

BRANKO B. PEJOVIĆ  
GORAN S. TADIĆ  
MILOVAN B. JOTANOVIĆ  
MILORAD V. TOMIĆ  
VLADAN M. MIČIĆ

Univerzitet u Istočnom Sarajevu,  
Tehnološki fakultet, Zvornik, Bosna  
i Hercegovina

STRUČNI RAD

UDK 66.095.26.001:66.023

DOI: 10.2298/HEMIND091105002P

## JEDAN MODEL ZA ANALIZU I PRORAČUN POUZDANOSTI PRIMENJEN NA PRIMERU IZ HEMIJSKE INDUSTRIJE

*Predmet rada se odnosi na projektovanje pouzdanosti kod procesa polimerizacije koji se odvijaju u reaktorima jedne hemijske industrije. Kroz razvijeni model, određene su karakteristike i pokazatelji pouzdanosti, a time i utvrđeni osnovni faktora koji doprinose lošem odvijanju procesa. S obzirom na mogućnost njihove kontrole, mogu se smanjiti očekivani gubici, i na taj način postići kvalitetnija proizvodnja. Za analizu i proračun pouzdanosti, primenjena je deduktivna metoda zasnovana na konstruisanju šeme stabla otkaza sistema na bazi induktivnog zaključivanja. Pri ovome korišćeni su standardizovani logički simboli, odnosno pravila Bulove algebre i matematičke logike. Rezultati rada kroz kvantitativnu i kvalitativnu analizu pouzdanosti posmatranog procesa, omogućavaju dobijanje potpunih informacija o verovatnoći neželjenog događaja procesa i donošenje objektivnih odluka i alternativnih rešenja.*

Teorija pouzdanosti je nauka koja se bavi izučavanjem otkaza (engl. failure) tehničkih sistema i njihovih sastavnih elemenata.

Pouzdanost (engl. reliability) sa praktičnog stanovišta najpotpunije može da se shvati kao svojstvo sistema da radi bez otkaza u određenim uslovima (režimi rada i okolina) u određenom periodu vremena [1–3].

Opšta relacija za pouzdanost biće [3,4]:

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

gde je  $R_t$  verovatnoća rada bez neispravnosti za neko vreme veće ili jednako  $t$ ,  $N_d(t)$  broj ispravnih elemenata ili mašina, dok je  $N_0$  broj posmatranih elemenata ili mašina.

Za slučaj da je poznata verovatnoća otkaza  $P_t$ , pouzdanost se može odrediti kao:

$$R_t = 1 - P_t \quad (2)$$

Analiza pouzdanosti podrazumeva analiziranje otkaza tehničkih sistema i sastavnih elemenata, kao i svih činilaca koji na određeni način utiču na njihovu pojavu [5,6]. Osnovni aparat koji se koristi za ove analize je teorija verovatnoće, odnosno statistička matematika i druge srodne matematičke discipline, na primer matematička logika.

Na osnovu prethodnog određuju se kvantitativne karakteristike pouzdanosti sistema ili elemenata sistema. Pri ovome neophodno je definisati uslove ispitivanja u kojima sistem treba normalno da funkcioniše, odrediti parametre koji se posmatraju, definisati otkaz, odrediti obim uzorka i način uzorkovanja, definisati slučajne veličine, definisati plan ispitivanja, utvrditi vreme trajanja ispitivanja, odrediti karakteristike pouzdanosti [3–5].

Da bi se prethodno ostvarilo potrebno je da uzorak bude homogen to jest da su svi elementi istog tipa, proizvedeni pod istim uslovima i da se ispitivanje sprovodi u istim uslovima. Za obezbeđivanje potrebnih i dovoljnih podataka za određivanje karakteristika pouzdanosti potrebno je postojanje određenih podataka sa odgovarajućom tehničkom dokumentacijom. Informacije o pouzdanosti neophodne su kako proizvođačima tako i korisnicima tehničkih sistema [5,6].

Pouzdanost kao jedna od bitnih komponenta kvaliteta tehničkih sistema u savremenim uslovima ima značajnu ulogu. Polazeći od ove činjenice danas se teži proizvodnji što pouzdanijih sistema i njihovih elemenata. Da bi se ovo postiglo potrebno je pristupiti pouzdanosti još u razvojnoj fazi, odnosno u fazi projektovanja novog sistema, a u laboratoriji i eksploataciji analizi pouzdanosti. Neophodno je da sistem koji se projektuje poseduje određene, unapred zadate karakteristike i pokazatelje pouzdanosti [3,4,6].

Tehnički sistemi predstavljaju skupove elemenata i relacija između njih i njihovih karakteristika, povezanih međusobno u celinu na način pogodan za vršenje korisnog rada [6,9]. To znači, da je za funkcionisanje sistema, pored kvaliteta elemenata u celini, neophodna određena veza između njih. Svaki složeni sistem objedinjuje veći ili manji broj sastavnih elemenata, te se o njegovoj pouzdanosti može suditi samo ako se analiziraju i analitički obuhvate pouzdanosti svakog detalja ponaosob [3,6].

S ciljem omogućavanja analize, u teoriji pouzdanosti se posebno analiziraju načini povezivanja elemenata sistema sa stanovišta oblikovanja šeme stabla otkaza, na osnovu koje treba izvesti analitičke izraze za izračunavanje pouzdanosti sistema [5,7,8]. Pri oblikovanju šeme stabla otkaza, posebno treba voditi računa o tehnološkom načinu međusobnog povezivanja elemenata sistema radi vršenja određene funkcije i veze ovih elemenata u šemi stabla otkaza.

Osnovni cilj rada je da se kroz razvijeni model pouzdanosti utvrde osnovni faktori koji doprinose lošem odvijanju procesa polimerizacije u reaktorima posmatrane hemijske industrije.

Autor za prepisku: B. Pejović, Tehnološki fakultet, Karakaj, 75400 Zvornik, Bosna i Hercegovina.

E-pošta: b.pejovic@verat.net; vlado21micic@ptt.rs

Rad primljen: 5. novembar 2009.

Rad prihvaćen: 29. decembar 2009.

