Dr Rade Stanković,
potpukovnik, dipl. inž.
Vojnotehnička akademija VJ,
Beograd

OCENA KVANTITATIVNIH POKAZATELJA POUZDANOSTI TEHNIČKIH SISTEMA METODOM STABLA OTKAZA

UDC: 62-1.001.572:681.5.01

Rezime:

U radu su prikazane procedure i softver za konstrukciju stabla otkaza metodom tabela rešenja, i za kvantitativnu analizu kojom se mogu oceniti pokazatelji pouzdanosti tehničkih sistema, kao što su: asimptotska raspoloživost, asimptotska neraspoloživost, intenzitet otkaza, parametar potoka otkaza, značajnost elemenata i havarijskih kombinacija, itd.

Ključne reči: konstrukcija stabla otkaza, metoda tabela rešenja, kvantitativna analiza, pokazatelji pouzdanosti, tehnički sistemi, softver.

ESTIMATE OF QUANTITATIVE RELIABILITY PERFORMANCE OF TECHNICAL SYSTEMS BY METHOD OF FAULT TREE

Summary:

The work comprises procedures and software for the construction of fault tree by the method of decision tables and quantitative analysis by which the reliability performance of technical systems can be estimated: asymptotic availability, asymptotic unavailability, failure rate, failure intensity, importance of elements and cut sets, etc.

Key words: construction of fault tree, method of decision tables, quantitative analysis, reliability performance, technical systems, software.

UVOD

Obezbeđenje potrebnih nivoa performansi upotrebnog kvaliteta tehničkih sistema složen je proces koji zahteva izbor i realizaciju niza upravljačkih odluka u svim etapama — od projektovanja i proizvodnje do eksploatacije i održavanja, na osnovu jedinstvene funkcije cilja. Izbor upravljačkih odluka u svim fazama zasniva se, pre svega, na rezultatima istraživanja uzroka i posledica otkaza i kvantifikovanih pokazatelja pouzdanosti sistema. Rezultati ovih analiza omogućuju sistematsko definisanje i dokumentovanje potencijalnog uticaja svakog ot-

kaza (ili svake kombinacije otkaza) elemenata na uspeh misije, bezbednost korisnika i okoline, performanse i sigurnost sredstava, mogućnost havarija elemenata u interakciji, itd. Oni, takođe, čine i osnovu za identifikaciju zahteva za konstruktivne izmene, promene u tehnologiji proizvodnje elemenata, optimizaciju postupaka preventivnog održavanja i korektivnog obnavljanja odnosno traženja svih mogućnosti za minimiziranje verovatnoće pojave otkaza i svih neposrednih i posrednih posledica koje se posle njega javljaju. Precizno definisani pokazatelji pouzdanosti i modeli za njihovu kvantifikaciju daju realne osnove za

uspešno upravljanje procesima kojima se obezbeđuje upotrebnii kvalitet, u skladu sa unapred postavljenim ciljevima i u datim ograničenjima.

Stablo otkaza jedna je od metoda kojom se uspešno može vršiti analiza uzroka i posledica otkaza, kao i kvantitativna analiza pokazatelja pouzdanosti na svim nivoima hijerarhijske strukture tehničkog sistema. U ovom radu prikazana je procedura i softver za konstrukciju stabla otkaza i ocenu pokazatelja, kao što su raspoloživost, verovatnoća bezotkaznog rada, očekivani broj otkaza, intenzitet otkaza, značajnost osnovnih događaja ili havarijskih kombinacija, itd.

Procedura ocene kvantitativnih pokazatelja sastoji se od sledećih koraka: 1 — konstrukcija stabla otkaza, 2 — verifikacija hipoteza o raspodelama vremena rada do otkaza i vremena održavanja osnovnih elemenata tehničkih sistema (na osnovu tehničko-tehnološke dokumentacije proizvođača i informacija sa dodatnih ispitivanja, procesa eksploatacije, i sl.), 3 — kvantitativna analiza stabla otkaza i 4 — analiza dobijenih rezultata.

