Mr Rade Stanković,
kapetan I klase, dipl. inž.

Samir Šehović,
poručnik, dipl. inž.

Kvalitativna i kvantitativna analiza stabla otkaza tehničkih sistema

Uvod

Stablo otkaza predstavlja logički dijagram kojim se opisuju događaji i uslovi koji uzrokuju pojavu vršnog događaja, otkaza sistema. Koristi se za određivanje uzročnih veza koje dovode do datog opasnog (havarijskog) stanja sistema. Ovo stanje je konačni (vršni — top event) događaj stabla otkaza. To je jedno od mogućih stanja sistema za koji postoji razlog za istraživanje. Složeniji sistemi mogu imati mnogo različitih konačnih događaja, a time i odgovarajućih stabala otkaza. Analiza stabla otkaza zasnovana je na deduktivnom zaključivanju uz primenu Booleovog algebre. Osnovna prednost ove metode u odnosu na druge je u tome što se analiza ograničava na otkrivanju samo onih elemenata sistema i događaja koji uzrokuju konkretan otkaz sistema. Zbog toga je stablo otkaza i njegova jasna grafička interpretacija efikasno sredstvo za komunikaciju specijalista. Metoda je posebno dobila na značaju i masovno se počela koristiti s razvojem informatičke tehnologije i računara. Strukturnu formalizaciju konstrukcije stabla otkaza izvršio je David Hansl 1965. [1]. Kasnije je razvijen niz programa za automatiziranu konstrukciju stabla otkaza pomoću računara CAT (Computer Aided Construction of Fault Trees), određivanje mini-

malnih havarijskih kombinacija MO-CUS (Minimal Option Cut Sets), kvalitativnu ocenu pokazatelja — koeficijenta gotovosti i koeficijenta zastoja sistema, očekivanog broja otkaza i opravki uslovnog intenziteta otkaza, itd. (KIT, KIT-1, KIT-2), ocenu značajnosti havarijske kombinacije (IMPORTANCE), itd. Korišćenjem ovih programa kasnije su izrađeni softverski paketi, kao što je, na primer, TREE — MASTER koji je prilagođen za primenu na PC računarima. Za grafičko predstavljanje stabla otkaza koriste se standardizovani grafički simboli: simboli za događaje, simboli za logičke kapije i simboli za prenos.

Radi automatizovane analize stabla otkaza na Katedri transporta VVTS izrađen je softverski paket koji omogućuje kvalitativnu i kvantitativnu analizu i određivanje značajnosti događaja i havarijskih kombinacija.

Kvalitativna analiza stabla otkaza

Kvalitativnom analizom određuju se oblici i uzroci otkaza na svim nivoima, od elementa do realizacije vršnog događaja (otkaza sistema). Pod događajem se podrazumeva moguć uslov ili moguće stanje elementa ili funkcije nekog procesa.

Realizacija vršenog (top) događaja može biti uzrokovana otkazom jednog ili više elemenata. U stablu otkaza oblici otkaza sistema jasno se mogu odrediti korišćenjem principa havarijskih kombinacija.

Havarijska kombinacija je kombinacija početnih događaja koja uzrokuje realizaciju vršenog događaja. Realizacija svih događaja u kombinaciji sigurno uzrokuje realizaciju vršenog događaja. Obrnuto, prohodna kombinacija je skup početnih događaja koji ne uzrokuju pojavu top-događaja. Ako se nijedan od događaja ove kombinacije ne dogodi, sigurno se neće realizovati ni vršni događaj.

Složeniji sistemi imaju vrlo veliki broj oblika otkaza. Na primer, sistemi koji se sastoje od 40 do 90 elemenata mogu imati stotine hiljada havarijskih kombinacija. To može bitno komplikovati analizu, pa je radi uprošćavanja neophodno smanjiti broj kombinacija. U tom smislu se primenjuje princip minimalnih havarijskih kombinacija (minimum cut set). Minimalna havarijska kombinacija je skup događaja čija realizacija je nužna za pojavu otkaza sistema. Ako se iz minimalne havarijske kombinacije odstrani bilo koji početni događaj, ostali događaji više ne čine havarijsku kombinaciju. Na ovaj način bitno se smanjuje broj havarijskih kombinacija, jer se isključuju sve kombinacije u kojima se događaji ponavljaju.

Problem konstrukcije stabla otkaza svodi se na to da se za konkretan vršni događaj definiraju sve minimalne havarijske kombinacije. Već za malo složenije sisteme, izrada stabla otkaza sa minimalnim presekom havarijskih kombinacija, bez korišćenja računara, predstavlja mukotrpan i dugotrajan rad. Zbog toga je urađen softverski paket »STABLO«, korišćenjem programskog jezika TURBO PASCAL 5.0 na računaru PC M290 koji omogućuje:

- formiranje tablica rešenja;
- uprošćavanje tablica rešenja;

— formiranje tabele kritičnih prelaza;

— formiranje datoteke minimalnih havarijskih kombinacija;

— formiranje datoteke parametara za kvantitativnu analizu stabla otkaza, i

— izlaz na video ekran i printer.

Za konstrukciju stabla otkaza nužno je savršeno poznavanje razmatranog sistema.

Jedan sistem (sklop) može imati jedan ili više vršnih događaja. Svaki vršni događaj uslovljen je realizacijom događaja na nižim nivoima do elementa, pa se za svaki vršni događaj konstruiše posebno stablo otkaza. Primer jednog top-događaja sistema za kočenje motornog vozila jeste smanjen moment kočenja između doboša i obloge papuče.