## STABLO OTKAZA SISTEMA

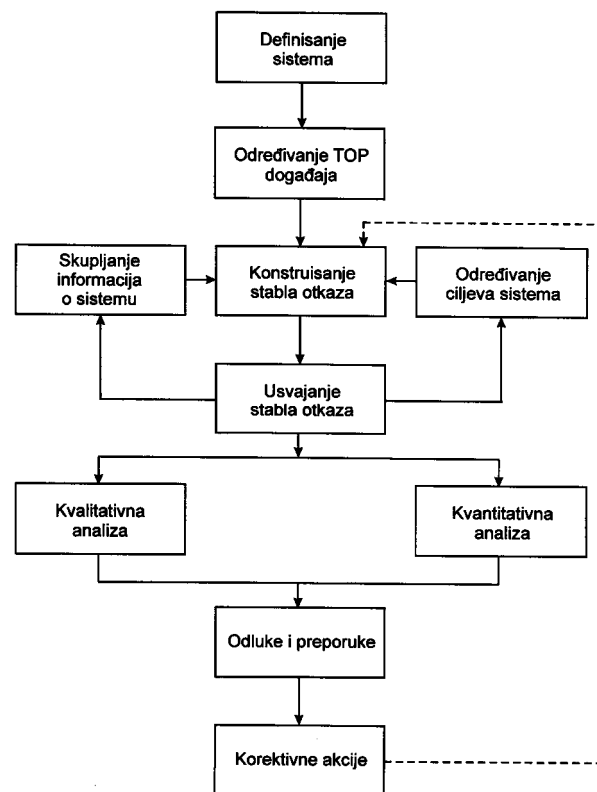
Jedna od osnovnih metoda analize sigurnosti sistema zasniva se na bazi konstruisanja šeme stabla otkaza. Ovdje se na početku definiše neželjeni događaj (engl. "top event") a zatim se analizira uticaj ponašanja pojedinih elemenata sistema na njegovo ponašanje. Analiza se oslanja na dijagramske opise koji simbolično opisuju logičke relacije između događaja [1,4,9]. Neželjeni događaji sistema od kojih se ovde polazi, otkrivaju se induktivnom analizom [10,11]. Otkazi sistema ovde su neželjena stanja sistema koji se mogu pojaviti kao rezultat funkcionalnih otkaza pojedinih elemenata sistema. Analiza počinje kvalitativnim definisanjem neželjenog događaja a potom se ide unazad kroz konfiguraciju sistema kako bi se pronašli otkazi elemenata sistema i proceduralne greške koje mogu dovesti do neželjenog događaja. Odnosi između specifičnih događaja se prikazuju grafički. Isto tako, prati se kako ovi događaji mogu prouzrokovati prethodno naznačen neželjeni događaj, koji se označava u gornjem delu dijagrama. Događaji koji mogu prouzrokovati neželjeni događaj prikazuju se po redosledu. Putevi otkaza odnose se na logičke redoslede događaja koji vode do neželjenog događaja. Treba prilično vremena i iskustva da se pripremi šema stabla otkaza. Obično se počinje sa izradom projekta i montažom postrojenja, a onda se pristupa poboljšanju kako kvalitativne tako i kvantitativne informacije u šemi. Pri ovome pored iskustva neophodno je skupiti i istorijske podatke.

### Metodologija analize stabla otkaza

Metodologija analize otkaza obuhvata [4,6,12] određivanje neželjenog događaja, upoznavanje rada sistema koji treba da se analizira, konstruisanje šeme stabla otkaza, usvajanje stabla otkaza, ocenu strukturne šeme; obezbeđenje preporuka i alternativa za donošenje odluka. Šematski prikaz metodologije analize otkaza sistema prikazan je na slici 1.

Neželjeni događaj je onaj koji se želi sprečiti i koji je od primarnog značaja, a koji predstavlja neželjeni rezultat. Logična i kompletna analiza, može se izvršiti samo potpunim poznavanjem sistema, njegovih sastavnih elemenata i podataka i njihovih međusobnih odnosa. Sve informacije treba da se pribave i ispitaju. Takva dokumenta obuhvataju: šematske crteže, tehnološke šeme postupka, dijagrame, priručnike za rad i održavanje, itd. Prvo se izlaže kako sistem koji se razmatra treba da funkcioniše kada normalno radi. Na osnovu ovog pregleda mogu se nabrojati načini na koje elementi sistema mogu da otkazu čime se dovodi do neželjenog događaja. Vođenje evidencije o nezgodama koje su dovele do slabog učinka u proizvodnji ili neočekivanih prekida rada mogu biti korisne. To je obično prikazano u izveštajima o proizvodnji i održavanju, odnosno u tehničkim izveštajima. Iz ovakvih izveštaja može se dobiti uvid o uz-

roku lošeg funkcionisanja i proizvodnih gubitaka. Prema ovim dokumentima mogu se odrediti vrednosti verovatnoće kod ulaznih događaja što će omogućiti da se izračuna verovatnoća neželjenog događaja. Pri ovome treba biti obazriv kod određivanja vrednosti verovatnoće za slučaj da je otkazao ljudski faktor.



Slika 1. Metodologija analize otkaza.  
Figure 1. Failure analysis methodology.

Nakon što je naznačen neželjeni događaj, sastavlja se analitička šema koristeći logička kola i standardizovane simbole događaja. Mora se ići odgovarajućom logikom da bi se obezbedilo da svi događaji zadovolje potrebne i dovoljne kriterijume. Svaki događaj je bitan za logiku šeme (potreban), a ni jedna druga informacija nije potrebna (dovoljna) da bi se dobio navedeni izlaz. Svi ostali događaji su isključeni kao nebitni ili su dodati osnovnom ili nižem redu. Ovakav postupak dovodi do razvoja šeme otkaza sa Bulovim (Boole) logičkim kolima koje međusobno povezuju događaje koji bi mogli dati navedeni izlaz. Dobijena šema otkaza treba da zadovoljava namenjene svrhe. Funkcionisanje sistema treba da bude potpuno jasno opisano, dok događaji na ulazu u logička kola treba da budu potrebni i dovoljni.

Posle usvajanja šeme stabla otkaza, njeno proučavanje može biti kako kvalitativno tako i kvantitativno. Kvalitativne ocene se odnose na povezivanje puteva sa neželjenim događajem. Ukoliko je potrebno predlažu se promene u sistemu. Pri ovome, ugrađuju se odgova-

rajući rizici kao i primena najefikasnije kontrole za sprečavanje neželjenog događaja. Kvantitativne procene se vrše primenom odgovarajućih statističkih tehnika, da bi se odredila verovatnoća neželjenog događaja pomoću ovih mogućih puteva. Iz dobijenih rezultata, mogu se predložiti razne preporuke i alternativna rešenja korektivne izmene, odluke o kontroli postupka, modifikaciji, popravci i preuzimanju rizika, itd.