Konstrukcija stabla otkaza metodom tabela rešenja

Stablo otkaza predstavlja logički dijagram kojim se opisuju događaji i uslovi koji prouzrokuju pojavu vršnog događaja, a to je otkaz sistema. Koristi se za određivanje uzročnih veza koje dovode do datog opasnog (havarijskog) stanja sistema. To stanje je konačni (top event) događaj stabla otkaza. Složeniji sistemi mogu imati mnogo različitih konačnih događaja, a time i odgovarajućih stabala otkaza. Metoda »tabela rešenja« (decision tables) jedan je od prilaza kojim se pokušao prevazići dotadašnji heuristički način konstrukcije stabla otkaza, koji je zavisio od sposobnosti ljudi da razumeju suštinu procesa i razrade događaje koji odgovaraju različitim stanjima sistema, kao i da se skрати vreme

konstrukcije stabla koje je za složenije sisteme bilo nedopustivo dugo [1]. Pored toga što navedena metoda omogućuje automatizovanu sintezu stabla otkaza, ona ima i niz prednosti u odnosu na ranije, a osnovne su:

— omogućuje prikazivanje većeg broja stanja na ulazu, kada se smatra da je povećanje složenosti u datom slučaju opravdano. Dakle, pored dva binarna stanja »u otkazu« i »u radu«, pomoću ove metode moguće je prikazati i druga stanja od interesa za istraživanja, kao što su npr. stanja pritiska u nekom dovodu: »normalan pritisak«, »delimično smanjen pritisak«, »delimično povećan pritisak«, »nema pritiska«, i sl. Tako se »unutrašnji režim rada« ili »stanje elementa« može razmatrati i u funkciji različitih ulaza iz okruženja;

— omogućuje relativno jednostavno prikazivanje vremena i redosleda pojava događaja kod sistema koji imaju petlju regulisanja.

Stablo otkaza omogućuje više ulaza za svaki element, ali samo jedan izlaz. Na primer, jedan parametar ulaza može biti pritisak medijuma, drugi temperatura tog medijuma, itd. Svaki od parametara ulaza može imati više stanja. Ako je nužno prikazati element sa više izlaza, može se fiktivno uvesti dopunski element za svaki izlaz.

Za svaki element izrađuje se posebna tabela rešenja. Ona opisuje kako svaka kombinacija ulaznih događaja utiče na izlazni događaj, odnosno na stanje elementa. Povezani elementi definišu ponašanje sistema i njegovu šemu. Šema se dobija povezivanjem izlaza svakog elementa s odgovarajućim ulazom drugog elementa.

Stablo otkaza sistema, konstruisano pomoću tabela rešenja, najčešće sadrži uzajamno isključujuće događaje i radna stanja elemenata. Složeniji sistemi mogu imati ogroman broj (i stotine hiljada) oblika otkaza. Zbog toga je nužno naći takve *osnovne oblike* otkaza, koji, kada se realizuju, sigurno uzrokuju i pojavu otkaza sistema. Za

nalaženje osnovnih oblika otkaza koristi se princip *minimalnih havarijskih kombinacija*. Havarijskom kombinacijom smatra se skup svih početnih događaja, koji, kada se realizuju, garantovano prouzrokuju i realizaciju konačnog događaja (međutim, s obzirom na to da ona najčešće uključuje neke druge havarijske kombinacije i posle isključivanja početnih događaja, moguća je realizacija konačnog događaja). Nasuprot tome, *prohodna kombinacija* je skup početnih događaja koji garantuju da se konačni događaj neće realizovati ako se ne realizuje nijedan od tih događaja. *Minimalna havarijska kombinacija* je kombinacija u kojoj, posle isključenja bilo kog početnog događaja, preostali događaji više ne čine havarijsku kombinaciju. *Minimalna prohodna kombinacija* je takav skup kombinacija koji nije više prohodan ako se iz njega izbací bilo koji od početnih događaja.

Princip minimalnih havarijskih kombinacija omogućuje skraćivanje broja havarijskih kombinacija i broja početnih događaja u havarijskim kombinacijama. To se postiže izbacivanjem svih havarijskih kombinacija koje se međusobno sadrže. Na taj način znatno se uprošćava proces analize.

Za dobijanje svih minimalnih havarijskih kombinacija koristi se *metoda usaglašavanja*. Pomoću nje vrši se uprošćavanje tabela za svaki element, formiranje novih grupa od grupa elemenata, uz kombinovanje i prilagođavanje njihovih izlaznih događaja, tako da se na kraju dobija *konačna tabela kritičnih prelaza* na osnovu koje se vrši konstrukcija stabla otkaza. Grane ili grupe u tabeli kritičnih prelaza osnovni su implikanti za dati konačni događaj.

Procedura konstrukcije stabla otkaza korišćenjem tabela rešenja, sastoji se od sledećih koraka: 1 — formiranja tabela rešenja za svaki element i parametar, 2 — uprošćavanja tabela rešenja, 3 — formiranja tabele kritič-

nih prelaza i 4 — grafičke interpretacije stabla otkaza, odnosno tabele kritičnih prelaza.

