(t) = \frac{t}{\theta_1} + \frac{t}{\theta_2} = t \left(\frac{1}{\theta_1} + \frac{1}{\theta_2} \right) = t \cdot \lambda \quad \text{за} \quad \lambda = \frac{1}{\theta_1} + \frac{1}{\theta_2};$$

$$f_i(t) = \frac{t}{\theta_i} \cdot e^{-t^2/2\theta_i}; \quad R_i(t) = 1 - F_i(t) = e^{-t^2/2\theta_i}; \quad h_i(t) = \frac{f_i(t)}{R_i(t)} = \frac{\frac{t}{\theta_i} e^{-t^2/2\theta_i}}{e^{-t^2/2\theta_i}} = \frac{t}{\theta_i};$$

$$F_i(t) = \int_0^t f_i(t) dt = \int_0^t \frac{t}{\theta_i} \cdot e^{-t^2/2\theta_i} dt = - \int_0^{-t^2/2\theta_i} e^z dz = -e^z \Big|_0^{-t^2/2\theta_i} = 1 - e^{-t^2/2\theta_i}; \quad -t^2/2\theta_i = z$$

$$\text{б) } R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) = e^{-\frac{t^2}{2\theta_1}} \cdot e^{-\frac{t^2}{2\theta_2}} = e^{-\frac{t^2}{2} \left(\frac{1}{\theta_1} + \frac{1}{\theta_2} \right)} = e^{-\frac{t^2}{2} \lambda};$$

$$\text{в) } f_s(t) = h_s(t) \cdot R_s(t) = t \left(\frac{1}{\theta_1} + \frac{1}{\theta_2} \right) \cdot e^{-\frac{t^2}{2} \left(\frac{1}{\theta_1} + \frac{1}{\theta_2} \right)} = t \cdot \lambda \cdot e^{-\frac{t^2}{2} \lambda};$$

$$\text{г) } \lambda = \frac{1}{\theta_1} + \frac{1}{\theta_2} = \frac{1}{300} + \frac{1}{400} = 5,83 \cdot 10^{-3} [\text{otk/h}]; \quad R_s(200) = e^{-\frac{t^2}{2} \lambda} = e^{-\frac{200^2}{2} \cdot 5,83 \cdot 10^{-3}} = e^{-1166} \approx 0;$$

$$\text{д) } R_s(t) = e^{-\frac{t^2}{2} \lambda} = 0,9 \Rightarrow -\frac{t^2}{2} \lambda = \ln 0,9 \Rightarrow t = \sqrt{-\frac{2 \cdot \ln 0,9}{\lambda}} = \sqrt{-\frac{2 \cdot \ln 0,9}{5,83 \cdot 10^{-3}}} = \sqrt{36,14} \approx 6 \text{ h.}$$

Пример 2.8 Неки машински систем се састоји од 5 редно повезаних елемената, при чему су вероватноће исправног рада тих елемената у току 100 h рада једнаке $R_1(100)=0,9996$; $R_2(100)=0,998$; $R_3(100)=0,9996$; $R_4(100)=0,999$ и $R_5(100)=0,9998$. Ако су откази елемената система независни и време исправног рада се поковава експоненцијалној расподели, одредити густину расподеле времена исправног рада до отказа система у тренутку $t = 100$ h.

Решење:

$$R_s(100) = \prod_{i=1}^5 R_i(100) = R_1(100) \cdot R_2(100) \cdot R_3(100) \cdot R_4(100) \cdot R_5(100) = 0,996;$$

$$R_s(100) = e^{-t \sum_{i=1}^n \lambda_i} = e^{-100 \sum_{i=1}^5 \lambda_i} \Rightarrow \ln R_s(100) = -100 \cdot \sum_{i=1}^5 \lambda_i \Rightarrow$$

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^5 \lambda_i = \frac{\ln R_s(100)}{-100} = \frac{\ln 0,996}{-100} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ [otk/h]};$$

$$\lambda_s = f_s(t)/R_s(t) \Rightarrow f_s(100) = \lambda_s \cdot R_s(100) = 4 \cdot 10^{-5} \cdot 0,996 = 3,98 \cdot 10^{-5} \text{ [otk/h]}.$$

3. ПОУЗДАНОСТ У СЛУЧАЈУ КОМБИНОВАНЕ КОНФИГУРАЦИЈЕ ЕЛЕМЕНАТА

Ако имамо комбинацију редне и паралелне везе, поузданост таквог система добија се разлагањем на простије целине које имају или само редну или само паралелну конфигурацију. На слици (3.1) дат је блок дијаграм поузданости за *редно-паралелну* конфигурацију [2].

На слици је приказан случај када је редно везано n група које се састоје од једнаког броја m паралелно везаних елемената. Ако се претпостави да су сви откази независни један у односу на други, тада ће поузданост j -те групе бити:

$$R_j = 1 - P(\bar{x}_{1j}) P(\bar{x}_{2j}) \cdots P(\bar{x}_{mj}) = 1 - \prod_{i=1}^{i=m} P(\bar{x}_{ij}), \quad (3.1)$$

где је R_j поузданост j -те групе, $i = 1, 2, \dots, m$ број елемената у групи, $j = 1, 2, \dots, n$ број група x_{ij} догађај да је i -ти елемент у j -ој групи неисправан. Сада се поузданост система приказаног на слици 3.1 добија применом једначине:

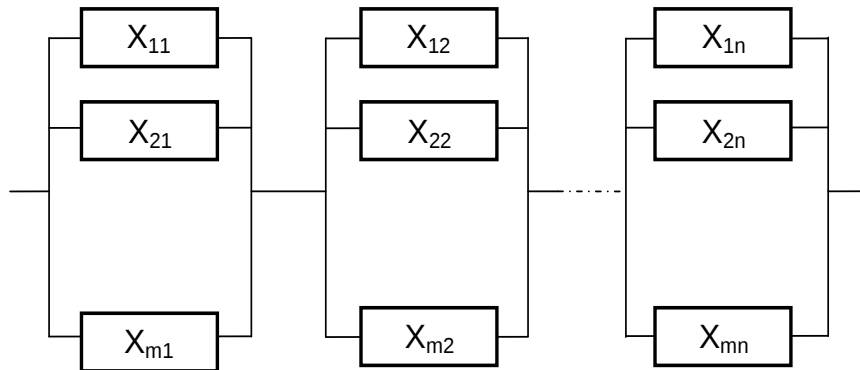
$$R = P(x_1) \cdot P(x_2) \cdot P(x_3) \cdots P(x_n) = \prod_{i=1}^{i=n} P(x_i), \quad (3.2)$$

израз за поузданост j -те групе дат је једначином:

$$R = R_1 \cdot R_2 \cdots R_n = \prod_{j=1}^{j=n} R_j = \prod_{j=1}^{j=n} \left[1 - \prod_{i=1}^{i=m} P(\bar{x}_{ij}) \right]. \quad (3.3)$$

Ако су сви елементи идентични, вероватноћа успешног функционисања сваког од њих биће p , па се једначина (3.3) добија облик:

$$R = \prod_{j=1}^n [1 - (1 - p)^m] = [1 - (1 - p)^m]^n. \quad (3.4)$$



Слика 3.1 Блок-дијаграм поузданости за редно-паралелну конфигурацију

Наведени обрасци важе када је симетрична конфигурација, тј. када свака група има једнак број елемената. Процедура одређивања поузданости када се број елемената у групама разликује иста је као и када је број елемената у групама једнак. Према томе, за редно-паралелну конфигурацију, где су елементи везани паралелно а групе елемената редно, најпре се израчуна поузданост сваке групе, па се онда множењем тих вредности добија поузданост система [5].

На слици 3.2 дат је облик *паралелно-редне конфигурације*.

У овом случају је m праваца са по n елемената на сваком правцу. Ако се претпостави да су сви откази међусобно независни, на одређивање поузданости оваквог система најпре треба одредити поузданост i -те гране. Директном аналогијом са једначином (3.2) добија се:

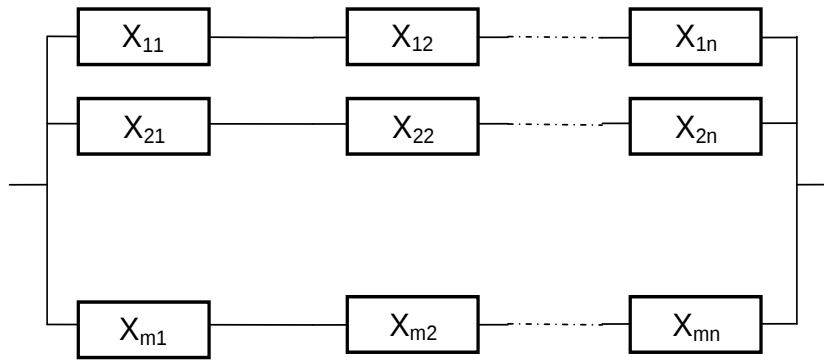
$$R_i = P(x_{i1}) \cdot P(x_{i2}) \cdot \dots \cdot P(x_{in}) = \prod_{j=1}^{j=n} P(x_{ij}), \quad (3.5)$$

где је R_i поузданост i -те гране, $i = 1, 2, \dots, m$ број грана, $j = 1, 2, \dots, n$ број елемената у свакој грани, x_{ij} догађај да j -ти елемент на i -том правцу функционише исправно. Применом једначине (3.6):

$$R_j = 1 - P(\bar{x}_1) \cdot P(\bar{x}_2) \cdot \dots \cdot P(\bar{x}_n) = 1 - \prod_{i=1}^{i=m} P(\bar{x}_i), \quad (3.6)$$

на израз за поузданост дат је једначином (3.5), добија је поузданост система:

$$R = 1 - (1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdot \dots \cdot (1 - R_m) = 1 - \prod_{i=1}^{i=m} (1 - R_i) = 1 - \prod_{i=1}^{i=m} \left[1 - \prod_{j=1}^{j=n} P(x_{ij}) \right]. \quad (3.7)$$



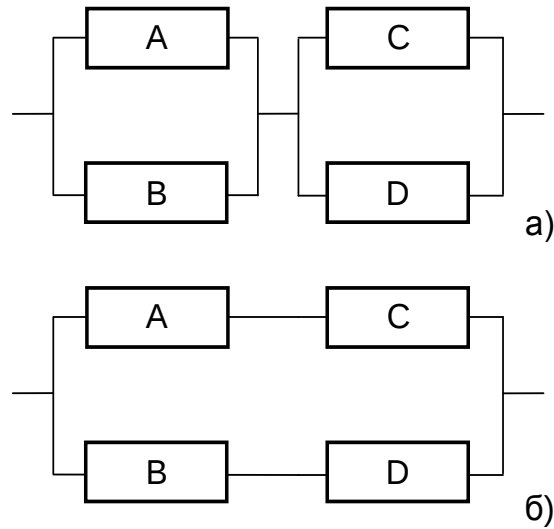
Слика 3.2 Блок-дијаграм поузданости за паралелно-редну конфигурацију

Када су сви елементи идентични, поузданост тј. вероватноћа успешног функционисања сваког од њих је p , па је поузданост система:

$$R = 1 - \prod_{i=1}^{i=m} (1 - p^n) = 1 - (1 - p^n)^m. \quad (3.8)$$

Процедура за израчунавање поузданости за несиметричну конфигурацију, тј. када гране не садрже једнак број елемената, идентично је као и у случају једнаког броја елемената. Значи, код паралелно-редне конфигурације, где су елементи у више паралелних грана редно везани, најпре се одреде вредности поузданости сваке гране, па се онда за одређивање поузданости система примењује правило које важи за паралелну конфигурацију [6].

