

**PRORAČUN POUZDANOSTI KARAKTERISTIČNOG RASHLADNOG  
SISTEMA METODOM KONSTRUISANJA STABLA OTKAZA  
CALCULATION OF RELIABILITY OF TYPICAL COOLING SYSTEM BY  
DESIGNING OF TREE FAILURE METHOD**

B. Pejović<sup>1</sup>, D. Vujadinović<sup>1</sup>, M. Perušić<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Tehnološki fakultet Zvornik

*Izvod*

*U uvodnom delu rada, date su definicije i relacije za određivanje pouzdanosti i verovatnoće otkaza tehničkog sistema. Nakon toga za analizu i proračun pouzdanosti, predložena je metoda zasnovana na konstruisanju stabla otkaza u obliku logičke strukture. U drugom delu rada izvršena je verifikacija postavljenog modela na primeru karakterističnog rashladnog sistema. Pri ovome za neželjeni događaj je uzet gubitak minimalno potrebnog toka rashladne tečnosti u razmjenjivaču toplote. Na bazi stabla otkaza, u opštem slučaju analitički je određena verovatnoća neželjenog događaja, odnosno pouzdanost. Na kraju rada, ocena verovatnoće otkaza, izvršena je na bazi procena težina i-tih događaja, koristeći karakteristično kolo.*

**Ključne reči:** *Rashladni sistem, gubitak toka, logičke strukture i relacije, pouzdanost i otkaz sistema, stablo otkaza, verovatnoća događaja, modifikovana težina.*

*Abstract*

*In the introductory part we give definitions and relationships to determine the reliability and probability of failure of technical systems. After that, the analysis and calculation of reliability, we proposed method, based on the construction of tree failure in the form of logical structure. The second part was performed to verify the model set on an example of typical cooling system. During this side of event for the loss has taken the minimum required flow of cooling fluid in heat exchanger. On the basis of tree failure in the general analysis is determined by the probability of adverse events, and reliability. At the end of the paper, the estimation of probability of failure, made the estimate, based on weight of *i* - event, using a typical circuit.*

**Key words:** *cooling system, loss of flow, logical structure and reactions, reliability and system failure, tree failure, the probability of an event, a modified weight.*

## 1. UVOD

Pod pouzdanošću, podrazumeva se svosjstvo sistema da radi bez otkaza u određenim uslovima i u određenom periodu vremena.

Verovatnoća rada bez neispravnosti za neko vreme *t* biće:

$$P(t) = \frac{N_d(t)}{N_0} \quad (1)$$

Ovde,  $N_d(t)$  predstavlja broj ispravnih elemenata ili mašina, dok je  $N_0$  broj posmatranih elemenata ili mašina, [1], [2], [3], [4].

Zbir verovatnoće ispravnog rada i verovatnoće pojave otkaza je jednak jedinici:

$$P(t) + R(t) = 1 \quad (2)$$

## 2. METODE ZA PRORAČUN I ANALIZU POUZDANOSTI

### 2.1.1. Metoda stabla otkaza

Analiza stabla otkaza je jedna od osnovnih metoda analize sigurnosti sistema [4], [5], [6]. Najpre se definiše neželjeni događaj, a zatim se analizira uticaj ponašanja pojedinih elemenata sistema na njegovo ponašanje. Analiza se oslanja na dijagramske opise koji simbolički opisuju logičke relacije između događaja. Otkazi su neželjena stanja sistema koji se mogu pojaviti kao rezultat otkaza pojedinih elemenata sistema. Putevi otkaza odnose se na redoslede događaja koji vode do neželjenog događaja. Da bi se razvilo stablo otkaza potrebno je znatno iskustvo. Obično se počinje sa izradom projekata i montažom postrojenja. Pri ovome skupljaju se kako kvalitativne tako i kvantitativne informacije. Metodologija analize stabla otkaza obuhvata, [6], [7]:


- određivanje neželjenog događaja,
- upoznavanje rada sistema koji treba da se analizira,
- konstrukciju stabla otkaza,
- usvajanje stabla otkaza,
- obezbeđenje preporuka i alternativa za donošenje odluka.


Konstruisanje stabla otkaza treba da se odvija prema sledećim upustvima, [7], [8], [9], [10]:

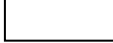
- analitičko stablo treba da bude onoliko jednostavno koliko to dozvoljava složenost sistema,
- stablo treba da bude logično,
- odabrani opisi događaja treba da budu jednostavni, jasni i sažeti,
- sistem numerisanja događaja ispod neželjenog treba da bude jasan i dosledan,
- osnovni događaji u stablu otkaza biraju se tako da budu statistički nezavisni, što je najčešće slučaj u praksi.