Formiranje tabela rešenja elemenata i parametara

Tabele rešenja svih sastavnih objekata (jedinki) mogu se uspešno sastaviti samo ako se besprekorno pozna je funkcionisanje sistema i svih njegovih objekata i ako su nedvosmisleno definisane sve veze između objekata i parametara sistema. Parametri sistema su sve ulazne i izlazne veličine elemenata sistema. U tom smislu veoma je korisna izrada grafičkog modela sistema — blok-dijagrama u kome se definišu svi objekti sistema, parametri i odnosi među njima. Grafički model u primeru razmatranog sistema prikazan je na slici 4.

Vrednosti parametara sistema (ulaznih i izlaznih signala) zavise od tehničkog stanja sastavnih elemenata objekata, kao i mikro i makro uslova u kojima objekti rade. S vremenom rada, u zavisnosti od intenziteta delovanja degradacionih procesa, menjaju se i tehnička stanja elemenata objekata, a time i vrednosti njihovih parametara. Kada parametri dostignu granične vrednosti, eksploatacija je neekonomična, nedovoljno bezbedna, nemoguća, i sl., odnosno nastaju otkazi. Ovakav pristup konstrukcije stabla otkaza omogućuje analizu ne samo uzroka i posledica binarnih stanja »u radu« i »u otkazu« već, ukoliko je to potrebno, i svih interesantnih momenata stanja »u radu«. Za neke objekte ili sisteme (a tu svakako spadaju i sistemi sa mehaničkom osnovom) ova mogućnost može imati izuzetan značaj. To je sigurno posebno važno za kvantitativnu analizu stabla otkaza, jer omogućuje određivanje pokazatelja raspoloživosti i pouzdanosti na svim nivoima hijerarhijske strukture sistema za izabrane intervale stanja »u radu«, kao i za stanje »u otkazu«.

Algoritam ulaznih parametara definiše logičke veze. U tabeli rešenja formiraju se sve moguće kombinacije stanja ulaznih parametara (događaja) i za svaku kombinaciju određuje se stanje izlaznog događaja.

Uprošćavanje tabela rešenja

Uprošćene tabele rešenja ne sadrže kombinacije koje se ponavljaju, odnosno, to su tabele minimalnih havarijskih kombinacija za svaki izlazni parametar. Uprošćavaju se samo tabele čiji ulazni parametri zadovoljavaju n-formu, a zadovoljava je samo onaj parametar koji je zastupljen sa svim mogućim stanjima u kombinacijama date tabele. Samo u tom slučaju taj parametar nije odlučujući za izlaz konkretne kombinacije, pa se izbacuje iz nje. Ovaj postupak može se ilustrirati primerom uprošćavanja tabele rešenja prikazanoj u tabeli 1. Iz tabele se uočava da na veličinu izlaznog parametra I utiču stanja ulaznih parametara A, B, C i D, a označena su sledećim simbolima: R — radno stanje, N — normalno stanje, O — otkazno stanje i P — povratno dejstvo.

Procedura počinje traženjem promenljivog parametra P iz početne grupe događaja koji je sadržan u svim sledećim grupama događaja. Takav promenljivi parametar P zadovoljava uslov n-forme u datim kombinacijama.

Tabela 1

Početna tabela rešenja za parametar I

Grana	Ulaz				Izlaz
	A	B	C	D	I
1	R	N	O	R	R
2	—	R	—	R	R
3	R	P	—	—	R

U konkretnom primeru promenljivi parametar B zadovoljava uslov trirazmerne forme (3-forma), zato što B_N sadrži prva grupa, B_R — druga, a B_P — treća grupa događaja.

Istovremeno ostali parametri — A, C i D ne zadovoljavaju n-formu. U daljavanjem parametra B iz navedenih kombinacija dobijaju se tri nove grupe (kombinacije) $\{A_R C_O D_R\}$, $\{D_R\}$ i $\{A_R\}$ koje se dalje ne mogu uprošćavati, a čine minimalne havarijske kombinacije (osnovne implikante) u razmatranom slučaju. Procedura se, u opštem slučaju, završava kada posle i-tog koraka nijedan parametar ne zadovoljava n-formu.