Пример 3.1 Израчунати поузданост система приказаних на слици 3.3, ако поузданости елемената имају вредности: $R_A=0,92$; $R_B=0,86$; $R_C=0,99$ и $R_D=0,89$.



Слика 3.3 а) редно-паралелна конфигурација, б) паралелно-редна конфигурација

Решење:

а) Поузданост групе састављене од елемената А и В биће:

$$R_{AB} = 1 - (1 - R_A)(1 - R_B) = 1 - (1 - 0,92)(1 - 0,86) = 0,9888,$$

поузданост групе састављене од елемената С и D је:

$$R_{CD} = 1 - (1 - R_C)(1 - R_D) = 1 - (1 - 0,99)(1 - 0,89) = 0,9989.$$

Сада је поузданост система:

$$R_S = R_{AB} R_{CD} = 0,9888 \cdot 0,9989 = 0,9877.$$

б) Поузданост гране која садржи елементе А и С износи:

$$R_{AC} = R_A R_C = 0,92 \cdot 0,99 = 0,9108,$$

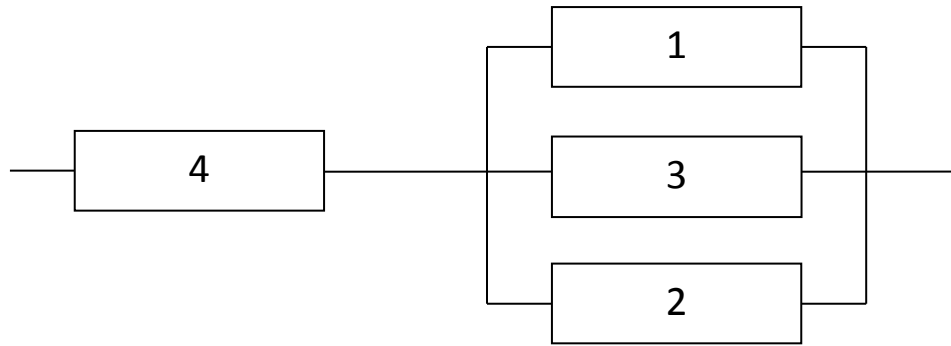
поузданост гране са елементима В и D је:

$$R_{BD} = R_B R_D = 0,86 \cdot 0,89 = 0,7654,$$

па је поузданост система:

$$R_S = 1 - (1 - R_{AC})(1 - R_{BD}) = 1 - (1 - 0,9108)(1 - 0,7654) = 0,9791.$$

Пример 3.2 Машински систем је састављен од четири независна подсистема повезаних као на слици 3.4. Интензитети отказа одговарајућих подсистема могу се представити изразима: $h_1(t) = 0,6 \cdot 10^{-3}$ otk/h, $h_2(t) = 0,2 \cdot 10^{-3}$ otk/h, $h_3(t) = 0,5 \cdot 10^{-3}$ otk/h, $h_4(t) = 0,3 \cdot 10^{-3}$ otk/h. Одредити вероватноћу исправног рада и интензитет окажа система за време од 150 часова рада и средње време исправног рада система.



Слика 3.4

Решење:

Уопштени образац за одређивање поузданости има облик:

$$R_i(t) = e^{-\int_0^t h(t) dt}.$$

Израз за поузданост целокупног подсистема:

$$R_s(t) = R_4(t) \cdot R_{ps}(t).$$

Поузданост паралелног система:

$$R_{ps}(t) = 1 - \prod_{i=1}^m F_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - R_i(t)),$$

где је: $m = 3$ – број грана паралелног система.

$$R_{ps}(t) = 1 - [(1 - R_1(t)) \cdot (1 - R_3(t)) \cdot (1 - R_2(t))] =$$

$$R_{ps}(t) = 1 - [1 - 1 + R_1(t) + R_3(t) + R_2(t) - R_1(t) \cdot R_3(t) - R_1(t) \cdot R_2(t) - R_3(t) \cdot R_2(t) +$$

$$+ R_1(t) \cdot R_3(t) \cdot R_2(t)],$$

Одређивање поузданости целокупног система:

$$R_s(t) = [1 - 1 + R_1(t) + R_3(t) + R_2(t) - R_1(t) \cdot R_3(t) - R_1(t) \cdot R_2(t) - R_3(t) \cdot R_2(t) +$$

$$+ R_1(t) \cdot R_3(t) \cdot R_2(t)] \cdot R_4(t),$$

$$R_s(t) = R_1(t) \cdot R_4(t) + R_3(t) \cdot R_4(t) + R_2(t) \cdot R_4(t) - R_1(t) \cdot R_3(t) - R_3(t) \cdot R_4(t) -$$

$$- R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot R_4(t) - R_3(t) \cdot R_2(t) \cdot R_4(t) + R_1(t) \cdot R_3(t) \cdot R_2(t) \cdot R_4(t),$$

$$R_s(t) = e^{-(h_1+h_4)t} + e^{-(h_3+h_4)t} + e^{-(h_2+h_4)t} - e^{-(h_1+h_3+h_4)t} - e^{-(h_1+h_2+h_4)t} - e^{-(h_3+h_2+h_4)t} + e^{-(h_1+h_3+h_2+h_4)t},$$

$$R_s(t) = e^{-(0,6+0,310)^{-3} \cdot t} + e^{-(0,5+0,3)10^{-3} \cdot t} + e^{-(0,2+0,3)10^{-3} \cdot t} - e^{-(0,6+0,5+0,3)10^{-3} \cdot t} - e^{-(0,6+0,2+0,3)10^{-3} \cdot t} -$$

$$- e^{-(0,5+0,2+0,3)10^{-3} \cdot t} + e^{-(0,6+0,5+0,2+0,3)10^{-3} \cdot t},$$

$$R_s(t) = e^{-0,9 \cdot 10^{-3} \cdot t} + e^{-0,8 \cdot 10^{-3} \cdot t} + e^{-0,5 \cdot 10^{-3} \cdot t} - e^{-0,14 \cdot 10^{-3} \cdot t} - e^{-0,11 \cdot 10^{-3} \cdot t} - e^{-0,10 \cdot 10^{-3} \cdot t} + e^{-0,16 \cdot 10^{-3} \cdot t},$$

$$R_s(150) = e^{-0,9 \cdot 10^{-3} \cdot 150} + e^{-0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 150} + e^{-0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 150} - e^{-0,14 \cdot 10^{-3} \cdot 150} - e^{-0,11 \cdot 10^{-3} \cdot 150} -$$

$$- e^{-0,10 \cdot 10^{-3} \cdot 150} + e^{-0,16 \cdot 10^{-3} \cdot 150} = 0,87394739734.$$

Одређивање средњег времена рада до отказа:

$$t_{sr} = \int_0^{\infty} R_s(t) \cdot dt,$$

$$t_{sr} = \int_0^{\infty} \left(e^{-(h_1+h_4)t} + e^{-(h_3+h_4)t} + e^{-(h_2+h_4)t} - e^{-(h_1+h_3+h_4)t} - e^{-(h_1+h_2+h_4)t} - e^{-(h_3+h_2+h_4)t} + e^{-(h_1+h_3+h_2+h_4)t} \right) dt$$

$$t_{sr} = \frac{1}{h_1+h_4} + \frac{1}{h_3+h_4} + \frac{1}{h_2+h_4} - \frac{1}{h_1+h_3+h_4} - \frac{1}{h_1+h_2+h_4} - \frac{1}{h_3+h_2+h_4} + \frac{1}{h_1+h_3+h_2+h_4},$$

$$t_{sr} = \frac{1}{0,6+0,3} + \frac{1}{0,5+0,3} + \frac{1}{0,2+0,3} - \frac{1}{0,6+0,5+0,3} - \frac{1}{0,6+0,5+0,3} - \frac{1}{0,6+0,2+0,3} -$$

$$- \frac{1}{0,5+0,2+0,3} + \frac{1}{0,6+0,5+0,2+0,3} = 2,363 \text{ године.}$$

На основу израза за вероватноћу исправног рада до отказа (поузданост) може се одредити густина расподеле која је потребна при одређивању интензитета отказа:

$$f_s(t) = -\frac{dR_s(t)}{dt},$$

$$f_s(150) = 0,9 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0,9 \cdot 10^{-3} t} + 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0,8 \cdot 10^{-3} t} + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0,5 \cdot 10^{-3} t} -$$

$$- 0,14 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0,14 \cdot 10^{-3} t} - 0,11 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0,11 \cdot 10^{-3} t} -$$

$$- 0,10 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0,10 \cdot 10^{-3} t} - 0,16 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0,16 \cdot 10^{-3} t},$$

$$f_s(150) = 0,9 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0,9 \cdot 10^{-3} \cdot 150} + 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 150} + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 150} -$$

$$- 0,14 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0,14 \cdot 10^{-3} \cdot 150} - 0,11 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0,11 \cdot 10^{-3} \cdot 150} -$$

$$- 0,10 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0,10 \cdot 10^{-3} \cdot 150} - 0,16 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0,16 \cdot 10^{-3} \cdot 150}.$$

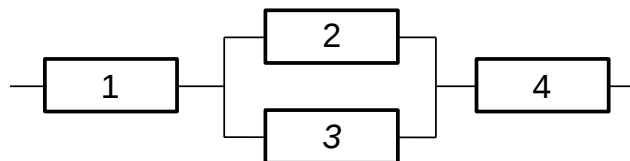
$$f_s(150) = 0,0023711478 \text{ otk/h.}$$

Коначно се може одредити интензитет отказа система:

$$h_s(t) = \frac{f_s(t)}{R_s(t)},$$

$$h_s(2,2) = \frac{f_s(t)}{R_s(t)} = \frac{0,0023711478}{0,8739473949734} = 0,0027131471 [\text{отк./години}].$$

Пример 3.3 Четири елемента везана су у систем чија структура приказана на слици 3.5. Интензитети отказа одговарајућих елемената могу се представити изразима $h_1(t) = 0,3 \cdot t$, $h_2(t) = 0,4 \cdot t$, $h_3(t) = 0,1 \cdot t$ и $h_4(t) = 0,2 \cdot t$. Наћи вероватноћу исправног рада система после две године рада.