Nakon definisanja neželjenog događaja, u sledeći niži red šeme uvrštavaju se oni događaji koji su neophodni za odstranjenje neželjenog događaja. Zatim se po redu svaki od ovih događaja razdvaja na sastavne delove da bi se otkrili oni događaji koji doprinose pojavi neželjenog događaja.

### Princip konstruisanja stabla otkaza

Konstruisanje šeme stabla otkaza očigledno predstavlja deduktivnu analizu sistema (analiza unazad), koja se vrši od opšteg ka posebnom, [12–14]. Da bi se mogla konstruisati strukturalna šema mora se razumeti logička struktura konstrukcije sistema i simboli za njeno sastavljanje. Najpogodnije je da se koristi standardizovani princip konstruisanja strukturalne šeme i usvojeni logički simboli, prema slici 2. Dat je prikaz najvažnijih simbola, ali postoje i drugi koji se ređe koriste.

Pri konstruisanju, najčešće se koriste dve opšte kategorije simbola [7,8,15,16]:

– simboli za događaje, koji izražavaju prirodu događaja;

– simboli za logička kola, koji izražavaju zahteve potrebne za pojavljivanje izlaznog događaja.

Za međusobno povezivanje događaja koji dovode do neželjenog događaja u šemi otkaza koriste se logička kola Bulove algebre. To su logička kola predstavljena logičkim simbolima I i ILI, kao kola koja se u praksi najčešće primenjuju:

a) I kolo – proizvodi izlazni događaj samo ako se istovremeno dese svi ulazni događaji.

b) ILI kolo – proizvodi izlazni događaj ukoliko se desi jedan ili više ulaznih događaja.

Analitička šema otkaza treba da bude onoliko jednostavna koliko to dozvoljava složenost sistema. Izgradnja logičke progresije, vrši se od neželjenog do bazičnih događaja [2,6,17]. Šema stabla otkaza koja se razvija treba da bude logična. Isto tako nije potrebno razvijati neobične događaje čija je vjerovatnoća da se dese vrlo mala [3,6,18]. Izlaz iz šeme stabla otkaza može da bude onoliko dobar koliko su dobri ulazi u šemu [14,19].

Kvantitativna faza nastanka šeme stabla otkaza nastaje ako se za različite događaje obezbede podaci o verovatnoći. Osnovni događaji u stablu se biraju tako da budu statistički nezavisni događaji, tj. da ostvarenje nekog od događaja ne utiče na verovatnoću nastankom drugog događaja. Za kvantitativne proračune koriste se sledeće dve teoreme iz teorije verovatnoće [2,7,20]:

a) teorema verovatnoće zbira nesaglasnih događaja. Verovatnoća da nastupi jedan, svejedno koji od dva događaja A i B koji se međusobno isključuju, tj. kad pojava jednog isključuje istovremeno pojavu drugog, jednaka je zbiru verovatnoća tih događaja:






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

Ako se događaji A i B ne isključuju, biće:

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(AB) \quad (3a)$$

b) teorema verovatnoće proizvoda nezavisnih događaja. Verovatnoća zajedničkog nastupanja dva nezavisna događaja A i B, tj. ako pojava jednog od njih ne utiče na verovatnoću pojave drugog, jednaka je proizvodu verovatnoće svakog od tih događaja:

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

Naziv	Simbol	Opis
Događaj na izlazu iz kapije ili opšti događaj		Događaj koji se javlja kao posledica logičke kombinacije ulaznih događaja koji deluju kroz logičku kapiju.
Bazični događaj		Događaj koji ne zahteva dalje razvijanje. To je nezavisan događaj koji se koristi samo kao ulaz u logičku kapiju.
Nerazvijeni događaj		Događaj koji nije razvijen do sopstvenog uzorka. Razvoj je prekinut zbog nepostojanja raspoloživih informacija ili sredstava ili zbog niskog rizika.
I kapija		Logička kapija koja proizvodi izlaz samo ukoliko se dese svi ulazni događaji. Sadrži identifikacionu reč "I".
ILI kapija		Logička kapija koja proizvodi izlaz ukoliko se desi jedan ili više ulaznih događaja. Sadrži identifikacionu reč "ILI".

Slika 2. Standardizovani logički simboli.

Figure 2. Standardized logical symbols.

Iz prethodne dve teoreme sledi:

– ako je slučaj sa ILI kolom verovatnoća nastanka događaja na izlazu je suma verovatnoća na ulazu.

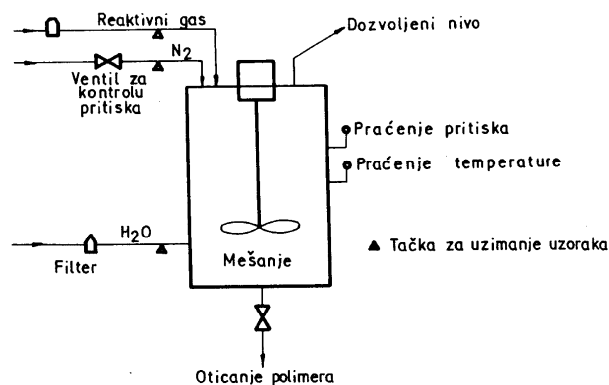
– Verovatnoća da će rezultat biti takav da će se javiti na izlazu I kola je proizvod verovatnoće svih ulaznih događaja.

Prethodna analiza, kao što je rečeno važi samo u slučaju kada se događaji uneti u šemu stabla otkaza uzajamno isključuju, tj. kada jedan ili samo jedan izlaz može nastati jednom jedinom akcijom. U tom slučaju relacije (3) i (4) se mogu direktno primeniti. Kada se događaji ne isključuju uzajamno, mora se napraviti korekcija oduzimanjem verovatnoće  $P(AB)$  prema relaciji (3a). Ova korekcija je obično nevažna jer je njena veličina malog reda.