Formiranje tabele kritičnih prelaza

Tabela kritičnog prelaza se, takođe, dobija metodom usaglašavanja. Sve uprošćene tabele rešenja se po posebnoj proceduri komponuju u tabelu rešenja kod koje je izlazni parametar ujedno i konačan (vršni) događaj. Procedura se završava kada u tabeli kritičnih rešenja egzistiraju samo elementi sistema. Komponovanje tabele rešenja pojedinačnih elemenata i parametara u konačnu tabelu vrši se tako što se postupno zamenjuju ulazni parametri pripadajućim, ranije uprošćenim tabelama sa svim kombinacijama događaja.

Grafička interpretacija stabla otkaza

Na osnovu tabele kritičnih prelaza i blok-dijagrama sistema vrši se konstrukcija stabla otkaza. Minimalne havarijske kombinacije mogu se dobiti i neposredno iz tabele kritičnih prelaza bez konstrukcije stabla otkaza, koje u suštini predstavlja samo njenu grafičku interpretaciju, odnosno pregledniji prikaz hijerarhijskih struktura svih mogućih događaja koji prouzrokuju pojavu događaja na višim ni-

voima do konačnog događaja. Za konstrukciju stabla otkaza koriste se standardizovani grafički simboli. Stablo otkaza razmatranog primera prikazano je na slici 5.

Kvantitativni pokazatelji pouzdanosti

Pouzdanost u širem smislu (dependability — nadležnost) jeste skup svojstava koja opisuju raspoloživost i faktore koji na nju utiču: pouzdanost (reliability — bezotkaznost), pogodnost održavanja i logistička podrška održavanja [2]. To je svojstvo objekta da u vremenu sačuva sposobnost ispunjavanja potrebnih funkcija u zadatim režimima i uslovima primene, odnosno svojstvo tehničkog sistema da sačuva potrebne pokazatelje kvaliteta u toku eksploatacije [3]. Ovako definisan pojam pouzdanosti koristi se samo za opšte opisivanje, dok se kao kvantitativne karakteristike koriste pokazatelji raspoloživosti, bezotkaznosti, pogodnosti održavanja i logističke podrške održavanju. Ovi pokazatelji definisani su u standardima IEC 50 (191) [2].

U ovom radu vršena je ocena pokazatelja pouzdanosti metodom stabla otkaza za početne događaje (karakteristike parametara otkaza osnovnih elemenata), havarijske kombinacije i konačni događaj koji je definisan stanjem jednog od izlaznih parametara sistema. Na osnovu vrednosti ovih pokazatelja određivani su pokazatelji značajnosti elemenata i havarijskih kombinacija. Korišćeni su sledeći pokazatelji:

— *za osnovne elemente koji se ne obnavljaju*: verovatnoća bezotkaznog rada — $R(t)$, uslovni intenzitet otkaza — $\lambda(t)$, asimptotska raspoloživost — A i asimptotska neraspoločivost — Q .

— *za osnovne elemente koji se obnavljaju*, pored navedenih, korišćeni su i sledeći pokazatelji: bezuslovni intenzitet otkaza — $w(t)$, očekivani broj otkaza — $W(t_1, t_2)$, bezuslovni intenzi-

tet remonta $v(t)$ i očekivani broj remonta — $V(t_1, t_2)$.

— *za havarijske kombinacije i sistem*: asimptotska raspoloživost — A_i^* , A_s , asimptotska neraspoločivost — Q_i^* , Q_s , bezuslovni intenzitet otkaza — w_i^* , w_s i uslovni intenzitet otkaza — λ_i , λ_s .

Početni događaji stabla otkaza izabrane su oblasti vrednosti parametara stanja osnovnih elemenata sistema do kojih se vrši njihova dekompozicija i analiza pouzdanosti. U stablu otkaza označavaju se krugom i za njih se podrazumeva da postoje podaci na osnovu kojih se mogu odrediti zakoni verovatnoća realizacije sa odgovarajućim karakteristikama. Definicije navedenih pokazatelja date su u literaturi [1, 2, 3, 4, 5].

Treba naglasiti da postoje suštinske razlike između pojmova bezuslovnog i uslovnog intenziteta otkaza. Prema [2] uslovni intenzitet otkaza definiše se kao granična vrednost, ukoliko postoji, odnosa uslovne verovatnoće da vremenski trenutak otkaza jedne jedinice T padne u zadati vremenski interval $(t, t + \Delta t)$ u trajanju ovog intervala, Δt , kada Δt teži nuli, pod uslovom da je jedinka raspoloživa na početku ovog intervala. Sa druge strane, bezuslovni intenzitet otkaza u momentu t je granična vrednost, ukoliko postoji, odnosa srednjeg broja otkaza popraavljanje jedinice u intervalu vremena $(t, t + \Delta t)$ i dužine tog intervala vremena Δt , kada dužina intervala vremena teži nuli. Ovaj pokazatelj predstavlja verovatnoću da će element otkazati u jedinici vremena, pod uslovom da je u trenutku $t=0$ prešao u ispravno stanje.