Слика 3.5

Решење:

Из текста задатка примећује се да се интензитет отказа јавља у форми $h(t) = a_i \cdot t$ што значи да је то линеарно растући модел интензитета отказа.

Вероватноћа исправног рада елемената за линеарно растући модел се рачуна на основу израза:

$$R(t) = e^{-\int_0^t h_i(t) dt} = e^{-\frac{a_i \cdot t^2}{2}},$$

где је a_i ($i=1, 2, 3, 4$) константа и износи: $a_1 = 0,3$; $a_2 = 0,4$; $a_3 = 0,1$; $a_4 = 0,2$.

Вероватноће исправног рада елемената су:

$$R_1(t) = e^{-0,15t^2}; R_2(t) = e^{-0,2t^2}; R_3(t) = e^{-0,05t^2}; R_4(t) = e^{-0,1t^2}.$$

Вероватноћа исправног рада система се рачуна као:

$$R_s = R_1 R_{ps} R_4 = R_1 R_2 R_4 + R_1 R_3 R_4 - R_1 R_2 R_3 R_4,$$

где је R_{ps} вероватноћа исправног рада паралелне везе елемената у систему и износи:

$$R_{ps} = 1 - F_2 \cdot F_3 = 1 - (1 - R_2)(1 - R_3) = R_2 + R_3 - R_2 R_3.$$

Дакле, поузданост система приказаног на слици 3.5 износи:

$$R_s(t) = e^{-\frac{a_1+a_2+a_4}{2}t^2} + e^{-\frac{a_1+a_3+a_4}{2}t^2} - e^{-\frac{a_1+a_2+a_3+a_4}{2}t^2} = e^{-0,45t^2} + e^{-0,32t^2} - e^{-0,5t^2}$$

$$R_s(2) = e^{-0,45 \cdot 2^2} + e^{-0,32 \cdot 2^2} - e^{-0,5 \cdot 2^2} = 0,33115.$$

У овом случају средње време рада система до отказа је:

$$t_{sr} = \int_0^\infty R_s(t) dt = \int_0^\infty e^{-0,45t^2} dt + \int_0^\infty e^{-0,32t^2} dt - \int_0^\infty e^{-0,5t^2} dt = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{0,45}} + \frac{1}{\sqrt{0,3}} + \frac{1}{\sqrt{0,5}} \right) = 1,9022$$

На основу израза за вероватноћу исправног рада система у функцији од времена рада до отказа добија се густина времена рада до отказа:

$$f_s(t) = -\frac{dR_s(t)}{dt} = 2 \cdot 0,45 \cdot t \cdot e^{-0,45t^2} + 2 \cdot 0,3 \cdot t \cdot e^{-0,32t^2} - 2 \cdot 0,5 \cdot t \cdot e^{-0,5t^2}.$$

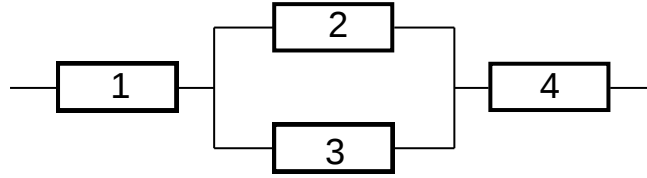
За $t = 2$ године, вредност густине рада до отказа је једнака:

$$f_s(t = 2) = 0,38829 \text{ [otk/god]}.$$

На крају, интензитет отказа система једнак је:

$$h_s(t) = -\frac{f_s(t)}{R_s(t)} = \frac{0,38829}{0,33115} = 1,17255 \text{ [otk/god]}.$$

Пример 3.4 Машински систем приказан на слици 3.6 састоји се од четири независна подсистема. Откази подсистема су изненадни тако да је интензитет отказа појединих подсистема: $h_1(t) = 0,5 \cdot 10^{-3}$ otk/h, $h_2(t) = 0,3 \cdot 10^{-3}$ otk/h, $h_3(t) = 0,2 \cdot 10^{-3}$ otk/h и $h_4(t) = 0,5 \cdot 10^{-3}$ otk/h. Одредити вероватноћу исправног рада и интензитет отказа система за време од 120 часова рада. Такође одредити и средње време исправног рада система.



Слика 3.6

Решење:

Вероватноћа исправног рада i -тог елемента се рачуна по обрасцу:

$$R_i(t) = e^{-\int h_i(t) dt} = e^{-h_i \cdot t}.$$

Пошто се систем састоји из елемената 2 и 3 који су везани паралелно и после везани редно са елементима 1 и 4, поузданост система биће:

$$R_s = R_1 \cdot R_{ps} \cdot R_4$$

Поузданост подсистема паралелно везаних елемената износи:

$$R_{ps} = 1 - F_{ps} = 1 - F_2 F_3 = 1 - (1 - R_2) \cdot (1 - R_3) = R_2 + R_3 - R_2 R_3$$

Даље се поузданост целог система рачуна када се све помножи;

$$R_s = R_1 R_2 R_4 + R_1 R_3 R_4 - R_1 R_2 R_3 R_4,$$

$$R_s(t) = e^{-(h_1+h_2+h_4) \cdot t} + e^{-(h_1+h_3+h_4) \cdot t} - e^{-(h_1+h_2+h_3+h_4) \cdot t} =$$

$$= e^{-1,3 \cdot 10^{-3} \cdot t} + e^{-1,2 \cdot 10^{-3} \cdot t} + e^{-1,5 \cdot 10^{-3} \cdot t}.$$

Поузданост система за 120 часова је:

$$R_s(120) = e^{-1,3 \cdot 10^{-3} \cdot 120} + e^{-1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 120} - e^{-1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 120} = 0,85555 + 0,8658 - 0,83525 = 0,88617$$

На основу израза за вероватноћу исправног рада система у функцији од времена рада до отказа добија се густина времена рада до отказа:

$$f_s(t) = -\frac{dR_s(t)}{dt} = (h_1 + h_2 + h_4) \cdot e^{-(h_1+h_2+h_4) \cdot t} + (h_1 + h_3 + h_4) \cdot e^{-(h_1+h_3+h_4) \cdot t} -$$

$$-(h_1 + h_2 + h_3 + h_4) \cdot e^{-(h_1+h_2+h_3+h_4) \cdot t} =$$

$$= 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-1,3 \cdot 10^{-3} \cdot t} + 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-1,2 \cdot 10^{-3} \cdot t} - 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-1,5 \cdot 10^{-3} \cdot t}.$$

Густина времена рада до отказа за време од 120 часова ће бити:

$$f_s(120) = 1,1122 \cdot 10^{-3} + 1,0390 \cdot 10^{-3} - 1,2529 \cdot 10^{-3} = 8,983 \cdot 10^{-4} \text{ [otk/h]}.$$

Коначно се може одредити интензитет отказа:

$$h_s(120) = \frac{f_s(120)}{R_s(120)} = \frac{8,983 \cdot 10^{-4}}{0,88617} = 1,0136 \cdot 10^{-3} \text{ [otk/h]}.$$

Средње време исправног рада система је:

$$t_{sr} = \int_0^{\infty} R_s(t) dt = \int_0^{\infty} (e^{-(h_1+h_2+h_4) \cdot t} + e^{-(h_1+h_3+h_4) \cdot t} - e^{-(h_1+h_2+h_3+h_4) \cdot t}) dt =$$

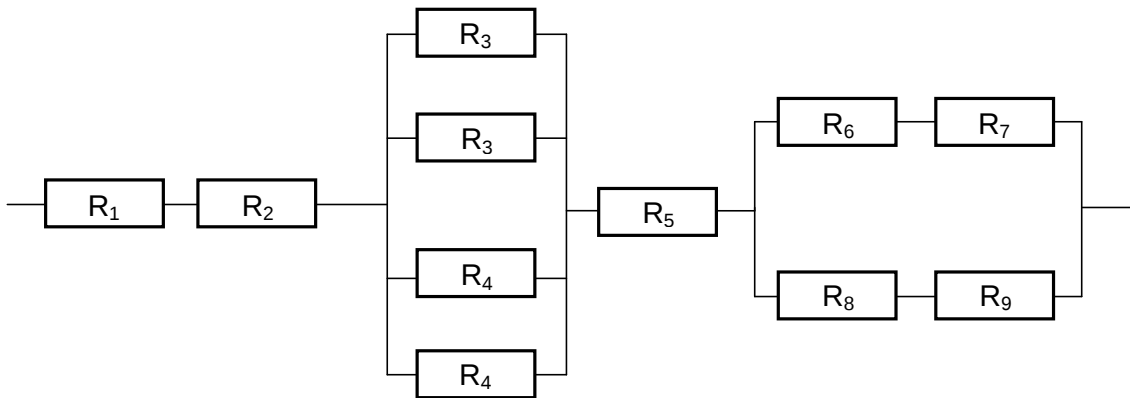
$$= \frac{1}{h_1 + h_2 + h_4} + \frac{1}{h_1 + h_3 + h_4} - \frac{1}{h_1 + h_2 + h_3 + h_4} = \frac{1}{1,3 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{1,2 \cdot 10^{-3}} - \frac{1}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 935,897 \text{ [h]}.$$

Пример 3.5 Нацртати блок-дијаграм поузданости комплексног система чија је поузданост дата једначином:

$$R_s = R_1 \cdot R_2 \cdot [1 - (1 - R_3)^2 \cdot (1 - R_4)^2] \cdot R_5 \cdot [1 - (1 - R_6 R_7) \cdot (1 - R_8 R_9)].$$

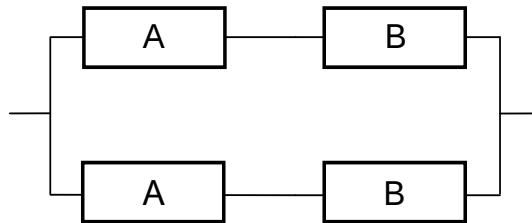
Решење:

На основу израза за одређивање поузданости система, тражени блок-дијаграм поузданости приказан је на слици 3.7.



Слика 3.7

Пример 3.6 Елементи А и В чине систем приказан на слици 3.8. Елементи имају експоненцијални закон расподеле поузданости са интензитетима отказа $\lambda_A = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ и $\lambda_B = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ h}^{-1}$. Одредити поузданост система за $t=100$ часова, средње време у раду, учесталост и интензитет отказа за $t=100$ часова рада.