Predloženi su mnogi načini kako pristupiti direktno izračunavanju verovatnoće na stablu otkaza. Većina ovih tehnika je primenjena na stablu u relativno jednostavnim sistemima sa manjim brojem događaja i jednostavnim logičkim odnosima, obično za kola I i ILI, [10], [11]. Stavljajući u vezu vrednosti verovatnoće u stablu otkaza, mogu se utvrditi postupci za kontrolu gubitaka u uslovima rizika. Kada su poznati mogućnost gubitaka i verovatnoća da nastane taj gubitak, može se sačiniti poređenje između izdataka da se dozvoli da takva situacija i dalje traje i izdataka da se smanji verovatnoća nastanka neželjenog događaja. Kvantifikovanje ovih događaja, koji sadrži stablo otkaza, traži objektivne odluke, a ne posmatranje na osnovu intuicije.


Najpogodnije je da se koristi standardizovani pristup u konstruisanju stabla i usvojeni logički simboli, [11], [12], [13]. Pri ovome od posebnog interesa su simboli:

ILI kola: 

I kola: 

Opšti događaji ili događaji na izlazu iz kola: 

Bazični događaji: 

Nerazvijeni događaj: 

Ka što je rečeno I kolo proizvodi izlazni događaj samo ukoliko se istovremeno dese svi ulazni događaji, dok ILI kolo proizvodi izlazni događaj ukoliko se desi jedan ili više ulaznih događaja.

### 2.1.2. Karakteristične teoreme verovatnoće, [1], [13], [14]

U najvećem broju slučajeva pri proračunu pouzdanosti tehničkih sistema primenjuju se sledeće dve teoreme:

#### a) Teorema o verovatnoći zbira nesaglasnih događaja

Verovatnoća da nastupi jedan, svezjedno koji od dva događaja A i B, koji se međusobno isključuju, tj. kada pojava jednog istovremeno i isključuje pojavu drugog je:

$$P(A + B) = P(A) + P(B) \quad (3)$$

#### b) Teorema o verovatnoći proizvoda nezavisnih događaja

Verovatnoća zajedničkog nastupanja dva nezavisna događaja A i B, tj. ako pojava jednog od njih ne utiče na verovatnoću pojave drugog je:

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B) \quad (4)$$

Iz prethodne dve teoreme sledi:

- Ako je slučaj sa ILI kolom, verovatnoća nastanka događaja na izlazu je suma verovatnoća na ulazu.
- Verovatnoća da će rezultat biti takav da će se javiti na izlazu I kola je proizvod verovatnoća svih ulaznih događaja.

### 2.1.3. Ocena verovatnoća otkaza na osnovu procena težine i-tih događaja

Osnovu ovde predstavljaju procenjene vrednosti težina događaja „i“ koji ulazi u jedno kolo (pod uslovom da je zbir težina jednak 1) i verovatnoće ovih događaja  $P_i$  u vezi od osnovnog do

neželjenog događaja. Težina svakog događaja u stablu otkaza je odnos koji pokazuje koliko često se svaki događaj pojavi relativno prema nekom drugom događaju u ulazu u isto logičko kolo. Tako se dobija procena pouzdanosti na osnovu malog broja podataka, [2], [7], [10].

Da bi se odredila verovatnoća krajnjeg događaja, pomoću težine, potrebno je izabrati jednostavni ulazni događaj sa poznatom verovatnoćom i povući stazu od tog događaja do neželjenog događaja.

a) *ILI kolo*

Najčešći elementarni slučaj je kada su sva kola na nekoj stazi ILI kola. Tada se sve težine na stazi međusobno pomnože, a zatim se verovatnoća osnovnog događaja podeli ovim rezultatom. Opšti oblik za ovu verovatnoću je:

$$P_T = \frac{P_i}{\prod_i W_i} \quad (5)$$

Ovako određena verovatnoća ima donju vrednost.