Pojam operativne raspoloživosti je standardima IEC [2] zamenjen pojmom *asimptotska (granična) raspoloživost*. To je granična vrednost, ako postoji, trenutne raspoloživosti kada vreme teži beskonačnosti. U uslovima, kao što su, na primer, konstantan in-

tenzitet otkaza i konstantan intenzitet obnavljanja, asimptotska raspoloživost može se odrediti relacijom:

$$A = \frac{MUT}{MUT + MDT} \quad (1)$$

gde je:

MUT — srednje vreme raspoloživosti (mean up time), odnosno matematičko očekivanje vremena u radno sposobnom stanju objekata;

MDT — srednje vreme neraspoloživosti (mean down time), odnosno matematičko očekivanje vremena neraspoloživosti. Vreme neraspoloživosti sadrži vremena preventivnog održavanja i korektivnog obnavljanja (remonta), kao i sva vremena zadržavanja objekta zbog organizacijskih razloga, neadekvatne obezbeđenosti materijalnim resursima, itd.

Veza između uslovnog, bezuslovnog intenziteta otkaza i asimptotske raspoloživosti data je modelom:

$$\lambda(t) = \frac{w(t)}{1 - Q(t)} \quad (2)$$

Bezuslovni intenzitet otkaza, odnosno gustina obnavljanja, dobija se iz fundamentalnih jednačina teorije obnavljanja [1]:

$$w(t) = f(t) + \int_0^t f(t-u) v(u) du$$

$$v(t) = \int_0^t g(t-u) w(u) du \quad (3)$$

Očekivani broj otkaza u intervalu $(t, t + \Delta t)$ predstavlja srednji broj otkaza u tom intervalu, pod uslovom da je element u $t=0$ bio u ispravnom stanju.

$$w(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} w(t) dt \quad (4)$$

Izraz za asimptotsku neraspoloživost minimalne havarijske kombinacije proizilazi iz činjenice da realizacija događaja na višem nivou nastaje samo kada se izvrše svi događaji iz skupa događaja analizirane minimalne havarijske kombinacije:

$$Q_i^* = \prod_{i=1}^n Q_i \quad (5)$$

gde je:

n — broj elemenata minimalne havarijske kombinacije.

Očekivani broj pojava havarijskih kombinacija u jedinici vremena u momentu t (bezuslovni intenzitet otkaza ili parametar potoka otkaza), ocenjuje se pomoću izraza:

$$w_i^*(t) = \sum_{j=1}^u [1 - Q_j(t)] \lambda_j(t) \prod_{l=j}^n Q_l(t) \quad (6)$$

Intenzitet otkaza minimalne havarijske kombinacije, ekvivalentno izrazu (2), dobija se iz izraza:

$$\lambda_i^* = \frac{w_i^*(t)}{1 - Q_i^*(t)} \quad (7)$$

Isti pokazatelji koriste se i za sistem (konačni događaj). Njihove približne vrednosti dobijaju se iz relacija [3]:

$$Q_s \cong \sum_{i=1}^{N_k} Q_i^*; w_s \cong \sum_{i=1}^{N_k} w_i^*; \lambda_s \cong \sum_{i=1}^{N_k} \lambda_i^* \quad (8)$$

gde je:

N_k — broj minimalnih havarijskih kombinacija.

Za određivanje parametara značajnosti elemenata i havarijskih kombinacija predložen je veći broj modela, a u ovom radu je korišćen model Fussel — Vessele, po kojem se računa verovatnoća kojom i -ti događaj utiče na otkaz sistema. Polazi se od pretpostavke da i element koji nije kritičan može

doprinositi realizaciji otkaza, ako se nalazi u jednoj ili nekoliko havarijskih kombinacija [1].

Značajnosti elemenata i havarijskih kombinacija određivane su prema izrazima:

$$I_i^{FV} = \frac{\sum_{k=1}^{k_j} Q_k^*}{Q_s}, \quad I_k^{*FV} = \frac{Q_k^*}{Q_s} \quad (9)$$

gde je:

k_j — broj minimalnih havarijskih kombinacija koje sadrže element i .