Слика 3.8

Решење:

Поузданост система, према блок-дијаграму поузданости на слици 3.8 је:

$$R(t) = 1 - (1 - e^{-(\lambda_A + \lambda_B)t})^2 = 1 - (1 - e^{-(0,3+0,2)10^{-3}t})^2,$$

$$R(100) = 0,9976.$$

Средње време у раду је:

$$t_{sr} = \int_0^{\infty} R(t)dt = \int_0^{\infty} [1 - (1 - e^{-(\lambda_A + \lambda_B)t})^2] dt = \frac{-2}{\lambda_A + \lambda_B} e^{-(\lambda_A + \lambda_B)t} + \frac{1}{2(\lambda_A + \lambda_B)} e^{-2(\lambda_A + \lambda_B)t} \Big|_0^{\infty}$$

$$t_{sr} = 3000 \text{ h},$$

Густина расподеле је:

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} = -[2e^{-(\lambda_A + \lambda_B)t} - e^{-2(\lambda_A + \lambda_B)t}] =$$

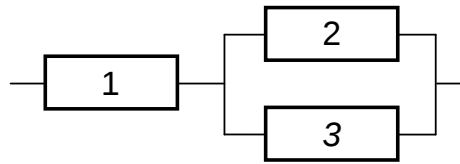
$$= 2(\lambda_A + \lambda_B) \cdot [e^{-(\lambda_A + \lambda_B)t} - e^{-2(\lambda_A + \lambda_B)t}] = 2(0,3 + 0,2) \cdot 10^{-3} (e^{-0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 100} - e^{-2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 100})$$

$$f(100) = 4,64 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$$

Интензитет отказа система према претходном је:

$$\lambda_s(100) = \frac{f(100)}{R(100)} = \frac{4,64 \cdot 10^{-5}}{0,9976} = 4,65 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$$

Пример 3.7 Три елемента везана у машински систем на начин приказан на слици 3.9 имају линеарно растуће моделе интензитета отказа дате као $h_1(t) = t$; $h_2(t) = 0,3t$; $h_3 = 0,7t$. Наћи вероватноћу исправног рада система после 2 године рада, а затим одредити средње време исправног рада система.



Слика 3.9

Поузданост система приказаног на слици 3.9 износи:

$$R_s = R_1 R_{ps} = R_1 (R_2 + R_3 - R_2 R_3) = R_1 R_2 + R_1 R_3 - R_1 R_2 R_3,$$

$$R_s(t) = e^{-\frac{a_1+a_2}{2}t^2} + e^{-\frac{a_1+a_3}{2}t^2} - e^{-\frac{a_1+a_2+a_3}{2}t^2} =$$

$$= e^{-0,65t^2} + e^{-0,85t^2} - e^{-1t^2}.$$

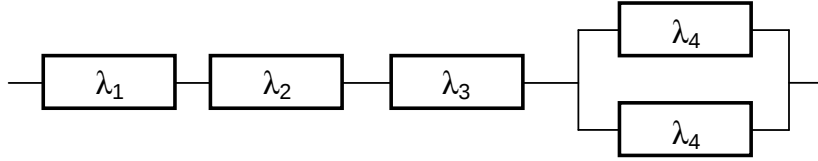
Поузданост система после 2 године рада је:

$$R_s(2) = e^{-0,65 \cdot 2^2} + e^{-0,85 \cdot 2^2} - e^{-1 \cdot 2^2} = 0,0893.$$

Средње време исправног рада система је:

$$t_{sr} = \int_0^{\infty} R_s(t)dt = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{0,65}} + \frac{1}{\sqrt{0,85}} - \frac{1}{\sqrt{1}} \right) = 1,174 \text{ h}.$$

Пример 3.8 Одредити поузданост и средње време у раду за систем чија је шема поузданости приказана на слици 3.10 ако се поузданост свих елемената покорава експоненцијалном закону расподеле поузданости и ако су времена рада елемената система једнака времену рада система.



Слика 3.10

Решење:

Поузданост система износи:

$$R_s = R_1 R_2 R_3 \cdot [1 - (1 - R_4)^2] = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \cdot t} \cdot [1 - (1 - e^{-\lambda_4 \cdot t})] = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \cdot t} \cdot (2e^{-\lambda_4 t} - e^{-2\lambda_4 t}) = 2 \cdot e^{-t(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)} - e^{-t(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 2\lambda_4)}.$$

Средње време рада система се одређује преко интеграла у облику:

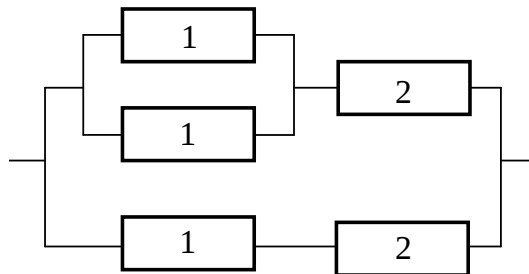
$$t_{sr} = \int_0^{\infty} R_s(t) dt$$

$$t_{sr} = \int_0^{\infty} R_s(t) dt = 2 \cdot \int_0^{\infty} e^{-t(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)} dt - \int_0^{\infty} e^{-t(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 2\lambda_4)} dt =$$

$$= \left[-\frac{2}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4} e^{-t(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 2\lambda_4} e^{-t(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 2\lambda_4)} \right] \Big|_0^{\infty} =$$

$$= \frac{2}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 2\lambda_4}.$$

Пример 3.9 По два елемента једне и друге врсте везани су у систем, чија је структура приказана на слици 3.11. Познато је да је интензитет отказа елемената линеарно растућа функција времена и да је интензитет отказа другог елемента 40% већи од интензитета отказа првог. Средње време рада до отказа система је 1,589 године. Одредити вероватноћу исправног рада и интензитет отказа система после 1,4 године рада.



Слика 3.11

Решење:

Из текста задатка се види да се интензитет отказа јавља у форми $h(t) = a_i \cdot t$.

$$h_1(t) = a \cdot t, \quad h_2(t) = 1,4 \cdot a \cdot t.$$

Вероватноћа исправног рада елемената за линеарно растући модел се рачуна на основу израза:

$$R(t) = e^{-\int_0^t h_i(t) dt} = e^{-\frac{a_i \cdot t^2}{2}},$$

тако је:

$$R_1(t) = e^{-\frac{a \cdot t^2}{2}} = e^{-0,5 \cdot a \cdot t^2} \quad \text{и} \quad R_2(t) = e^{-0,7 \cdot a \cdot t^2}.$$

Поузданост система ће бити:

$$R_S(t) = 3 \cdot R_1 \cdot R_2 - 2 \cdot R_1^2 \cdot R_2^2 - R_1^2 \cdot R_2 + R_1^3 \cdot R_2^2,$$

$$R_S(t) = 3 \cdot e^{-1,2 \cdot a \cdot t^2} - 2 \cdot e^{-2,4 \cdot a \cdot t^2} - e^{-1,7 \cdot a \cdot t^2} - e^{-2,9 \cdot a \cdot t^2}.$$

Средње време биће:

$$t_{sr} = \int_0^\infty R_S(t) dt = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{a}} \left(\frac{3}{\sqrt{1,2}} - \frac{2}{\sqrt{2,4}} - \frac{1}{\sqrt{1,7}} + \frac{1}{\sqrt{2,9}} \right) = \frac{1,1233}{\sqrt{a}}.$$

На основу задатог средњег времена рада до отказа $t_{sr} = 1,589$ год и претходног израза, добија се:

$$1,589 = \frac{1,1233}{\sqrt{a}} \Rightarrow 1,589 \cdot \sqrt{a} = 1,1233 \Rightarrow \sqrt{a} = \frac{1,1233}{1,589} = 0,7069,$$

$$a = 0,5.$$

Вероватноћа исправног рада система после 1,4 године је:

$$R_S(t) = 3 \cdot e^{-1,2 \cdot 0,5 \cdot t^2} - 2 \cdot e^{-2,4 \cdot 0,5 \cdot t^2} - e^{-1,7 \cdot 0,5 \cdot t^2} - e^{-2,9 \cdot 0,5 \cdot t^2},$$

$$R_S(1,4) = 3 \cdot e^{-1,2 \cdot 0,5 \cdot 1,4^2} - 2 \cdot e^{-2,4 \cdot 0,5 \cdot 1,4^2} - e^{-1,7 \cdot 0,5 \cdot 1,4^2} - e^{-2,9 \cdot 0,5 \cdot 1,4^2} = 0,6035.$$

На основу израза за вероватноћу исправног рада система, може се одредити густина времена рада система до отказа:

$$f_s(t) = -\frac{dR_s(t)}{dt} = 2 \cdot 3 \cdot 0,6 \cdot t \cdot e^{-0,6t^2} - 2 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot t \cdot e^{-1,2t^2} -$$

$$- 2 \cdot 0,85 \cdot t \cdot e^{-0,85t^2} + 2 \cdot 1,45 \cdot t \cdot e^{-1,45t^2},$$

за $t = 1,4$ године, вредност густине рада до отказа је једнака:

$$f_s(1,4) = -\frac{dR_s(1,4)}{dt} = 2 \cdot 3 \cdot 0,6 \cdot 1,4 \cdot e^{-0,6 \cdot 1,4^2} - 2 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot 1,4 \cdot e^{-1,2 \cdot 1,4^2} -$$

$$- 2 \cdot 0,85 \cdot 1,4 \cdot e^{-0,85 \cdot 1,4^2} + 2 \cdot 1,45 \cdot 1,4 \cdot e^{-1,45 \cdot 1,4^2} = 0,4998 \text{ [otk/god]}.$$

Интензитет отказа система је:

$$h_s(1,4) = \frac{f_s(1,4)}{R_s(1,4)} = \frac{0,4998}{0,6035} = 0,82817 \text{ [otk/god]}.$$

4. ПОУЗДАНОСТ У СЛУЧАЈУ ПАСИВНЕ ПАРАЛЕЛНЕ ВЕЗЕ ЕЛЕМЕНАТА У СИСТЕМУ

Под пасивном паралелном везом или пасивном резервом, подразумева се уградња паралелног елемента, али тако да се његово укључивање у рад остварује само ако дође до појаве отказа елемента, који је активан, односно, на елементу коме овај паралелни елемент представља резерву. Укључивање у рад паралелних елемената се врши преко сензора, (који примају сигнал да је дошло до отказа на активном елементу), или преко система укључивања, који могу, у извесној мери, негативно да утичу на поузданост целог система [1].

Функција поузданости система за пасивне паралелне везе, чији је блок-дијаграм поузданости приказан на слици (4.1), може се одредити помоћу Поасонове расподеле у облику:

$$R_s(t) = \sum_{k=0}^n \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} = \left[\frac{(\lambda \cdot t)^0}{0!} + \frac{(\lambda \cdot t)^1}{1!} \lambda t + \frac{(\lambda \cdot t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda \cdot t)^n}{n!} \right] \cdot e^{-\lambda \cdot t} =$$

$$= \left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda \cdot t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda \cdot t)^n}{n!} \right] \cdot e^{-\lambda \cdot t},$$
(4.1)

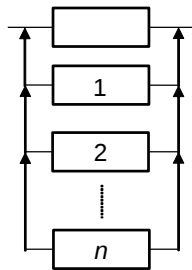
где је:

n - укупан број резервних елемената у систему (укупан број елемената у систему је $n+1$),

k - $0 \div n$ - променљива елемената (текући индекс при сумирању) – број елемената у пасивној вези,

$\lambda = const.$ - интензитет отказа експоненцијалног закона расподеле и

t - променљива времена.