## VERIFIKACIJA MODELA NA PRAKTIČNOM PRIMERU POLIMERIZACIJE

### Postavka problema

Posmatrana hemijska fabrika ima u pogonu reaktor u kome se obavlja proces polimerizacije prema slici 3. Proizvedeni polimer može imati različite osobine zavisno od promenljivih u procesu. Za svaki primljeni nalog, operativno odeljenje fabrike propisuje vrednosti procesnih promenljivih i količinu reagensnog gasa koji se upotrebljava, tako da se proizvede potrebna količina proizvoda sa osobinama koje kupac zahteva.



Slika 3. Šematski prikaz reakcije polimerizacije.  
Figure 3. Polymerization reaction layout.

Svaka reakcija traje u proseku 3,5 sata, a zatim se reaktor posle svakog punjenja odnosno partije mora čistiti. Pet reaktora tokom posmatranog perioda od oko devet meseci proizvede 6500 partija od kojih određen broj nije ispravan.

Osnovni parametri posmatranog procesa prikazani su detaljno u tabeli 1. Ispitivanje je, s obzirom na neispravne partije, izvršeno pod približno istim proizvedenim uslovima, dok se težilo da posmatrani uzorak bude homogen i dovoljno velik, kako bi se dobili što tačniji rezultati.

Tabela 1. Osnovni parametri za analizu  
Table 1. Prime parameters for analysis

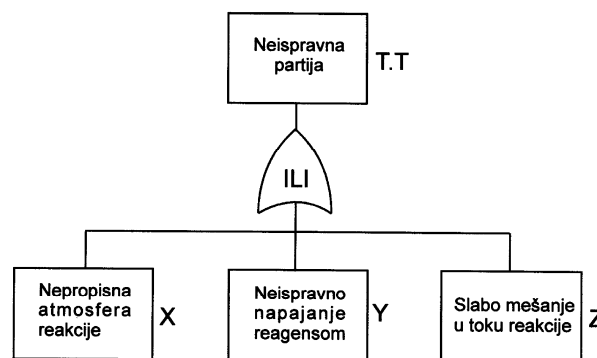
1	Broj reaktora	5
2	Trajanje reakcije, h	3,5
3	Trajanje čišćenja, h	1
4	Posmatrani period, dani	271
5	Ukupan broj partija	6500
6	Broj partija na dan	24
7	Broj neispravnih partija	106
8	Broj ispravnih partija	5394

Neispravne partije utiču, osim na troškove proizvodnje, i na ispunjenje rokova isporuke, s obzirom na to da je svaka upropašćena partija skupa. Na bazi ove činjenice proizašla je i ideja za rad. Poznavanje verovatnoće pojavljivanja različitih događaja omogućilo bi donošenje odluka kojima bi se minimizirali očekivani gubici kao i njihova kontrola, što bi bio glavni cilj ovoga rada.

### Kvalitativna analiza i konstruisanje stabla otkaza

U ovom primjeru ukupan broj otkaza, definisan kao neispravna partija, odnosno neželjeni događaj (TT), dogodiće se: ako je reaktivna sredina neadekvatna (događaj X), ili ako dovod reaktora nije odgovarajući (događaj Y), ili ako mešanje nije dobro (događaj Z). Ova konstatacija je proizišla iz detaljne analize posmatranog procesa.

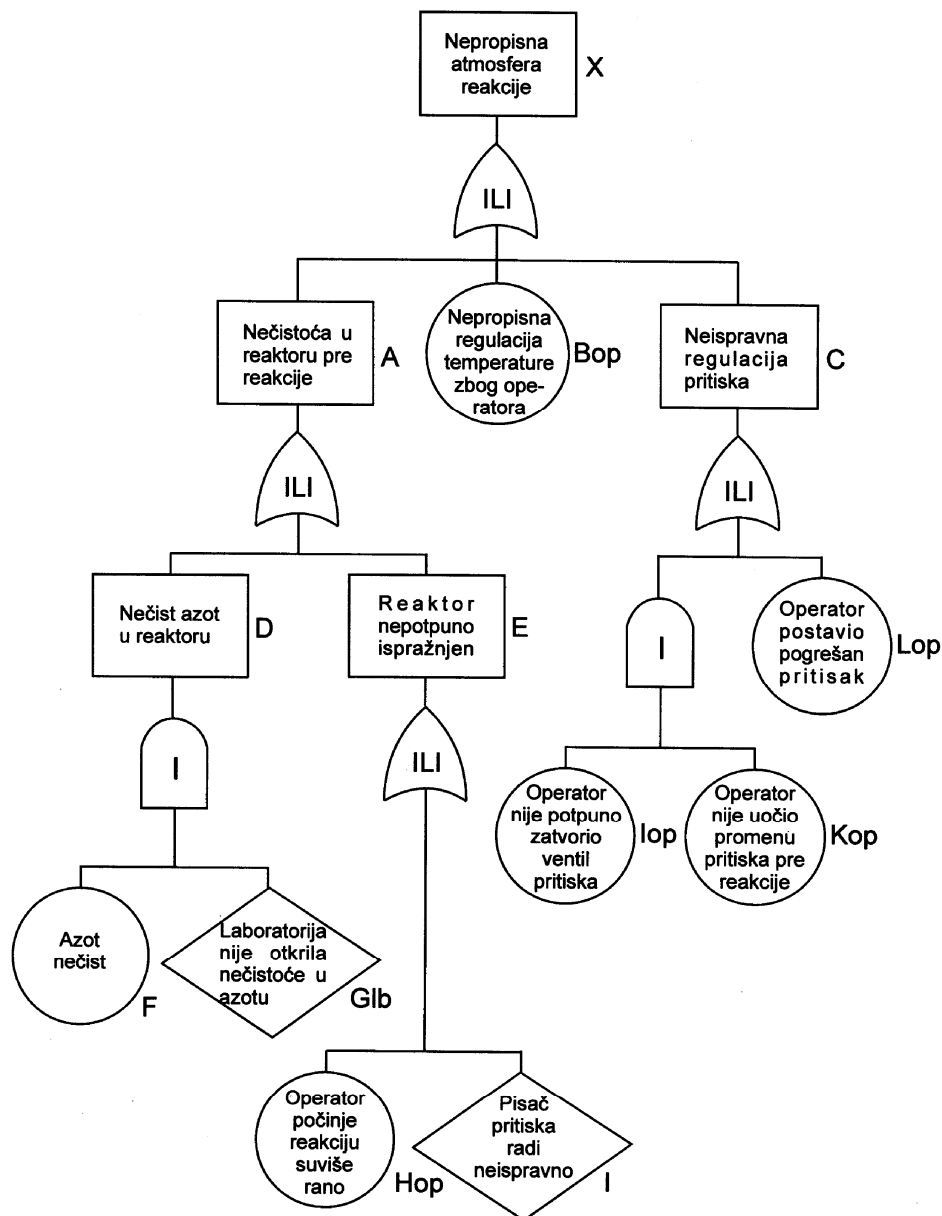
S obzirom na prethodno, na slici 4 je prikazana šema stabla otkaza u osnovnom obliku.