Programski paket za konstrukciju i kvantitativnu analizu stabla otkaza

Programski paket sastoji se od dve celine: programa za konstrukciju stabla otkaza metodom tabela rešenja i programa za kvantitativnu analizu stabla otkaza.

Program za konstrukciju omogućuje formiranje i uprošćavanje tabela rešenja i formiranje tabele kritičnih prelaza korišćenjem metode usaglašavanja. Moguć je izlaz na video-ekran i printer. Program formira datoteke podataka minimalnih havarijskih kombinacija i ulaznih parametara. Ove datoteke koriste se za kvantitativnu analizu stabla otkaza. Operator treba da unese podatke o: konačnom događaju (naziv i oznaka), ulaznim parametrima koji definišu stanje izlaznog parametra (naziv, klasa, oznaka); mogućim stanjima ulaznih parametara i stanjima izlaznog parametra. Podaci se unose preko odgovarajućih maski, koje su prikazane na slikama 1, 2 i 3. Najpre se unose podaci o konačnom događaju preko maske prikazane na slici 1, a zatim podaci o ulaznim parametrima i njihovim pripadajućim stanjima preko maske broj dva (slika 2). Posle unosa podataka o ulaznim parametrima javlja se maska za upis stanja (slika 3) izlaznog parametra za svaku moguću

kombinaciju stanja ulaznih parametara. Posle unosa svih stanja izlaznog parametra, program vrši uprošćavanje tabela rešenja, modifikaciju tabele kritičnih prelaza i, na kraju, definiše novi ulazni parametar. U sledećem koraku pojavljuje se maska broj 1 (slika 1) preko koje se definišu ulazni parametri za novi izlazni parametar. Po završetku procesa formiranja uprošćenih tabela rešenja i konačne tabele kritičnih prelaza formiraju se datoteke u kojima se smeštaju podaci o ulaznim parametrima za konačnu tabelu kritičnih rešenja, kao i o minimalnim havarijskim kombinacijama.

TABELA 1	KONAČAN DOGAĐAJ
PODACI O PARAMETRU naziv: _____ klasa: k oznaka: _____	PODACI O STANJU PARAMETARA broj stanja: 2; (1..5) stanje 1: R stanje 2: N

Sl. 1 — Maska za unos podataka o konačnom događaju (maska broj 1)

TABELA 1	ULAZNI PARAMETRI
PARAMETAR 1	
PODACI O PARAMETRU naziv: _____ klasa: (e,p) oznaka: _____	PODACI O STANJU PARAMETARA broj stanja 2; (1..5) stanje 1: R stanje 2: N

Sl. 2 — Maska za unos podataka o ulaznim parametrima (maska broj 2)

KOMBINACIJA 1				MOGUĆA STANJA IZLAZA SU:
				R N
p1	p2	p3	rez	
R	N	-	N	
DA LI JE UPIS KOREKTAN (d/n): D				

Sl. 3 — Maska za unos stanja izlaznog parametra (maska broj 3)

Kvantitativnom analizom određuju se verovatnoće realizacija ranije definisanih događaja na svim nivoima — od početnih, preko havarijskih kombinacija do konačnog događaja. Program za kvantitativnu analizu koristi baze

podataka koje formira program za konstrukciju stabla otkaza i po prikazanim modelima vrši ocenu navedenih pokazatelja pouzdanosti elemenata, havarijskih kombinacija i sistema. Korisnik treba da unese samo parametre raspodela verovatnoća vremena rada do otkaza za sve razmatrane elemente i vremena potrebnih za njihovo održavanje.

Za ilustraciju procedure konstrukcije stabla otkaza i kvantitativne analize pomoću komentarisanih paketa programa, kao primer prikazan je krajnje pojednostavljen tehnički sistem koji se sastoji od dva serijski spojena podsistema: tri paralelno povezane pumpe po modelu »2 do 3« (sistem je u otkazu ako otkazu dva od postojeća 3 elementa) i dva serijski spojena prečistača. Svaka pumpa sastoji se od tri serijski spojena elementa: vodećeg i vođenog zupčanika i kućišta pumpe. Ovaj primer preuzet je iz literature [1]

i korišćen za testiranje rada programa. Blok-dijagram sistema prikazan je na slici 4.