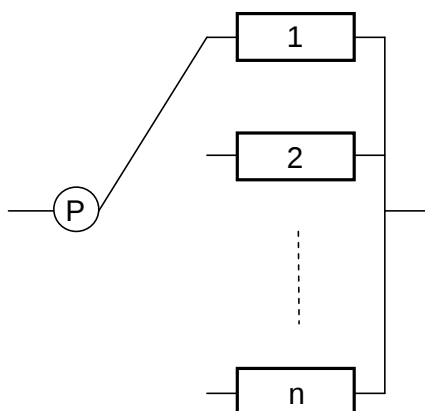


Слика 4.1 Блок-дијаграм поузданости система
са пасивном паралелном везом

У систему паралелно везаних елемената постоје елементи који су означени као олакшана резерва. Ови резервни елементи до момента пуног укључења у рад се налазе под олакшаним режимом рада, тако да је вероватноћа њиховог отказа у том периоду веома мала. У реалним системима код паралелних веза елемената треба да се узме у обзир и поузданост самог уређаја за укључење резервног елемента. Сем тога, елемент који откаже пошто се замени резервним одлази на ремонт, после чега се поново укључује као резервни елемент, што се такође може узети у обзир. Према томе, системи укључивања резервних елемената могу бити доста сложени, па је овом проблему посвећена обимна литература [6].

4.1 ПОУЗДАНОСТ У СЛУЧАЈУ ПРИПРАВНОСТИ

Систем са елементима у приправности састоји се од n елемената, од којих само 1 функционише док се $n - 1$ налази у приправности, и од прекидача P чији је задатак да по отказу елемента који функционише укључи следећи елемент слика (4.2) [1].



Слика 4.2 Систем са једним активним елементом и $(n-1)$ елементима у приправности

Према томе, елементи у приправности не функционишу све док је елеменат који ради исправан. У моменту отказа елемента који је до тада радио укључује се следећи елеменат који је био у приправности, док остали и даље остају у резерви. Прекидач који служи за укључивање елемената у приправности може да буде неки аутоматски сензорски уређај који открива отказ и одмах пребацује везу на следећи елеменат. Међутим, прекидач може представљати и оператора који открива отказ и пребацује везу на елеменат у приправности. При томе, тај елеменат у приправности може да буде резервни део који ће оператор ставити уместо елемента који је отказао (на пример, стављање резервног точка на аутомобил у случају бушења гуме на једном од точкова).

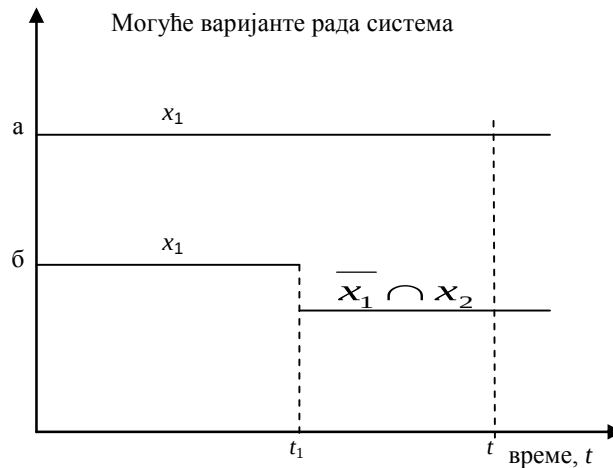
У претходним одељцима видели смо како се под одређеним условима може применити Поасонова расподела за одређивање поузданости у случају приправности. Сада се разматра одређивање поузданости система са елементима у приправности чији откази зависе од времена. При овом разматрању треба имати у виду да прекидач може да откаже на више начина, као и да елементи у приправности могу отказати још у стању када не функционишу [5].

Ако се означи са x_i догађај успешног функционисања i -тог елемента, а са $\bar{x}_i$ догађај отказа i -тог елемента. Случајну променљиву величину, која означава време отказа i -тог елемента, означава се са T_i , а њена функција густине биће $f_i(t_i)$.

4.1.1 СЛУЧАЈ КАДА ЈЕ ПРЕКИДАЧ ИДЕАЛАН

Ако се претпостави да прекидач беспрекорно функционише, тј. да не може да откаже. Исто тако, се претпоставља да елементи у приправности не могу да откажу у стању мировања, тј. када не функционишу.

Разматра се поузданост система који се састоји од елемента 1 у стању функционисања и елемента 2 у стању приправности. У том случају, систем ће бити исправан у одређеном тренутку времена t уколико или а) елеменат 1 ради до тог времена t , или б) елеменат 1 откаже у тренутку времена $T_1 < t$, а елеменат 2 ради од времена T_1 до t . Обе варијанте успешног функционисања система приказане су на слици (4.3).



Слика 4.3 Могуће варијанте рада система са активним елементом 1 и елементом 2 у приправности

Поузданост оваквог система биће:

$$R(t) = P[(T_1 > t) \cup (T_1 \leq t \cap T_2 > t - T_1)]. \quad (4.2)$$

Пошто су варијанте функционисања система а и б узајамно искључиви догађаји, може се написати:

$$R(t) = P(T_1 > t) + P(T_1 \leq t \cap T_2 > t - T_1), \quad (4.3)$$

односно:

$$R(t) = R_1(t) + \int_0^t f_1(t_1) R_2(t - t_1) dt_1. \quad (4.4)$$

Према томе, ако се знају функције густине отказа елемената, из једначине (4.4) може се одредити поузданост система са једним активним елементом и једним елементом у приправности.

Ако се претпостави да елементи 1 и 2 имају константне интензитета отказа λ_1 и λ_2 онда се применом једначине (4.4) добија:

$$R(t) = e^{-\lambda_1 t} + \int_0^t \lambda_1 e^{-\lambda_1 t_1} \cdot e^{-\lambda_2 (t-t_1)} dt_1, \quad (4.5)$$

која после једноставних математичких операција прелази у:

$$R(t) = e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}). \quad (4.6)$$

Када оба елемента имају исти интензитет отказа $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, поново се примењује једначина (4.4) па се добија:

$$R(t) = e^{-\lambda t} + \int_0^t \lambda_1 e^{-\lambda t_1} \cdot e^{-\lambda (t-t_1)} dt_1, \quad (4.7)$$

односно:

$$R(t) = e^{-\lambda t} (1 + \lambda t). \quad (4.8)$$

Поузданост система, који се састоји од активног елемента 1 и елемента 2 и 3 у приправности, може се одредити сличним разматрањем. Све могуће варијанте успешног функционисања оваквог система приказане су на слици 4.4.

Поузданост система ће бити:

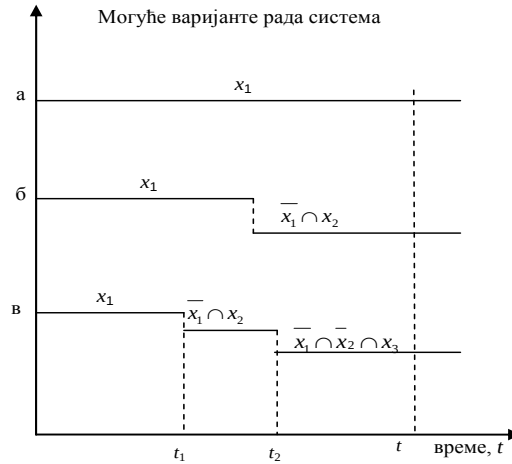
$$R(t) = P[(T_1 > t) \cup (T_1 \leq t \cap T_2 > t - T_1) \cup (T_1 < t \cap T_2 < t - T_1 \cap T_3 > t - T_1 - T_2)]. \quad (4.9)$$

Како су варијанте рада система а, б и в међусобно искључиви догађаји, може се написати:

$$R(t) = P(T_1 > t) + P(T_1 \leq t \cap T_2 > t - T_1) + P(T_1 < t \cap T_2 < t - T_1 \cap T_3 > t - T_1 - T_2), \quad (4.10)$$

односно:

$$R(t) = R_1(t) + \int_0^t f_1(t_1) R_2(t - t_1) dt_1 + \int_0^t f_1(t_1) \int_0^{t-t_1} f_2(t_2) R_3(t - t_1 - t_2) dt_2 dt_1. \quad (4.11)$$



Слика 4.4 Могуће варијанте рада система са активним елементом 1 и елементима 2 и 3 у приправности

Може се приметити да су прва два члана једначине (4.11) идентична са једначином (4.4), што је и логично јер су све варијанте рада система са једним активним елементом и једним елементом у приправности садржане у овом систему.

Ако се разуме специјалан случај када су сва три елемента идентична и имају константан интензитет отказа λ , поузданост система се применом једначине (4.11) може се написати у облику:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2} \right]. \quad (4.12)$$

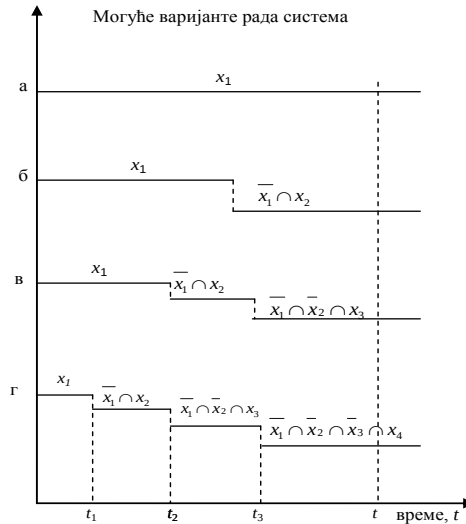
Аналогно претходним разматрањима, варијанте успешног функционисања система, који се састоји од активног елемента 1 и елемента 2, 3 и 4 у приправности, приказане су на слици 4.5.

Постоје четири варијанте успешниг функционисања овог система (а, б, в, г), па ће поузданост бити:

$$R(t) = R_1(t) + \int_0^t f_1(t_1) R_2(t - t_1) dt_1 + \int_0^t f_1(t_1) \int_0^{t-t_1} f_2(t_2) R_3(t - t_1 - t_2) dt_2 dt_1 + \\ + \int_0^t f_1(t_1) \int_0^{t-t_1} f_2(t_2) \int_0^{t-t_1-t_2} f_3(t_3) R_4(t - t_1 - t_2 - t_3) dt_3 dt_2 dt_1. \quad (4.13)$$

Применом ове једначине може се наћи поузданост система који се састоји од четири идентична елемента са константним интензитетима отказа λ у следећем облику:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2} + \frac{(\lambda t)^3}{6} \right]. \quad (4.14)$$



Слика 4.5 Могуће варијанте рада система са активним елементом 1 и елементима 2, 3 и 4 у приправности

У општем облику, поузданост система који се састоји од n идентичних елемената са константним интензитетом отказа λ , при чему је један елемент активан а $(n - 1)$ у приправности, дата је једначином:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!}. \quad (4.15)$$

4.1.2 СЛУЧАЈ КАДА ПРЕКИДАЧ НИЈЕ ИДЕАЛАН

У практичним ситуацијама вероватноћа отказа прекидача има значајан утицај на поузданост система. Код система са елементима у приправности отказ прекидача може да се јави у више облика. Ови облици зависе од механизма укључивања и од самог система. Разматрају се две могућности отказа прекидача.