Slika 4. Osnovna šema stabla otkaza za posmatrani primer.  
Figure 4. Prime scheme of fault tree analysis for observational example.

Reaktivna sredina je neadekvatna (X), ili zbog prisustva nečistoća u reaktoru pre početka novog punjenja odnosno reakcije (A), ili zbog lošeg održavanja pritiska (C), što je prikazano na slici 5.

Događaj A je ili posledica nečistoće azota u reaktoru (D) ili zbog toga što reaktor posle prethodne reakcije nije potpuno ispražnjen (E). Događaj D je i posledica nečistog gasa azota (F) i zbog toga što u laboratoriji



Slika 5. Šema stabla otkaza koja se odnosi na nepropisnu atmosferu reakcije.  
Figure 5. Scheme of fault tree analysis for incorrect reaction atmosphere.

nije otkrivena nečistoća gasa azota ( $G_{lb}$ ). Reaktor nije u potpunosti ispražnjen (E) ili zbog toga što je greškom operatora reakcija započeta pre nego što je to potrebno ( $H_{op}$ ) ili zbog toga što je neispravan instrument za kontrolu pritiska (I).

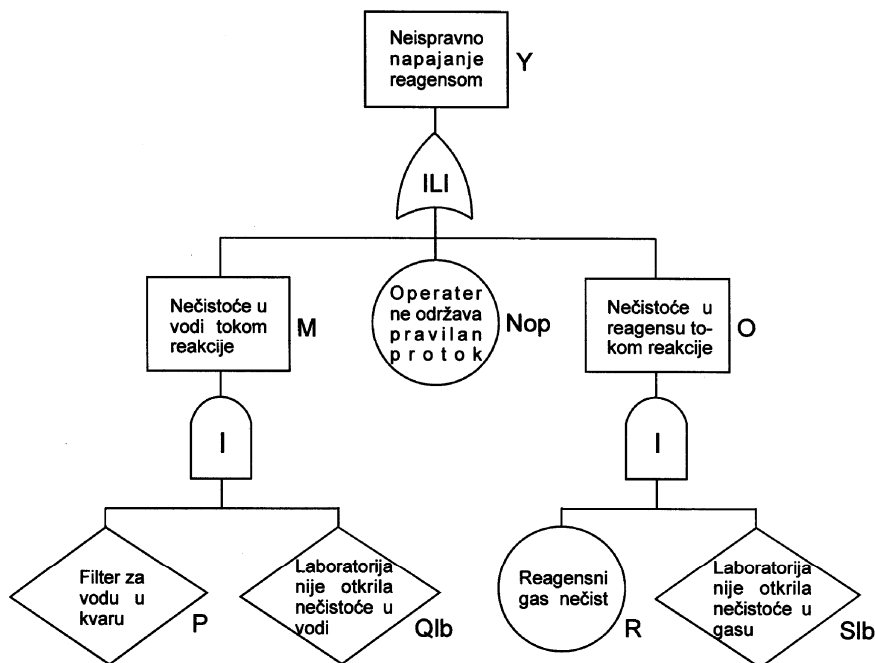
Održavanje pritiska (C) ili je posledica loše podešenog pritiska od strane operatora ( $L_{op}$ ) ili zbog toga što operator nije dobro zatvorio ventil za kontrolu pritiska ( $J_{op}$ ) i nije zapazio promenu pritiska, do koje je došlo pre reakcije ( $K_{op}$ ).

Dovod reaktoru nije odgovarajući (Y) ili zbog prisustva nečistoća u vodi tokom reakcije (M) ili zbog toga što operator ne održava odgovarajući protok ( $N_{op}$ ) ili

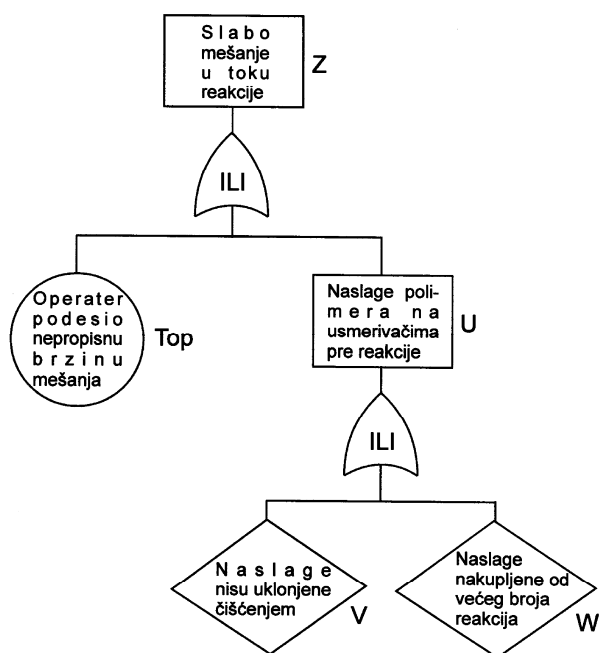
zbog prisustva nečistoća u reaktoru tokom reakcije (O), što je prikazano na slici 6.

Događaj M će se dogoditi i ako se dogodi otkaz filtera za vodu (P) i ako u laboratoriji nije otkriveno prisustvo nečistoća u vodi ( $Q_{lb}$ ). Događaj O će se dogoditi i ako reaktivni gas ima nečistoća (R) i ako u laboratoriji nije otkrivena nečistoća ( $S_{lb}$ ).

Mešanje za vreme reakcije je loše (Z) ili zbog toga što operator nije dobro podesio brzinu mešanja (T) ili zbog toga što se polimer nataložio na zidovima i pregradama usmerivača reaktora (U) što je prikazano na slici 7.



Slika 6. Šema stabla otkaza koja se odnosi na nepropisno napajanje reagensom.  
Figure 6. Scheme of fault tree analysis for incorrect reagents feed.