Gornja vrednost pouzdanosti može se dobiti koristeći modifikovane težine:

$$W_{im} = \frac{W_i}{1 - \sum_{i < j} W_i \cdot W_j} \quad (6)$$

b) *I kolo*

I kolo zahteva više manipulacije sa težinama, npr. modifikovano I kolo:

$$W_{ia} = \frac{W_i \cdot k_g^{k-1}}{W_1 \cdot W_2 \cdot \dots \cdot W_i \cdot \dots \cdot W_n} \quad (7)$$

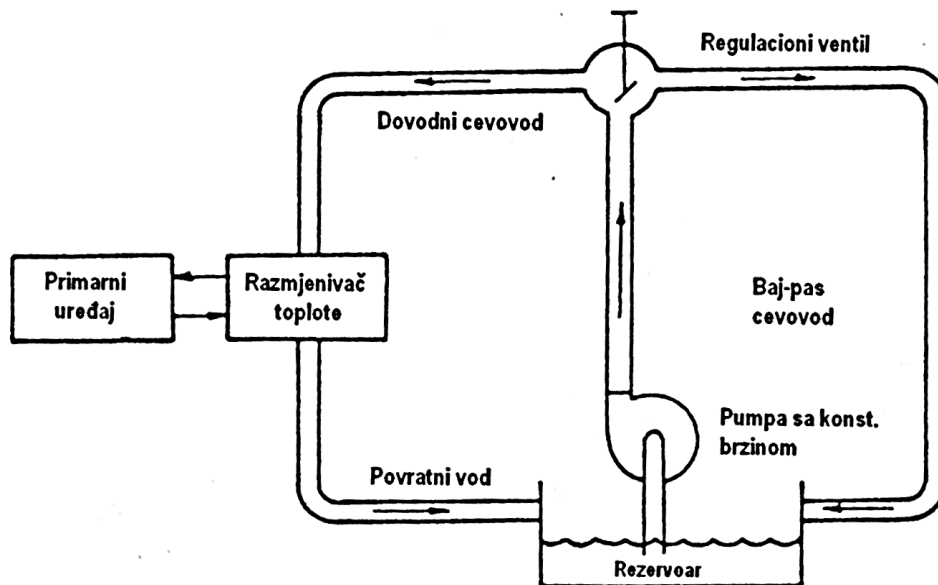
gde je,  $k_g = \frac{W_i}{P_i}$

### 3. PRIMENA METODE KOD RASHLADNOG SISTEMA

Na slici 1. data je šema jednog jednostavnog rashladnog sistema koji se sastoji od:

- pumpe sa konstantnom brzinom,
- izmjenjivača toplote,
- regulacionog ventila (termostata)
- rezervoara i
- cevovoda

Jedna varijanta stabla otkaza ovog sistema konstruisana je na Sl.2. Zadatak sistema je da obezbedi dovoljno hlađenje primarnog uređaja. Kao što se vidi za neželjeni događaj u stablu otkaza usvojen je gubitak minimalno potrebnog toka rashledne tečnosti u razmjenjivaču toplote. Ovo može biti direktna posledica bilo pucanja dovodnog cevovoda u razmjenjivaču toplote, bilo prekida toka iz regulacionog ventila. Shodno tome ovi događaji su sa neželjenim događajem povezani jednim ILI kolom.



Slika 1. Šema karakterističnog rashladnog sistema

Pucanje dovodnog cevovoda u razmenjivaču toplote je osnovni otkaz sistema, a prekid toka iz regulacionog ventila se moradalje razlagati. Tri događaja koji direktno mogu dovesti do gubitka toka povezani su sa tim događajem ILI kola, s obzirom da svaki od njih može dovesti do gubitka toka. Dva ili tri događaja mogu se desiti istovremeno sa istim rezultatom: *prekid toka*. S druge strane sa I kolom morali bi da se svi ulazni događaji dese istovremeno, da bi se pojavio izlazni događaj. Verovatnoća neželjenog događaja, gubitak minimalnog protoka u razmenjivaču toplote jednaka je zbiru verovatnoća (kolo ILI)k prema tabeli T.1. je:

$$P_{TT} = P_{pdv} + P_{npv} \quad (8)$$

Događaj  $TT$ , desiće se kada se desi prskanje dovodnog cevovoda ( $P_{pdv}$ ) ili kada nema protoka od regulacionog ventila ( $P_{npv}$ ). Isto tako za verovatnoću ( $P_{npv}$ ) važiće:

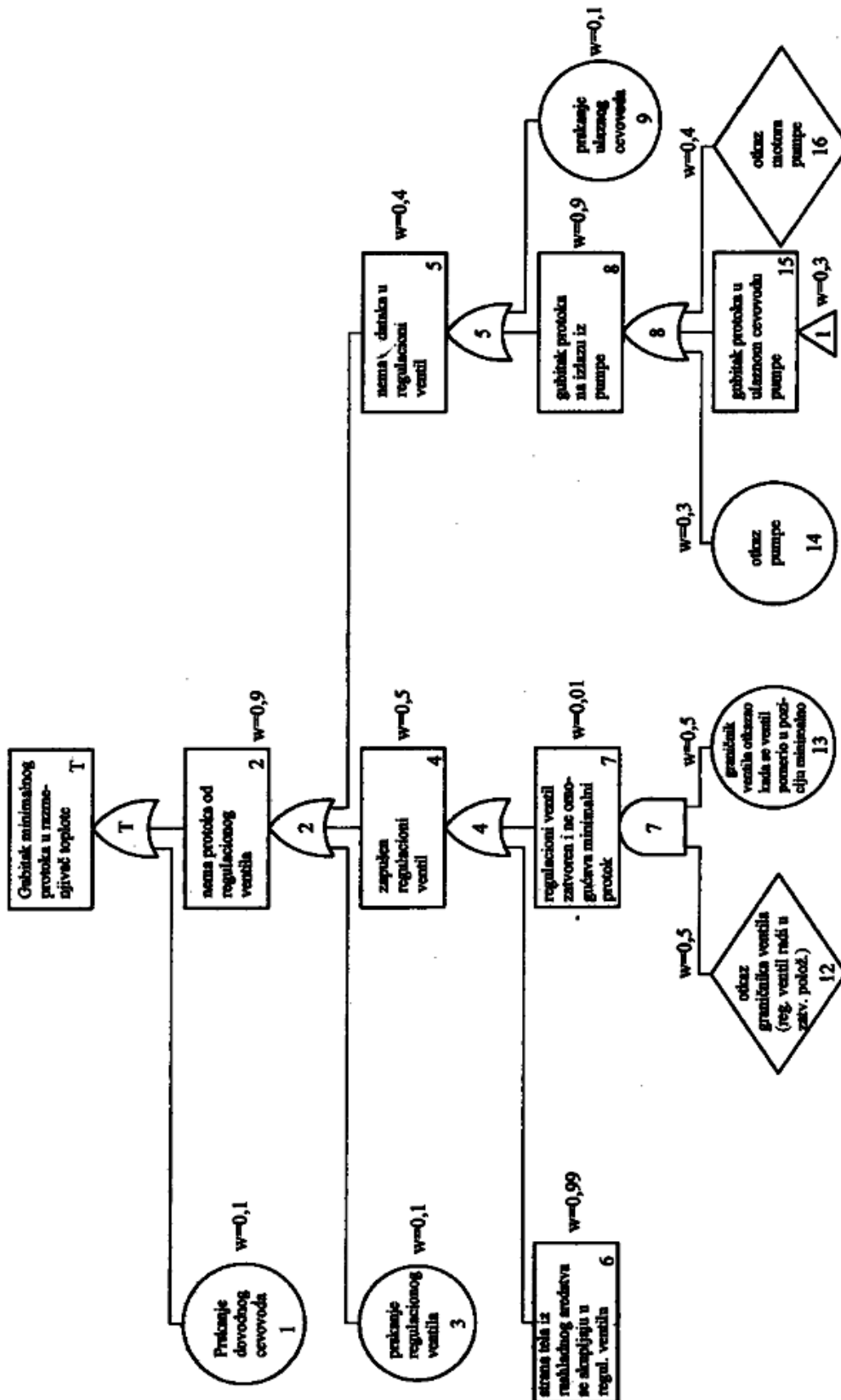
$$P_{npv} = P_{prv} + P_{zrv} + P_{ndv} \quad (9)$$

Protoka od regulacionog ventila neće biti ili zbog prskanja regulacionog ventila ( $P_{prv}$ ) ili zbog zapušenog regulacionog ventila ( $P_{zrv}$ ) ili kada nema dotoka u regulacioni ventil ( $P_{ndv}$ ). Zapušen regulacioni ventil ( $P_{zrv}$ ) biće kada se strana tela iz rashladnog sistema skupljaju u regulacioni ventil ( $P_{stv}$ ) ili kada je regulacioni ventil zatvoren i ne omogućava minimalni protok ( $P_{rvz}$ ):