Svaki od elemenata i parametara sistema može biti u radnom (R) ili neradnom (N) stanju, kao što je prikazano u tabeli 2. Konačni događaj je parametar p — »nema pritiska na izlazu«. Ovaj događaj je u funkciji tehničkog stanja elemenata pumpe i prečistača. Posle unošenja osnovnih podataka o elementima i parametrima preko komentarisanih maski dobijene su uprošćene tabele (3 do 7) i konačna tabela kritičnih prelaza (tabela 8).

Iz tabele 8 može se uočiti 29 minimalnih havarijskih kombinacija (osnovnih implikanata) za razmatrani sistem: $\{k_{2n}k_{3n}\}$, $\{k_{2n}z_{6n}\}$, $\{k_{2n}z_{5n}\}$, $\{z_{4n}k_{3n}\}$, ..., $\{f_{2n}\}$ i $\{f_{1n}\}$.

Grafička interpretacija tabele kritičnih prelaza (stablo otkaza) data je na slici 5. Konačni događaj, nedovo-

Sl. 4 — Blok-dijagram sistema

Sl. 5 — Stablo otkaza sistema

Osnovni podaci o elementima i parametrima sistema

Red. broj	Naziv	Klasa	Oznaka	Radno stanje	Nerad. stanje
1	prečistač 1	e	f1	R	N
2	prečistač 2	e	f2	R	N
3	pritisak iz p.	p	p4	R	N
4	pritisak iz p1	p	p1	R	N
5	pritisak iz p2	p	p2	R	N
6	pritisak iz p3	p	p3	R	N
7	zupčanik 1	e	z1	R	N
8	zupčanik 2	e	z2	R	N
9	kućište 1	e	k1	R	N
10	zupčanik 3	e	z3	R	N
11	zupčanik 4	e	z4	R	N
12	kućište 2	e	k2	R	N
13	zupčanik 5	e	z5	R	N
14	zupčanik 6	e	z6	R	N
15	kućište 3	e	k3	R	N

Tabela 3

Uprošćena tabela za konačan događaj

Red. broj	Parametri ulaza			Izlaz
	f1	f2	p4	p
1	R	R	R	R
2	—	—	N	N
3	—	N	—	N
4	N	—	—	N

Tabela 4

Uprošćena tabela za pritisak iz pumpi

Red. broj	Parametri ulaza			Izlaz
	p1	p2	p3	p4
1	R	R	R	R
2	R	R	N	R
3	R	N	R	R
4	N	R	R	R
5	—	N	N	N
6	N	—	N	N
7	N	N	—	N

Tabela 5

Uprošćena tabela za pritisak iz pumpe 1

Red. broj	Parametri ulaza			Izlaz
	z1	z2	k1	
1	R	R	R	R
2	—	—	N	N
3	—	N	—	N
4	N	—	—	N

Tabela 6

Uprošćena tabela za pritisak iz pumpe 2

Red. broj	Parametri ulaza			Izlaz
	z3	z4	k2	
1	R	R	R	R
2	—	—	N	N
3	—	N	—	N
4	N	—	—	N

Tabela 7

Uprošćena tabela za pritisak iz pumpe 3

Red. broj	Parametri ulaza			Izlaz
	z5	z6	k3	
1	R	R	R	R
2	—	—	N	N
3	—	N	—	N
4	N	—	—	N

ljan pritisak ulja iz sistema, realizovace se ako se realizuje jedna od navedenih minimalnih havarijskih kombinacija.

Kvantitativna analiza stabla otkaza urađena je sa sledećim parametrima Weibulove raspodele vremena rada do

otkaza i vremena održavanja: 1 — za prečistače ulja $\beta = 3$, $\Theta = 25000$ km, $\beta_r = 3$, $\Theta_r = 1$ h, 2 — za vodeće zupčanike pumpe $\beta = 3$, $\Theta = 170000$ km, $\beta_r = 3$, $\Theta_r = 5$ h, 3 — za vođene zupčanike $\beta = 3$, $\Theta = 240000$ km, $\beta_r = 3$, $\Theta_r = 5$ h i 4 — za tela pumpe $\beta = 3$, $\Theta = 240000$ km, $\beta_r = 3$, $\Theta_r = 7$ h. Primenjena je strategija periodične preventivne zamene elemenata sa sledećim fiksnim periodičnostima: prečistači ulja su menjani posle svakih 20000 km, vodeći zupčanici posle svakih 130000 km, a ostali elementi posle svakih 170000 pređenih kilometara.