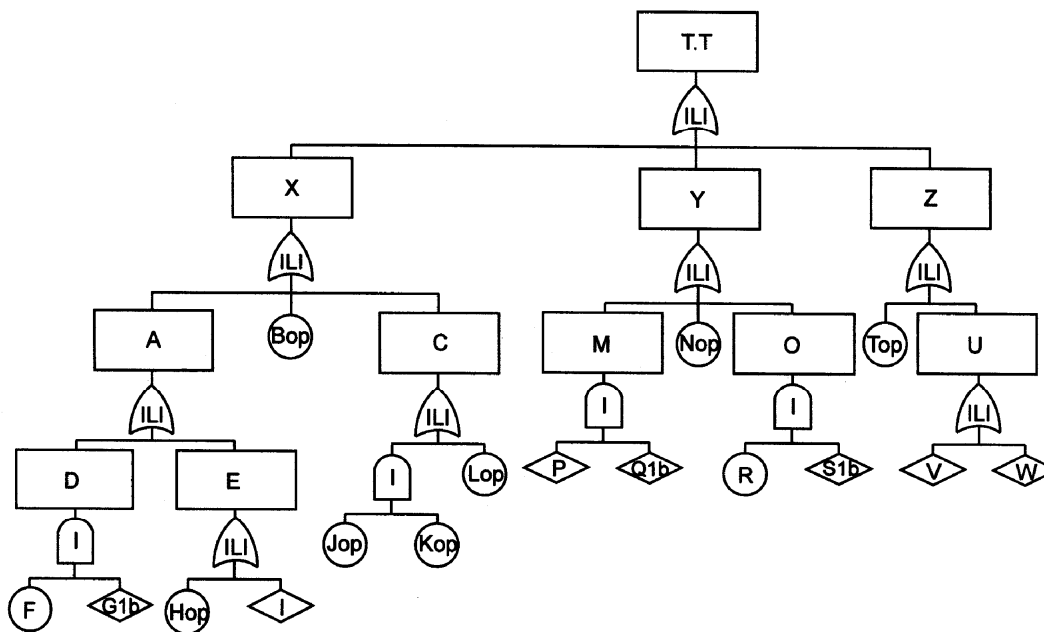
Slika 7. Šema stabla otkaza koja se odnosi slabo mešanje u toku reakcije.  
Figure 7. Scheme of fault tree analysis for low level mixing in the reaction during.

Taloženje (U) dogodiće se ili zbog toga što talog od prethodnog punjenja nije očišćen ili što se talog nakupio od prethodnog punjenja (W).

Očigledno je da otkazi usled uticaja izvan sistema nisu uzeti u razmatranje. Koristeći slike 5–7 konstruisana je kompletna šema stabla otkaza za posmatrani primer polimerizacije, slika 8. Ovo na neki način pred-

stavlja i blok šemu otkaza posmatranog procesa. Ovde treba napomenuti da su moguće i drugačije strukturne šeme od prikazane.

Vidi se da šema stabla otkaza na slici 8 daje potpuni odgovor na pitanje: „Kako je mogao da se desi neželjeni događaj, odnosno neispravna partija.“



Slika 8. Kompletna šema stabla otkaza za posmatrani primer polimerizacije .  
 Figure 8. Complete scheme of fault tree analysis for observational polymerization example.

Kod prethodne analize treba zapaziti da je ILI kolo u blok šemi upotrebljeno uvek kada se desi jedan, odnosno bilo koji od ulaznih događaja, a I kolo kada se istovremeno dešavaju svi ulazni događaji. Isto tako, uvek je korišćen romb kao simbol nerazvijenog događaja, kada god je jasno da dalji razvoj događaja nije opravdan, dok je krug korišćen uvek za događaje kada se ne zahteva dalje razvijanje. Takođe, težilo se da odabrani opisi događaja budu jednostavni, razumljivi i sažeti.

Verovatnoća pojave neželjenog događaja, koji je prouzrokovan događajima X, Y i Z za konstruisanu šemu stabla otkaza (slika 8), biće:

$$P_{TT} = P_X + P_Y + P_Z \tag{5}$$

Navedeni događaji povezuju se logičkim ILI kolom sa tri ulaza. Ovi događaji se dalje analiziraju pošto nisu bazični već posebni. Verovatnoće događaja X biće:

$$P_X = P_A + P_{Bop} + P_C \tag{6}$$

Za događaje A, D, E i C možemo pisati, redom:

$$P_A = P_D + P_E \tag{7}$$

$$P_D = P_F P_{G1b} \tag{8}$$

$$P_E = P_{Hop} + P_I \tag{9}$$

$$P_C = P_{Jop} P_{Kop} + P_{Lop} \tag{10}$$

Za događaj A, prema (7), zamenom (8) i (9) biće:

$$P_A = P_F P_{G1b} + P_{Hop} + P_I \tag{11}$$

Verovatnoću događaja X dobijamo zamenom relacija (10) i (11) u (6):

$$P_X = P_F P_{G1b} + P_{Hop} + P_I + P_{Bop} + P_{Jop} P_{Kop} + P_{Lop} \tag{12}$$

Na sličan način, verovatnoća događaja Y biće:

$$P_Y = P_M + P_O + P_{Nop} \tag{13}$$

Za događaje M i O važi da je:

$$P_M = P_P P_{Q1b} \tag{14}$$

$$P_O = P_R P_{S1b} \tag{15}$$

Zamenom relacija (14) i (15) u (13) dobija se verovatnoća događaja Y:

$$P_Y = P_P P_{Q1b} + P_R P_{S1b} + P_{Nop} \tag{16}$$

Na kraju, za događaj Z biće:

$$P_Z = P_{Top} + P_U \tag{17}$$

Za događaj U važi da je:

$$P_U = P_V + P_W \tag{18}$$

Verovatnoća događaja Z dobija se zamenom (18) u (17):

$$P_Z = P_{Top} + P_V + P_W \tag{19}$$

Očigledno da su kod izvođenja prethodnih relacija korišćeni komutativni, asocijativni i distributivni zakoni

Bulove algebre [7,14,15,21,22]. Sve date relacije, formirane su na bazi teorema (3) i (4).