$$P_{zrv} = P_{stv} + P_{rvz} \quad (10)$$

Regulacioni ventil je zatvoren ( $P_{rvz}$ ) u slučaju da su ispunjena dva događaja istovremeno (kolo I): otkaz graničnika ventila-regulacioni ventila radi u zatvorenom položaju ( $P_{gvz}$ ) i graničnik ventila otkazao kada se ventil pomerio u poziciju minimalno ( $P_{gvm}$ ):

$$P_{rvz} = P_{gvz} \cdot P_{gvm} \quad (11)$$



Sl.2. Konstrukcija stabla otkaza rashladnog sistema

Tabela 1. Oznake i opisi događaja kod rashladnog sistema

Rb.	Oznaka događaja	Opis događaja
1.	$P_{pdv}$	Prskanje dovodnog cevovoda
2.	$P_{prv}$	Prskanje regulacionog ventila
3.	$P_{stv}$	Strana tela iz rashladnog sistema se skupljaju u regulacionom ventilu
4.	$P_{gvz}$	Otkaz graničnika ventila, regulacioni ventil radi u zatvorenom položaju
5.	$P_{gvm}$	Graničnik ventila otkazao kada se ventil pomerio u poziciju minimum
6.	$P_{puc}$	Prskanje ulaznog cevovoda
7.	$P_{op}$	Otkaz pumpe
8.	$P_{gpc}$	Gubitak protoka u ulaznom cevovodu pumpe
9.	$P_{om}$	Otkaz motora pumpe

Nema dotoka u regulacioni ventil ( $P_{ndv}$ ) za slučaj kada se javi gubitak protoka na izlazu iz pumpe ( $P_{gpp}$ ) ili usled prskanja ulaznog cevovoda ( $P_{puc}$ ):

$$P_{ndv} = P_{gpp} + P_{puc} \quad (12)$$

Gubitak protoka na izlazu iz pumpe ( $P_{gpp}$ ) nastaje ili usled otkaza pumpe ( $P_{op}$ ) ili usled gubitka protoka u ulaznom cevovodu pumpe ( $P_{gpc}$ ) ili usled otkaza motora pumpe ( $P_{om}$ ):

$$P_{gpp} = P_{op} + P_{gpc} + P_{om} \quad (13)$$

Zamenom jednačine (9) u (8) biće:

$$P_{TT} = P_{pdv} + (P_{prv} + P_{zrv} + P_{ndv}) \quad (14)$$

Isto tako zamenom jednačine (119 u (10) dobijamo:

$$P_{zrv} = P_{stv} + P_{gvz} \cdot P_{gvm} \quad (15)$$

Zamneom (13) u (12) biće:

$$P_{ndv} = (P_{op} + P_{gpc} + P_{om}) + P_{puc} \quad (16)$$

Konačnu relaciju za verovatnoću neželjenog događaja dobijamo zamenom (15) i (16) u (14):

$$P_{TT} = P_{pdv} + P_{prv} + P_{stv} + P_{gvz} \cdot P_{gvm} + P_{op} + P_{gpc} + P_{om} + P_{puc} \quad (17)$$

Pouzdanost se dobija kao:

$$R_T = 1 - P_T \quad (18)$$

Da bi se relacije (17) i (18) primenile u kvantitativnom smislu, neophodno je poznavati verovatnoće pojedinih događaja, što je detljno razrađeno u literaturi, [13], [14].

U opštem slučaju preko izvedenih relacija moguće je vršiti razne kvalitativne analize (uticaj verovatnoća pojedinih događaja na pouzdanost sistema).

Najjednostavniji slučaj određivanja verovatnoće neželjenog događaja je kada su sva kola na stazi III, relacija (5). Predpostavićemo da smo odredili naprimer verovatnoću događaja 16:  $p_{16}=0,005$ . Proizvod između neželjenog događaja  $T$  i 16 je:

$$\prod_i^{staza} = W_{16} \cdot W_8 \cdot W_5 \cdot W_2 = 0,4 \cdot 0,9 \cdot 0,4 \cdot 0,9 = 0,1296$$

Verovatnoća događaja  $T$  je:

$$P_T = \frac{P_{16}}{\prod_i^{staza} W_i} = \frac{0,005}{0,1296} = 0,03858$$

Pouzdanost će biti:

$$R_T = 1 - P_T = 1 - 0,03858 = 0,96142$$

Tačnije određivanje pouzdanosti možemo izvršiti koristeći modifikovanu težinu po formuli (6). Modifikovana težina događaja 16 iznosi:

$$W_{16m} = \frac{0,4}{1 - (0,3 \cdot 0,3 + 0,3 \cdot 0,4 + 0,3 \cdot 0,4)} = 0,597$$