Прва могућност отказа је ситуација када он не изврши укључивање елемената у приправности у моменту када се то захтева. Ако се са p_p обележи вероватноћа да ће прекидач укључити елемент у приправности онда када се то захтева, поузданост система са активним елементом 1 и елементом 2 у приправности, аналогно са једначином (4.4), биће:

$$R(t) = R_1(t) + P_p \int_0^t f_1(t_1) R_2(t - t_1) dt_1. \quad (4.16)$$

Исто тако, применом једначине (4.11) може се добити поузданост система са активним елементом 1 и елементом 2 и 3 у приправности:

$$R(t) = R_1(t) + P_p \int_0^t f_1(t_1) R_2(t - t_1) dt_1 + P_p^2 \int_0^t f_1(t_1) \int_0^{t-t_1} f_2(t_2) R_3(t - t_1 - t_2) dt_2 dt_1. \quad (4.17)$$

Друга могућност отказа прекидача је ситуација када је прекидач комплексан уређај чија је функција густине отказа $f_p(t)$ и поузданост $R_p(t)$. Према томе, дозвољава се могућност да прекидач може да откаже пре него што се захтева од њега да укључи елемент у приправности. У том случају, поузданост система са активним елементом 1 и екемента 2 у приправности биће:

$$R(t) = P[(T_1 > t) \cup (T_1 \leq t \cap T_p > T_1 \cap T_2 > t - T_1)], \quad (4.18)$$

односно:

$$R(t) = P(T_1 > t) + P(T_1 \leq t \cap T_p > T_1 \cap T_2 > t - T_1), \quad (4.19)$$

где је T_p случајна променљива величина која означава време од отказа прекидача. У интегралној форми, једначина (4.19) добија следећи облик:

$$R(t) = R_1(t) + \int_0^t f_1(t_1) R_p(t) R_2(t - t_1) dt_1. \quad (4.20)$$

Ако се претпостави да оба елемента имају константне интезитете отказа λ и да прекидач има константан интезитет отказа λ_p , онда се применом једначине (4.20) и после једноставних математичких операција добија израз за поузданост таквог система:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \left[1 + \frac{\lambda}{\lambda_p} (1 - e^{-\lambda_p t}) \right]. \quad (4.21)$$

Сличним разматрањем може се одредити поузданост система који се састоји од активног елемента 1 и елемента 2 и 3 у приправности. Аналогно са једначином (4.10), може се написати да је:

$$R(t) = P(T_1 > t) + P(T_1 \leq t \cap T_p > T_1 \cap T_2 > t - T_1) + \\ + P(T_1 < t \cap T_2 < t - T_1 \cap T_p > T_1 + T_2 \cap T_3 > t - T_1 - T_2), \quad (4.22)$$

односно у интегралној форми:

$$R(t) = R_1(t) + \int_0^t f_1(t_1)R_p(t)R_2(t-t_1)dt_1 + \int_0^t f_1(t_1) \int_0^{t-t_1} f_2(t_2)R_p(t_1+t_2)R_3(t-t_1-t_2)dt_2dt_1. \quad (4.23)$$

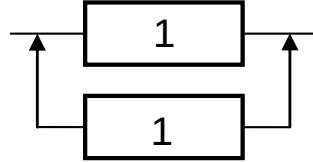
У практичним ситуацијама срећу се и други облици отказа прекидача. На пример, прекидач може да откаже тако што искључује активни елеменат када је он исправан. Свака ситуација мора појединачно да се анализира и на основу тога да се одреди израз за израчунавање поузданости за тај случај.

У неким случајевима се мора узети у обзир могућност да елементи у приправности могу да откажу још пре него што се захтева њихово укључивање. Ако постоји та могућност, на пример код система са активним елементом 1 и елементом 2 у приправности, израз за одређивање поузданости ће, аналогно са једначином (4.20), бити:

$$R(t) = R_1(t) + \int_0^t f_1(t_1)R_p(t)R_2(t_1)R_2(t-t_1)dt_1. \quad (4.24)$$

На сличан начин се може наћи израз за поузданост система са 2 и више елемената у приправности.

Пример 4.1 Поузданост елемента 1 (слика 4.6) за време $t=1000$ h је 0,95. Одредити поузданост система за $t=10000$ h и средње време рада система ако се систем реши са два елемента од којих један представља пасивну резерву. Нацртати графике функције поузданости $R(t)$, учестаности отказа $f(t)$ и интензитет отказа $\lambda(t)$ система у периоду од 0 до 80000 h.



Слика 4.6

Решење:

Поузданост елемента и интензитет отказа:

$$R_1(t) = e^{-\lambda_1 t},$$

$$R_1(1000) = e^{-\lambda_1 \cdot 1000} = 0,95,$$

$$\lambda_1 = \frac{\ln R_1(t)}{-t} = \frac{\ln 0,95}{1000} = 5,129329 \cdot 10^{-5} \text{ [h}^{-1}\text{]}.$$

Поузданост система са пасивном паралелном везом се може одредити помоћу Поасонове расподеле у облику:

$$R_s(t) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda_1 \cdot t)^k}{k!} e^{-\lambda_1 t},$$

где је $n = 1$ – укупан број резервних елемената у систему (укупан број елемената у систему је $n + 1 = 2$).

Средње време у раду система је:

$$t_{sr} = \int_0^{\infty} R_s(t)dt = \int_0^{\infty} (1 + \lambda_1 \cdot t) \cdot e^{-\lambda_1 t} dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_1 t} dt + \lambda_1 \int_0^{\infty} t \cdot e^{-\lambda_1 t} dt = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1^2} = \frac{2}{\lambda_1},$$

$$t_{sr} = \frac{2}{5,129329 \cdot 10^{-5}} = 38991,4515 \text{ [h]}.$$

Интеграл $\int_0^{\infty} t \cdot e^{-\lambda_1 t} dt$ се решава парцијално, при чему је $\int_a^b u \cdot dv = u \cdot v \Big|_a^b - \int_a^b v \cdot du$,

$$u = t, dv = e^{-\lambda_1 t} dt \Rightarrow du = dt, v = \frac{e^{-\lambda_1 t}}{-\lambda_1}.$$

У том случају, добија се:

$$\int_0^{\infty} t \cdot e^{-\lambda_1 t} dt = t \frac{e^{-\lambda_1 t}}{-\lambda_1} \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} \frac{e^{-\lambda_1 t}}{-\lambda_1} dt = \frac{1}{\lambda_1^2}.$$

Функција густине се добија на основу израза:

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

Како је $R_S(t) = (1 - \lambda_1 \cdot t) \cdot e^{-\lambda_1 t} = e^{-\lambda_1 t} + \lambda_1 \cdot t \cdot e^{-\lambda_1 t}$, то је:

$$f_S(t) = \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1 t} - \lambda_1 \cdot (1 \cdot e^{-\lambda_1 t} - t \cdot \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1 t}) = f_S(t) = \lambda_1^2 \cdot t \cdot e^{-\lambda_1 t}.$$

Функција интензитета отказа система са једном пасивном резервом:

$$\lambda_S(t) = \frac{f_S(t)}{R_S(t)} = \frac{\lambda_1^2 \cdot t}{1 + \lambda_1 \cdot t}.$$

Вредности функција поузданости $R(t)$, учестаности отказа $f(t)$ и интензитет отказа $\lambda(t)$ за времена $t=10000, 20000$ и 80000 h су:

$$R_S(10000) = (1 + 5,129329 \cdot 10^{-5} \cdot 10000) \cdot e^{-5,129329 \cdot 10^{-5} \cdot 10000} = 0,90585,$$

$$f_S(10000) = (5,129329 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 10000 \cdot e^{-5,129329 \cdot 10^{-5} \cdot 10000} = 1,57528 \cdot 10^{-5} \text{ [h}^{-1}\text{]},$$

$$\lambda_S(10000) = \frac{(5,129329 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 10000}{1 + 5,129329 \cdot 10^{-5} \cdot 10000} = 1,739008 \cdot 10^{-5} \text{ [h}^{-1}\text{]},$$

$$R_S(20000) = (1 + 5,129329 \cdot 10^{-5} \cdot 20000) \cdot e^{-5,129329 \cdot 10^{-5} \cdot 20000} = 0,72624,$$

$$f_S(20000) = (5,129329 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 20000 \cdot e^{-5,129329 \cdot 10^{-5} \cdot 20000} = 1,8863 \cdot 10^{-5} \text{ [h}^{-1}\text{]},$$

$$\lambda_S(20000) = \frac{(5,129329 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 20000}{1 + 5,129329 \cdot 10^{-5} \cdot 20000} = 2,59741 \cdot 10^{-5} \text{ [h}^{-1}\text{]},$$

$$R_S(80000) = (1 + 5,129329 \cdot 10^{-5} \cdot 80000) \cdot e^{-5,129329 \cdot 10^{-5} \cdot 80000} = 0,08428,$$

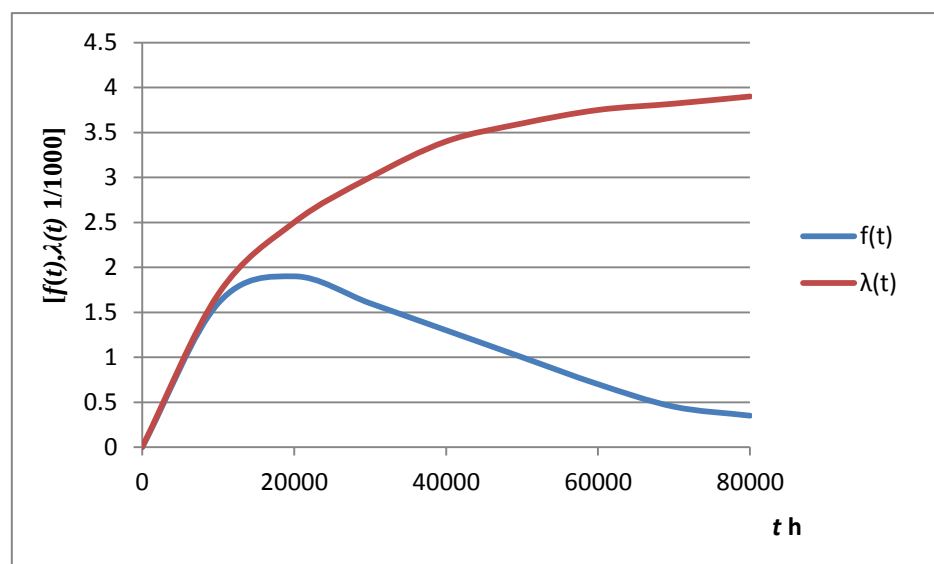
$$f_S(80000) = (5,129329 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 80000 \cdot e^{-5,129329 \cdot 10^{-5} \cdot 80000} = 0,34762 \cdot 10^{-5} \text{ [h}^{-1}\text{]},$$

$$\lambda_S(80000) = \frac{(5,129329 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 80000}{1 + 5,129329 \cdot 10^{-5} \cdot 80000} = 4,124261 \cdot 10^{-5} \text{ [h}^{-1}\text{]}.$$