Zamenom relacija (12), (16) i (19) u (5) dobijamo verovatnoću pojave neželjenog događaja:

$$P_{TT} = P_F P_{Glb} + P_{Hop} + P_I + P_{Bop} + P_{Jop} P_{Kop} + P_{Lop} + P_P P_{Qlb} + P_R P_{Sib} + P_{Nop} + P_{Top} + P_V + P_W \quad (20)$$

Relacija (20) predstavlja konačnu funkciju pouzdanosti posmatranog reaktora, kao tehnološkog sistema u zavisnosti od ulaznih događaja. Ista sadrži sve ulazne događaje sadržane u tabeli 2 (kojih ima ukupno šesnaest), i pogodna je kako za kvalitativnu tako i za kvantitativnu analizu, s obzirom da je formirana na bazi Bulovih promenljivih.

### Kvantitativni proračuni karakteristika pouzdanosti

Kvantitativni proračuni se vrše na osnovu tabele 2, gde su za određene događaje iz posmatranog procesa izračunate njihove verovatnoće prema broju neispravnih partija, a na bazi ukupnog broja partija, odnosno primenom statističke analize.

Verovatnoće događaja koji se odnosi na neadekvatnu reakcionu sredinu, prema (12), biće:

$$P_X = 0,001846 \cdot 0,000615 + 0,000462 + 0,000462 + 0,000923 + 0,000615 \cdot 0,000769 + 0,000462 = 0,002310608$$

Na isti način, verovatnoća događaja koji se odnosi na neodgovarajući dovod reaktoru, prema (16), biće:

$$P_Y = 0,00108 \cdot 0,000462 + 0,002154 \cdot 0,000462 + 0,00108 = 0,001081494$$

Na kraju, verovatnoća događaja koji se odnosi na nepropisno mešanje, prema (19), biće:

$$P_Z = 0,000769 + 0,001077 + 0,003071 = 0,004923$$

Greške od strane operatera, mogu se prikazati prema (20) kao:

$$P_{op} = P_{Hop} + P_{Bop} + P_{Jop} P_{Kop} + P_{Lop} + P_{Nop} + P_{Top} \quad (21)$$

$$P_{op} = 0,0005 + 0,0009 + 0,0006 \cdot 0,0007 + 0,0004 + 0,0010 + 0,0008 = 0,00360042$$

Nepropisno čišćenje reaktora posle reakcije, može se prikazati s obzirom na (20) kao:

$$P_U = P_V + P_W = 0,001077 + 0,003077 = 0,004154 \quad (22)$$

Verovatnoće pojave neželjenog događaja, prema (20), biće:

$$P_{TT} = 0,001846 \cdot 0,000615 + 0,000462 + 0,000462 + 0,000923 + 0,000615 \cdot 0,000769 + 0,000462 + 0,00108 \cdot 0,000462 + 0,002154 \cdot 0,000462 + 0,00108 + 0,000769 + 0,001077 + 0,003077 = 0,0083151$$

što prema (2) daje pouzdanost:

$$R_T = 1 - P_{TT} = 1 - 0,0083151 = 0,9916849$$

Iako je dobijena relativno visoka pouzdanost, neispravne partije znatno povećavaju troškove proizvodnje, što znači da treba težiti većoj pouzdanosti od izračunate. Zapaža se da manja verovatnoća neželjenog događaja dovodi do veće pouzdanosti sistema i obrnuto.

Tabela 2. Verovatnoće događaja tehnološkog sistema  
Table 2. Event probability of technological system

Red. br.	Oznaka događaja	Ukupan broj partija	Broj neispravnih partija	Verovatnoća	Opis događaja
1	$B_{op}$	6500	6	0,000923	Nepropisna regulacija temperature
2	$F$	6500	12	0,001846	Azot nije čist
3	$G_{lb}$	6500	4	0,000615	Nisu otkrivene nečistoće u azotu
4	$H_{op}$	6500	3	0,000462	Reakcija počela suviše rano
5	$I$	6500	3	0,000462	Pisač pritiska neispravan
6	$J_{op}$	6500	4	0,000615	Ventil pritiska nije potpuno zatvoren
7	$K_{op}$	6500	5	0,000769	Nije uočena promena pritiska pre reakcije
8	$L_{op}$	6500	3	0,000462	Postavljen pogrešan pritisak
9	$N_{op}$	6500	7	0,00108	Ne održava se pravilan protok
10	$P$	6500	7	0,00108	Filteri za vodu u kvaru
11	$Q_{lb}$	6500	3	0,000462	Nisu otkrivene nečistoće u vodi
12	$R$	6500	14	0,002154	Reagensni gas nije čist
13	$S_{lb}$	6500	3	0,000462	Nisu otkrivene nečistoće u gasu
14	$T_{op}$	6500	5	0,000769	Podešena nepropisna brzina mešanja
15	$V$	6500	7	0,001077	Naslage nisu uklonjene čišćenjem
16	$W$	6500	20	0,003077	Naslage nakupljene od većeg broja reakcija



## ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA

Analizom konačnog izraza (20) odnosno (21) i (22), može se uočiti da su osnovni faktori koji doprinose lošoj proizvodnji nepropisno čišćenje reaktora posle reakcije ( $P_V$ ) i određen broj grešaka od strane operatera ( $P_{op}$ ). Isto tako gubici vezani za laboratoriju nisu relativno visoki.

Na osnovu ovoga može se zaključiti da će najveće smanjenje verovatnoće pojavljivanja neželjenog događaja biti postignuto ulaganjem u bolje sisteme za čišćenje reaktora odnosno u opremu za automatsku kontrolu procesa, što bi uticalo na povećanje pouzdanosti sistema.

## ZAKLJUČAK

Prikazani model u radu, baziran na konstrukciji šeme stabla otkaza, primenjuje se u mnogim oblastima tehnike. Na konkretnom primeru iz prakse, pokazano je da se isti može efikasno primeniti i u oblasti hemijske tehnologije.

Za primenu datog modela dobijenog na bazi dedukcije, neophodno je potpuno poznavanje sistema koji se analizira, odnosno njegovih sastavnih elemenata, njihovih tehnoloških veza, kao i odgovarajućih podataka.

Stablo otkaza se konstruiše u obliku logičke progresije, na bazi poznavanja komponenti sistema i induktivnog zaključivanja.

Kod praktične primene modela posebno treba obratiti pažnju da ne dođe do izostavljanja pojedinih događaja kao i do netačne logike. Pri ovome, kod praktičnih primera iz hemijske industrije, skoro uvek se posmatraju statistički nezavisni događaji.