Istim postupkom mogu se odrediti i modifikovane težine na datoj stazi:

$$W_{8m} = \frac{0,9}{1 - (0,9 \cdot 0,1)} = 0,989$$

$$W_{5m} = \frac{0,4}{1 - (0,4 \cdot 0,5 + 0,4 \cdot 0,1 + 0,5 \cdot 0,1)} = 0,563$$

$$W_{2m} = \frac{0,9}{1 - (0,9 \cdot 0,1)} = 0,989$$

Proizvod modifikovanih težina između događaja  $T$  i 16 je:

$$\prod_i^{staza} = 0,597 \cdot 0,987 \cdot 0,563 \cdot 0,989 = 0,329$$

Verovatnoća događaja  $T$  je:

$$P_T = \frac{0,005}{0,328} = 0,0152$$

Što daje pouzdanost:

$$R_T = 1 - 0,0152 = 0,985$$

Ovo je gornja granica pouzdanosti.

Za slučaj korišćenja I kola po relaciji (7) uzimaju se u obzir događaji koji ulaze u I kolo: (12), (13), prema slici 2, pri čemu mora biti poznata verovatnoća događaja (13).



#### 4. ZAKLJUČAK

Model prikazan u radu baziran na konstrukciji stabla otkaza primenjuje se u mnogim oblastima tehnike. U konkretnom primeru, model je primenjen na jednom karakterističnom rashladnom sistemu iz prakse. Za primenu datog modela, neophodno je potpuno poznavanje sistema koji se analizira, odnosno njegovih sastavnih elemenat, njihovih veza, kao i odgovarajućih tehničko-tehnoloških podataka. Kod praktične primene, posebno treba obratiti pažnju da ne dođe do izostavljanja pojedinih događaja, kao i do netačne logike. Pokazano je da se relativno složeni sistemi mogu opisati jednostavnim simbolima i logičkim relacijama između pojedinih događaja. Sve ovo omogućuje, kako kvalitativnu tako i kvantitativnu analizu posmatranog sistema. Ocena verovatnoće otkaza na bazi procene težina *i-tih* događaja, pokazala se u posmatranom primeru vrlo efikasna, s obzirom da se procena pouzdanosti dobija na osnovu malog broja podataka. Pri projektovanju tehnoloških sistema neophodno je voditi računa o potrebnoj pouzdanosti kao jednom od važnih podataka, s obzirom da danas projektovanje sa stanovišta pouzdanosti nije dovoljno zastupljeno u praksi od strane projektanata. Određivanje pouzdanosti znatno se olakšava za slučaj kada se vodi evidencija o procesu i kada postoji informacioni sistem i baza podataka za proces.

#### LITERATURA

- [1] J. Todorović, D. Zelenović, Efektivnost sistema u mašinstvu, Naučna knjiga, Beograd, 1994.
- [2] D. J. Smith, Reliability engineering, Pitman Publishing, London, 1996.
- [3] A. D. S. Carter, Mechanical reliability, The MacMilan Press Ltd, London, Basing stoke, 1983.
- [4] T. M. Apostol, Mathematical Analysis, Reading, Mass, Addison - Wesley, 1987.
- [5] R. Bellman, Dynamic Programming, Princeton, N. J. Princeton University Press, 1988.
- [6] M. Vujošević, Analiza stabla neispravnosti, Tehnička knjiga, Beograd, 1983.
- [7] R. E. Barlow, F. Proshan, Mathematical theory reliability, Willey, New York, 1984.
- [8] D. Stanivuković, G. Ivanović, Efektivnost tehničkih sistema, Zbirka zadataka FTN, Novi Sad, 1978.
- [9] Y. B. Šor, F. I. Kuzmin, Tablici analiza i kontrolya nadežnosti, Sovetskoe radio, Moskva 1988.
- [10] V. R. Milačić, Informacioni sistem i pouzdanost proizvoda, Mašinski fakultet, Beograd, 1970.
- [11] J. Todorović, Pouzdanost mašinskih sistema, Mašinski fakultet, Beograd, 1977.
- [12] B. Vojnović, Pristupi određivanju efikasnosti tehničkih sistema, IEFTES, Novi Sad, 1975.
- [13] B. Borojević, Metodologija naučnoistraživačkog rada, Naučna knjiga, Beograd, 1992.
- [14] B. Vukadinović, Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike. Privredni pregled, Beograd, 1978.