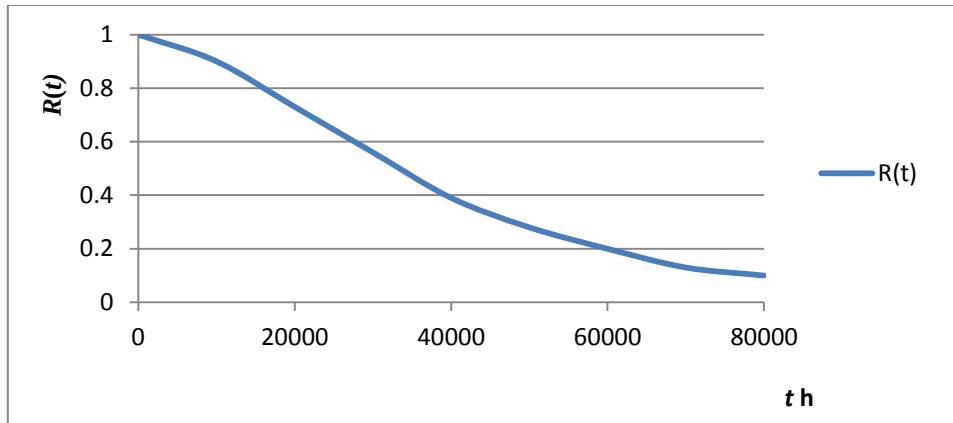
Табела 4.1 приказује бројне вредности тражених функција, док су функције графички приказане на сликама 4.7 и 4.8.

Табела 4.1

t, h	$R_s(t)$	$f_s(t) \cdot 10^{-5} h^{-1}$	$\lambda_s(t) \cdot 10^{-5} h^{-1}$
0	1	0	0
1000	0,99873	0,249945195	0,250263
5000	0,97223	1,017909616	1,0464985
10000	0,90585	1,575278114	1,739008
15000	0,81975	1,828380264	2,23042
20000	0,72624	1,886354393	2,59741
25000	0,63309	1,824531338	2,881923
30000	0,54492	1,694145083	3,108953
35000	0,46425	1,529380033	3,294323
40000	0,39218	1,352462989	3,448536
45000	0,32897	1,17732384	3,578839
50000	0,27428	1,012211938	3,690392
55000	0,22750	0,861553333	3,786971
60000	0,18785	0,727258413	3,8714
65000	0,15450	0,609633588	3,945838
70000	0,12662	0,508009222	4,011958
75000	0,10345	0,421165556	4,071081
80000	0,08428	0,347615871	4,124261



Слика 4.7



Слика 4.8

Пример 4.2 Одредити поузданост у тренутку $t = 1000$ h и средње време у раду система који чине три елемента за случај пасивне паралелне везе елемената. Елементе карактерише експоненцијални закон расподеле, интензитет отказа елемената је $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0,9 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$.

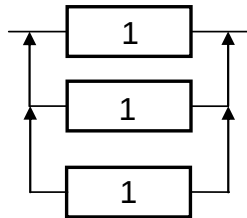
Решење:

Поузданост елемената за $t = 1000$ h износи:

$$R_1(t) = R_2(t) = R_3(t) = R(t) = e^{-\lambda \cdot t},$$

$$R(1000) = R_1(1000) = R_2(1000) = R_3(1000) = e^{-\lambda t} = e^{-0,9 \cdot 10^{-4} \cdot 1000} = 0,91393.$$

Блок-дијаграм система са укупно $n=3$ елемента, од којих 2 елемента чине пасивну резерву, дат је на слици 4.9.



Слика 4.9

Поузданост система са пасивном паралелном везом се може одредити помоћу Поасонове расподеле у облику:

$$R_S(t) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda_1 \cdot t)^k}{k!} e^{-\lambda_1 t} = \left[1 + \lambda \cdot t + \frac{(\lambda \cdot t)^2}{2!} \right] \cdot e^{-\lambda_1 t},$$

$$R_S(1000) = \left[1 + 0,9 \cdot 10^{-4} \cdot 1000 + \frac{(0,9 \cdot 10^{-4} \cdot 1000)^2}{2!} \right] \cdot e^{-0,9 \cdot 10^{-4} \cdot 1000} = 0,99989.$$

Средње време у раду:

$$t_{sr} = \int_0^{\infty} R_S(t) dt = \int_0^{\infty} \left[1 + \lambda \cdot t + \frac{(\lambda \cdot t)^2}{2!} \right] \cdot e^{-\lambda_1 t} dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_1 t} dt + \lambda \int_0^{\infty} t \cdot e^{-\lambda_1 t} dt + \frac{\lambda^2}{2!} \int_0^{\infty} t^2 \cdot e^{-\lambda_1 t} dt,$$

$$t_{sr} = I_1 + I_2 + I_3 = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_1 t} dt + \lambda \int_0^{\infty} t \cdot e^{-\lambda_1 t} dt + \frac{\lambda^2}{2!} \int_0^{\infty} t^2 \cdot e^{-\lambda_1 t} dt,$$

$$I_1 = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_1 t} dt = \frac{1}{-\lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 t} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda_1},$$

$$I_2 = \lambda \int_0^{\infty} t \cdot e^{-\lambda_1 t} dt = \lambda \cdot \frac{1}{\lambda_1^2} = \frac{1}{\lambda_1}.$$

Интеграл I_2 се решава парцијалном интеграцијом, при чему је смена:

$$\int_a^b u \cdot dv = u \cdot v \Big|_a^b - \int_a^b v \cdot du, \text{ а функције су:}$$

$$u = t, \quad dv = e^{-\lambda_1 t} dt \Rightarrow du = dt, \quad v = \frac{e^{-\lambda_1 t}}{-\lambda_1}$$

У том случају добија се:

$$\int_0^{\infty} t \cdot e^{-\lambda_1 t} dt = t \cdot \frac{e^{-\lambda_1 t}}{-\lambda_1} \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} \frac{e^{-\lambda_1 t}}{-\lambda_1} dt = \frac{1}{\lambda_1^2},$$

$$I_3 = \frac{\lambda^2}{2!} \int_0^{\infty} t^2 \cdot e^{-\lambda_1 t} dt = \frac{\lambda^2}{2!} \cdot \frac{2}{\lambda_1^3} = \frac{1}{\lambda_1}.$$

За интеграл I_3 добија се:

$$\int_0^{\infty} t^2 \cdot e^{-\lambda_1 t} dt = t^2 \cdot \frac{e^{-\lambda_1 t}}{-\lambda_1} \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} \frac{e^{-\lambda_1 t}}{-\lambda_1} 2 \cdot t \cdot dt = \frac{2}{\lambda_1} \cdot \int_0^{\infty} e^{-\lambda_1 t} \cdot t \cdot dt = \frac{2}{\lambda_1} \cdot \frac{1}{\lambda_1^2} = \frac{2}{\lambda_1^3},$$

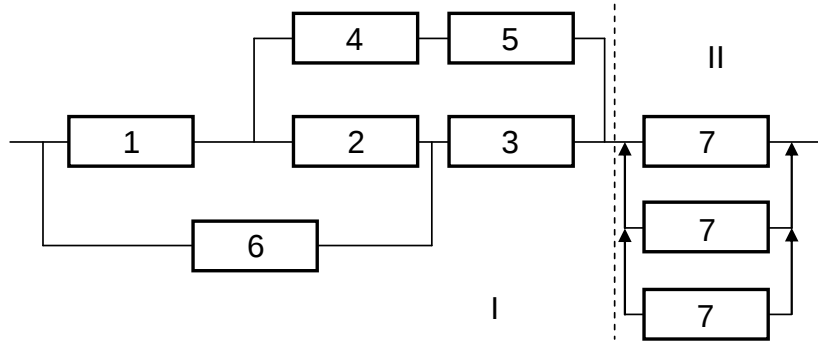
где је:

$$u = t^2, \quad dv = e^{-\lambda_1 t} dt \Rightarrow du = 2 \cdot dt, \quad v = \frac{e^{-\lambda_1 t}}{-\lambda_1}.$$

Средње време у раду је:

$$t_{sr} = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_1} = \frac{3}{\lambda_1} = \frac{3}{0,9 \cdot 10^{-4}} = 33333,3 \text{ [h]}.$$

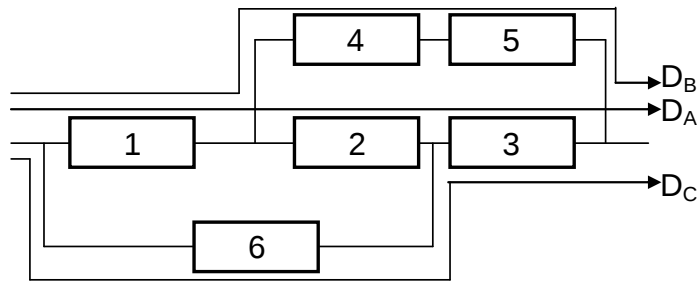
Пример 4.3 Одредити поузданост система приказаног на слици 4.10 за тренутак $t_{sr}=5000 \text{ h}$, ако сви елементи имају експоненцијални закон расподеле поузданости. Систем се састоји од два подсистема. Други подсистем је решен са три елемента, од којих два представљају пасивну резерву. Средње време у раду другог подсистема је $t_{sr II}=15000 \text{ h}$. Подаци: $\lambda_1 = 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$, $\lambda_2 = 0,45 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$, $\lambda_3 = 2,63 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$, $\lambda_4 = 0,88 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$, $R_5(10000) = 0,95$, $R_6(8000) = 0,99$.