U radu je pokazano da se složeni tehnološki procesi mogu opisati jednostavnim simbolima i logičkim relacijama između pojedinih događaja, što znatno olakšava primenu u praksi, posebno za slučaj minimiziranja, analize i kontrole gubitaka u sistemu.

Dati model na neki način predstavlja pregledno sredenu analitičku šemu pouzdanosti gde je prethodno data sistematizacija razmišljanja o celokupnom procesu na jednom mestu što olakšava primenu u inženjerskoj praksi. Ovo se posebno odnosi na logičke i kompleksne analize, kako kvalitativne tako i kvantitativne, odnosno dobijanje kompletnih informacija o stanju procesa. Informacija o ukupnoj verovatnoći neželjenog događaja, odnosno funkciji pouzdanosti sistema, dobija se pomoću svih mogućih puteva i verovatnoće svakog detalja.

U odnosu na druge modele koje se u teoriji i praksi primenjuju za rešavanje date problematike, očigledna je prednost primene Bulove algebre i njenih zakona, gde se opisivanje i povezivanje mogućih događaja odnosno logičkih odnosa izvodi logičkim kolima I i II, odnosno standardizovanim simbolima, i na kraju logičkim rela-

cijama. Pri ovome mora se razumeti logička struktura konstrukcije posmatranog sistema.

Pri projektovanju tehnoloških sistema i procesa 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 projekatana.

Prikazani model omogućuje donošenje objektivnih odluka čime se izbegava prosuđivanje na osnovu intuicije koje je ponekad neopravdano prisustvo u praksi. Isto tako utvrđuju se osnovni faktori koji doprinose lošoj proizvodnji, odnosno alternativna rešenja, što može takođe imati praktičan značaj.

Data šema stabla otkaza je pogodna za automatizovanu analizu primenom odgovarajućeg algoritma i računarskog programa, što je posebno važno kod složenih tehnoloških procesa. Prikazani model može efikasno poslužiti kao podloga za analizu pouzdanosti kod mnogih procesa u hemijskoj industriji, kako u periodu eksploatacije tako i u fazi projektovanja. Glavni razlog za ovo je što se ovde redovno vodi detaljna evidencija o procesu dok često postoji informacioni sistem, kao i baza podataka za proces, što olakšava prikupljanje neophodnih podataka, potrebnih za projektovanje pouzdanosti.

## LITERATURA

- [1] E. Kozlov, I. Ushakov, Sprovochnik po raschete nadezhnosti, Sovetskoe radio, Moskva, 1985.
- [2] B.V. Gnedenko, Y.K. Belyaev, Matematicheskie metodi v teorii nadezhnosti, Nauka, Moskva, 1984.
- [3] G.H. Sandler, System Reliability Engineering, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1983.
- [4] A.G. Green, A.J. Bourne, Reliability Technology, John Wiley, New York, 1988.
- [5] K.C. Kapur, L.R. Lamberson, Reliability Engineering Design, John Willey, New York, 1989.
- [6] D. Zelenović, D. Stanivuković, Pouzdanost sistema, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1979.
- [7] S. Vukadinović, Zbirka rešenih zadataka iz teorije verovatnoće, Privredni pregled, Beograd, 1995.
- [8] F.C. Tompkins, A Methodology for Failure Analysis in Chemical Processing Systems, D.S. Diss, MIT, Cambridge, 1984.
- [9] J. Todorović, D. Zelenović, Efektivnost sistema u mašinstvu, Naučna knjiga, Beograd, 1994.
- [10] D.J. Smith, Reliability Engineering, Pitman Publishing, London, 1996.
- [11] A.D.S. Carter, Mechanical Reliability, Macmilan Press Ltd, London, 1983.
- [12] T.M. Apostol, Mathematical Analysis, Addison-Wesley, Reading, Mass, 1987.
- [13] R. Bellman, Dynamic Programming, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1988.
- [14] M. Vujošević, Analiza stabla neispravnosti, Tehnička knjiga, Beograd, 1983.

- [15] R.E. Barlow, F. Proshan, *Mathematical Theory Reliability*, John Willey, New York, 1984.
- [16] D. Stanivuković, G. Ivanović, *Efektivnost tehničkih sistema*, Zbirka zadataka, FTN, Novi Sad, 1978.
- [17] Y.B. Shor, F.I. Kuzmin, *Tablici analiza i kontrolya nadezhnosti*, Sovetskoe radio, Moskva, 1988.
- [18] V.R. Milačić, *Informacioni sistem i pouzdanost proizvoda*, Mašinski fakultet, Beograd, 1970.
- [19] J. Todorović, *Pouzdanost mašinskih sistema*, Mašinski fakultet, Beograd, 1977.
- [20] B. Vojnović, *Pristupi određivanju efikasnosti tehničkih sistema*, IEFTES, Novi Sad, 1975.
- [21] B. Borojević, *Metodologija naučnoistraživačkog rada*, Naučna knjiga, Beograd, 1992.
- [22] B. Vukadinović, *Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike*, Privredni pregled, Beograd, 1978.

## SUMMARY

### A MODEL FOR RELIABILITY ANALYSIS AND CALCULATION APPLIED IN AN EXAMPLE FROM CHEMICAL INDUSTRY

Branko B. Pejović, Goran S. Tadić, Milovan B. Jotanović, Milorad V. Tomić, Vladan M. Mičić

University of East Sarajevo, Faculty of Technology, Zvornik, Bosnia and Herzegovina

(Professional paper)

The subject of this paper is reliability design in polymerization processes that occur in industrial chemical reactors. The designed model is used to determine the characteristics and indicators of reliability, which enables the determination of basic factors that result in a poor development of a process. This would reduce the anticipated losses through the ability to control them, as well as enabling the improvement of the quality of production, which is the major goal of the paper. The reliability analysis and calculation uses a deductive method based on designing a scheme for fault tree analysis of a system based on inductive conclusions. It involves the use of standard logical symbols and rules of Boolean algebra and mathematical logic. The paper eventually gives the results of the work in the form of quantitative and qualitative reliability analysis of the observed process, which serves to obtain complete information on the probability of top event in the process, as well as objective decision making and alternative solutions.

Ključne reči: Projektovanje pouzdanosti • Reakcija polimerizacije • Otkaz reaktora • Logičke strukture i relacije • stablo otkaza

Key words: Reliability design • Polymerization reaction • Failure of reactor • Logical structures and relations • Fault tree analysis