Sl. 6 — Asimptotska raspoloživost sistema

Sl. 7 — Uslovni intenzitet otkaza sistema

Tabela kritičnih prelaza

Red. broj	Parametri ulaza											Kon. dog.
	f1	f2	z1	z2	k1	z3	z4	k2	z5	z6	k3	p
1	—	—	—	—	—	—	—	N	—	—	N	N
2	—	—	—	—	—	—	—	N	—	N	—	N
3	—	—	—	—	—	—	—	N	N	—	—	N
4	—	—	—	—	—	—	N	—	—	—	N	N
5	—	—	—	—	—	—	N	—	—	N	—	N
6	—	—	—	—	—	—	N	—	N	—	—	N
7	—	—	—	—	—	N	—	—	—	—	N	N
8	—	—	—	—	—	N	—	—	—	N	—	N
9	—	—	—	—	—	N	—	—	N	—	—	N
10	—	—	—	—	N	—	—	—	—	—	N	N
11	—	—	—	—	N	—	—	—	—	N	—	N
12	—	—	—	—	N	—	—	—	N	—	—	N
13	—	—	—	N	—	—	—	—	—	—	N	N
14	—	—	—	N	—	—	—	—	—	N	—	N
15	—	—	—	N	—	—	—	—	N	—	—	N
16	—	—	N	—	—	—	—	—	—	—	N	N
17	—	—	N	—	—	—	—	—	—	N	—	N
18	—	—	N	—	—	—	—	—	N	—	—	N
19	—	—	—	—	N	—	—	N	—	—	—	N
20	—	—	—	—	N	—	N	—	—	—	—	N
21	—	—	—	—	N	N	—	—	—	—	—	N
22	—	—	—	N	—	—	—	N	—	—	—	N
23	—	—	—	N	—	—	N	—	—	—	—	N
24	—	—	—	N	—	N	—	—	—	—	—	N
25	—	—	N	—	—	—	—	N	—	—	—	N
26	—	—	N	—	—	—	N	—	—	—	—	N
27	—	—	N	—	—	N	—	—	—	—	—	N
28	—	N	—	—	—	—	—	—	—	—	—	N
29	N	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	N

Deo dobijenih rezultata prikazan je na slikama 6. i 7. Mogu se uočiti efekti — smanjenje intenziteta otkaza sistema (slika 7) i povećanje raspoloživosti (slika 6) primenom navedene strategije preventivnog održavanja. Na sličan način mogu se prezentirati pokazatelji i za ostale nivoe strukture, od osnovnih elemenata do konačnog događaja, uz primenu navedene ili drugih strategija preventivnog ili korektivnog održavanja.

Zaključak

Metoda tabela rešenja omogućuje relativno jednostavnu automatizaciju procesa formiranja konačne tabele kri-

tičnih prelaza, a na taj način i definisanja minimalnih havarijskih kombinacija za sva, za analizu značajna, tehnička stanja elemenata tehničkih sistema. Proces grafičke interpretacije stabla otkaza, na osnovu konačne tabele kritičnih prelaza, vrlo je jednostavan. Ovaj proces u predloženom programu nije automatizovan i to je sledeći korak njegovog usavršavanja. Kvantitativnom analizom stabla otkaza sa prikazanim modelima mogu se dobiti ocene svih relevantnih pokazatelja pouzdanosti tehničkih sistema, potrebnih u procesima alokacije pouzdanosti u fazi projektovanja, optimizacije režima tehničkog održavanja, i sl.

Literatura:

- [1] Henley, E. J., Kumamoto, H.: Reliability engineering and risk assessment, ruski prevod, Mašinstroenie, Moskva, 1984.
- [2] Internacionalni standard IEC 50 (191), 1990.
- [3] Pronikov, A. S.: Nadežnost mašin, Mašinstroenie, Moskva, 1978.
- [4] Beljčić, i dr.: Nadežnost i efektivnost v tehnike, tom 5, Mašinstroenie, Moskva, 1988.
- [5] Beichelt, F., Franken, P.: Zuverlässigkeit und instanhaltung, mathematische methoden, Veb Verlagstechnik, Berlin, 1983.
- [6] Dhillon, B. S., Singh, Ch.: Engeneering Reliability, new techniques and applications, ruski prevod, Moskva, 1981.
- [7] Rainske, K., Usakov, I. A.: Ocenka nadežnosti sistem s ispoljzovanijem grafov, Radio i svjaz, Moskva, 1988.
- [8] Stanković, R., Šehović, S.: Kvalitativna i kvantitativna analiza stabla otkaza tehničkih sistema, VTG, 1/1992.