Слика 4.10

Решење:

Подсистем I



Слика 4.11

Поузданост подсистема I се одређује применом Булове алгебре (слика 4.11). Користећи се унијом (зависни догађаји) и пресеком (независни догађаји) може се написати:

- 1) Догађај подсистема D_I ће се реализовати ако се реализује догађај D_A , или догађај D_B , или догађај D_C . Математички израз: $D_I = D_A \cup D_B \cup D_C$.
- 2) Догађај D_A ће се реализовати ако се реализују догађаји D_1 , D_2 и D_3 .
 $D_A = D_1 \cap D_2 \cap D_3$
- 3) Догађај D_B ће се реализовати ако се реализују догађаји D_1 , D_4 и D_5 .
 $D_B = D_1 \cap D_4 \cap D_5$
- 4) Догађај D_C ће се реализовати ако се реализују догађаји D_6 и D_3 . $D_C = D_6 \cap D_3$

На основу вероватноће реализације зависних и независних догађаја $P(D_i)$, добија се:

$$P(D_I) = 1 - [1 - P(D_A)] \cdot [1 - P(D_B)] \cdot [1 - P(D_C)] = P(D_A) + P(D_B) + P(D_C) - P(D_A) \cdot P(D_B) - P(D_A) \cdot P(D_C) - P(D_B) \cdot P(D_C) + P(D_A) \cdot P(D_B) \cdot P(D_C),$$

где су:

$$P(D_A) = P(D_1) \cdot P(D_2) \cdot P(D_3), \quad P(D_B) = P(D_1) \cdot P(D_4) \cdot P(D_5),$$

$$P(D_C) = P(D_6) \cdot P(D_3),$$

$$\begin{aligned}
 P(D_I) &= P(D_1) \cdot P(D_2) \cdot P(D_3) + P(D_1) \cdot P(D_4) \cdot P(D_5) + P(D_6) \cdot P(D_3) - \\
 &- P(D_1) \cdot P(D_2) \cdot P(D_3) \cdot P(D_4) \cdot P(D_5) - \\
 &- P(D_1) \cdot P(D_2) \cdot P(D_3) \cdot P(D_6) \cdot P(D_3) - \\
 &- P(D_1) \cdot P(D_4) \cdot P(D_5) \cdot P(D_6) \cdot P(D_3) + \\
 &+ P(D_1) \cdot P(D_2) \cdot P(D_3) \cdot P(D_4) \cdot P(D_5) \cdot P(D_6) \cdot P(D_3).
 \end{aligned}$$

С обзиром на $[P_i(D_i)]^n = P_i(D_i)$, сређивањем израза добија се:

$$\begin{aligned}
 P(D_I) &= P(D_1) \cdot P(D_2) \cdot P(D_3) + P(D_1) \cdot P(D_4) \cdot P(D_5) + P(D_6) \cdot P(D_3) - \\
 &- P(D_1) \cdot P(D_2) \cdot P(D_3) \cdot P(D_4) \cdot P(D_5) - P(D_1) \cdot P(D_2) \cdot P(D_3) \cdot P(D_6) - \\
 &- P(D_1) \cdot P(D_4) \cdot P(D_5) \cdot P(D_6) \cdot P(D_3) + P(D_1) \cdot P(D_2) \cdot P(D_3) \cdot P(D_4) \cdot P(D_5) \cdot P(D_6).
 \end{aligned}$$

Изједначавањем вероватноће догађаја са поузданошћу, $P(D_I) = R_I$ и $P(D_i) = R_i$ добија се поузданост система I:

$$\begin{aligned}
 R_I &= R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_4 \cdot R_5 + R_6 \cdot R_3 - R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_5 - R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_6 - \\
 &- R_1 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot R_6 + R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot R_6,
 \end{aligned}$$

односно:

$$\begin{aligned}
 R_I(t) &= e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot e^{-\lambda_3 t} + e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_4 t} \cdot e^{-\lambda_5 t} + e^{-\lambda_6 t} \cdot e^{-\lambda_3 t} - \\
 &- e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot e^{-\lambda_3 t} \cdot e^{-\lambda_4 t} \cdot e^{-\lambda_5 t} - e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot e^{-\lambda_3 t} \cdot e^{-\lambda_6 t} - \\
 &- e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_3 t} \cdot e^{-\lambda_4 t} \cdot e^{-\lambda_5 t} \cdot e^{-\lambda_6 t} + e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot e^{-\lambda_3 t} \cdot e^{-\lambda_4 t} \cdot e^{-\lambda_5 t} \cdot e^{-\lambda_6 t} \\
 R_I(t) &= e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_4 + \lambda_5)t} + e^{-(\lambda_6 + \lambda_3)t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_6)t} - \\
 &- e^{-(\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t}.
 \end{aligned}$$

Подсистем II:

Поузданост подсистема са пасивном паралелном везом се може одредити помоћу Поасонове расподеле у облику:

$$R_{II}(t) = \sum_{k=1}^{n=2} \frac{(\lambda_7 \cdot t)^k}{k!} e^{-\lambda_7 t} = \left[1 + \lambda_7 \cdot t + \frac{(\lambda_7 \cdot t)^2}{2!} \right] \cdot e^{-\lambda_7 t},$$

где је: $n = 2$ – укупан број резервних елемената у систему (укупан број елемената система је $n + 1 = 3$)

Интензитети отказа елемената система су:

$$\lambda_1 = 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1},$$

$$\lambda_2 = 0,45 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1},$$

$$\lambda_3 = 2,63 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1},$$

$$\lambda_4 = 0,88 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1},$$

$$R_5(10000) = 0,95 \Rightarrow R_5(t) = e^{-\lambda_5 t} \Rightarrow \lambda_5 = \frac{\ln R_5(t)}{-t} = \frac{\ln 0,95}{-10000} = 5,129329 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1},$$

$$R_6(8000) = 0,99 \Rightarrow R_6(t) = e^{-\lambda_6 t} \Rightarrow \lambda_6 = \frac{\ln R_6(t)}{-t} = \frac{\ln 0,99}{-8000} = 1,256292 \cdot 10^{-6} \text{ [h}^{-1}\text{]}.$$

Интензитет отказа λ_7 се одређује из израза за средње време у раду подсистема II:

$$t_{sr II} = \int_0^{\infty} R_{II}(t) dt = \int_0^{\infty} \left[1 + \lambda_7 \cdot t + \frac{(\lambda_7 \cdot t)^2}{2!} \right] \cdot e^{-\lambda_7 t} dt =$$

$$= \int_0^{\infty} e^{-\lambda_7 t} dt + \lambda_7 \int_0^{\infty} t \cdot e^{-\lambda_7 t} dt + \frac{\lambda_7^2}{2!} \int_0^{\infty} t^2 \cdot e^{-\lambda_7 t} dt =$$

$$= \frac{1}{\lambda_7} + \lambda_7 \cdot \frac{1}{\lambda_7^2} + \frac{\lambda_7^2}{2!} \cdot \frac{2}{\lambda_7^3} = 15000 \text{ h,}$$

$$\lambda_7 = \frac{3}{15000} = 200 \cdot 10^{-6} \text{ [h}^{-1}\text{]}.$$

Поузданост система, који чине два редно везана подсистема $R_S(t) = R_I(t) \cdot R_{II}(t)$:

$$R_S(t) = [e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_4 + \lambda_5)t} + e^{-(\lambda_6 + \lambda_3)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t}] \cdot \left[1 + \lambda_7 \cdot t + \frac{(\lambda_7 \cdot t)^2}{2!} \right] \cdot e^{-\lambda_7 t} -$$

$$- [e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_6)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t}] \cdot \left[1 + \lambda_7 \cdot t + \frac{(\lambda_7 \cdot t)^2}{2!} \right] \cdot e^{-\lambda_7 t}.$$

Како се задатком тражи поузданост за време $t_{sr}=5000 \text{ h}$, заменом вредности у израз добија се:

$$R_S(5000) = 0,91932.$$

5. ЗАКЉУЧАК

Развој теорије поузданости резултат је великог техничко-технолошког напретка у двадесетом веку. Временом, све сложенији системи преузимају су у аутоматизованим процесима све већи број људских обавеза. Јасно је да су ти системи морали да задовоље одређене критеријуме по питањима исправног рада, експлоатације и одржавања. Дакле, било је потребно дати одговоре на питања квантитативне оцене поузданости једног система (или уређаја), као и на питања како поузданост компоненти и одржавање система утиче на рад истог.

Сваки сложени систем чини већи или мањи број саставних елемената. Што је систем сложенији то су и потребе за његово исправно функционисање разноврсније, дијапазон експлоатације је већи, а режим рада сложенији. Поузданост таквог система се одређује тако што се анализира сваки елемент понаособ. Такође, посебно се анализирају и начини повезивања тих елемената система са становишта обликовања структуре блок-дијаграма.

На основу свега изнетог може се закључити да се највећа поузданост може остварити пасивном паралелном везом, јер у случају једног отказа па и више елемената, систем може несметано да настави са радом. Управо због тога, пасивна паралелна веза се користи за системе који захтевају веома високу поузданост. Најнеповољнији системи су системи са редно везаним елементима, јер до отказа система долази у случају отказа било ког елемента. Код комбиноване везе, већу поузданост имају системи чији су елементи везани редно-паралелно док системи са паралелно-редним везаним елементима имају мању поузданост.

Раздељено резервирање знатно повећава поузданост система, више него опште резервирање. Међутим, раздељено резервирање доводи до усложњавања система, што у општем случају снижава ефекат његове примене. У пракси се често користе мешовити системи резервирања са општим резервирањем појединих ланаца и раздељеним резервирањем најодговорнијих или мање поузданих елемената. За повећање поузданости система, принципи резервирања представљају само један од могућности. У пракси за повећање поузданости машинских система више се користе мере за повећање чврстоће, отпорности на хабање, крутости, стабилности на вибрације, отпорности на топлоту, отпорности на корозију и ерозију и сл.

У систему паралелно везаних елемената постоје елементи који су означени као олакшана резерва. Ови резервни елементи до момента пуног укључења у рад се налазе под олакшаним режимом рада, тако да је вероватноћа њиховог отказа у том периоду веома мала. У реалним системима код паралелних веза елемената треба да се узме у обзир и поузданост самог уређаја за укључење резервног елемента. Сем тога, елемент који откаже пошто се замени резервним одлази на ремонт, после чега се поново укључује као резервни елемент, што се такође може узети у обзир. Према томе, системи укључивања резервних елемената могу бити доста сложени, па је овом проблему посвећена обимна литература.

Поузданост система је условљена:

- квалитетом обраде и монтаже,
- међусобном условљеношћу делова система,
- погодношћу и поступцима одржавања система,
- начином структурирања елемената у систему и степеном сложености структуре система,
- интензитетом отказа елемената и система у времену.

Специјали поступци за повећање поузданости су:

- метода заштите (уграђују се додатни елементи који нису походни, али који својим деловањем спречавају настајање већих штета),
- метода сниженог оптерећења елемената,
- метода редундације (уводи се већи број елемената, како би ти елементи у случају отказа преузели функцију компоненте у отказу).

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бекер И., Ивановић Г., Станивуковић Д.: Поузданост техничких система, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2010.
- [2] Вујановић Н.: Теорија поузданости техничких система, Војноиздавачки новински центар, Београд, 1990.
- [3] Милчић Д.: Поузданост машинских система, Машински факултет, Ниш, 2005.
- [4] Зеленовић Д., Тодоровић Ј.: Ефективност система у машинству, Научна књига, Београд, 1990.
- [5] <http://nobel.etf.bg.ac.rs/studiranje/kursevi/of4ps/materijali/pouzdanost.pdf>, август 2014.
- [6] Јовичић С.: Основи поузданости машинских конструкција, Београд, 1990.
- [7] <http://bs.scribd.com/doc/13402355/Zbirka-Zadataka-Iz-Pouzdanosti>, август 2014.