Tablica rešenja je jedna od sistematizovanih pristupa za automatizovanu konstrukciju stabla otkaza [1]. Tablice rešenja sastoje se od jednog ili više ulaznih događaja i jednog i samo jednog izlaznog događaja.

Kao izlazni događaj uvek se koristi parametar koji čini vezu između dva elementa. Ulazni događaji su stanja elemenata i parametara koji imaju direktan uticaj na stanje izlaznog događaja.

U tablici rešenja formiraju se sve moguće kombinacije stanja ulaznih događaja s logičkim vezama »I«, »I-prioritetno«, »ILI« i »ILI-prioritetno«, a zatim se za svaku kombinaciju određuje stanje izlaznog događaja.

Program »STABLO« ima proceduru za formiranje kombinacija za dati broj ulaznih parametara po pravilima Boolove algebre. Tablice rešenja se formiraju počevši od konačnog događaja, sve dok u tablici kritičnih prelaza ne bude zamenjen i poslednji parametar.

Procedura uprošćavanja tablica rešenja izbacuje sve suvišne kombinacije koje se međusobno sadrže i za kon-

kretni izlazni parametar gradi tablicu minimalnih havarijskih kombinacija. Uprošćavaju se samo tabele čiji ulazni parametri zadovoljavaju n-formu. N-formu zadovoljava onaj parametar koji je zastupljen sa svim mogućim stanjima u kombinacijama date tabele. Samo u tom slučaju taj parametar nije odlučujuće bitan za izlaz konkretne kombinacije, pa se izbacuje iz nje. Procedura formiranja tabele kritičnih prelaza komponuje sve uproštene tablice rešenja u tablicu rešenja kod koje je izlazni parametar vršni događaj. Tablica kritičnih prelaza dobija se isključivanjem svih posrednih promenljivih parametara tablica rešenja do konačnog događaja. Tablica rešenja čiji je izlaz vršni događaj zove se konačna tablica rešenja.

Spajanje kolona, gde se kao ulaz u tabelu kritičnih prelaza javlja isti element ili parametar dva puta, vrši se po posebnim pravilima [1]. Izmene se vrše sve dok u konačnoj tabeli postoje ulazi koji nisu elementi sistema. Kada se i poslednji ulazni parametar u tabeli kritičnih prelaza zameni, dobija se konačna tabela kritičnih prelaza, na osnovu koje se vrši konstrukcija stabla otkaza.

Kvantitativna analiza stabla otkaza

Kvantitativnom analizom određuju se pokazatelji raspoloživosti, pouzdanosti i održavanja sistema.

Za kvantitativnu analizu stabla otkaza izrađen je program »ANALIZA« koji s programom »STABLO« čini paket programa za analizu stabla otkaza. Program »ANALIZA« koristi datoteku o ulaznim parametrima konačne tabele kritičnih prelaza i datoteku sa podacima o havarijskim kombinacijama sistema koji se analizira.

Program omogućuje izračunavanje pokazatelja raspoloživosti, pouzdanos-

ti i održavanja elemenata i strukture sistema. To su:

- pokazatelji procesa opravka-otkaz;
- pokazatelji procesa otkaz-opravka;
- pokazatelji punog procesa;
- pokazatelji za havarijske kombinacije;
- pokazatelji za sistem, i
- značajnost elemenata i havarijskih kombinacija.

Proces opravka-otkaz počinje u trenutku završetka opravke, $t=0$, kada se smatra da element ima iste osobine kao nov i završava se u trenutku ponovnog dostizanja graničnih vrednosti, odnosno otkaza. Pokazatelji pouzdanosti ovog procesa su:

- $R(t)$ — verovatnoća bezotkaznog rada;
- $F(t)$ — verovatnoća otkaza;
- $r(t)$ — intenzitet otkaza;
- $f(t)$ — funkcija gustine raspodele vremena rada do otkaza;
- m_x — srednje vreme rada do otkaza.

Pokazatelji pouzdanosti procesa otkaz-opravka računaju se u programu »ANALIZA« po poznatim jednačinama za Weibullovu raspodelu.

Proces otkaz-opravka počinje u trenutku pojave otkaza elementa ($t=0$), a završava u trenutku završetka opravke. Računaju se sledeći pokazatelji procesa:

- $G(t)$ — verovatnoća opravke u trenutku t ;
- $g(t)$ — gustina verovatnoće opravke;
- $\mu(t)$ — intenzitet opravke, i
- m_r — srednje vreme trajanja opravke.

Vrednosti ovih pokazatelja računaju se prema verifikovanim funkcijama raspodela i odgovarajućim parametrima.

Puni ciklus sastoji se od procesa opravka-otkaz i otkaz-opravka koji se ponavljaju. Pokazatelji punog ciklusa su:

- $A(t)$ — koeficijent gotovosti;
- $Q(t)$ — koeficijent zastoja;
- $\lambda(t)$ — uslovni intenzitet otkaza;
- $w(t)$ — bezuslovni intenzitet otkaza;
- $W(t, t+dt)$ — očekivani broj otkaza;
- $\mu(t)$ — uslovni intenzitet opravke;
- $v(t)$ — bezuslovni intenzitet opravke;
- $V(t)$ — očekivani broj opravke;
- m_o — srednje vreme između otkaza.

Definicije navedenih pokazatelja date su u [1]. Određuju se prema sledećim izrazima:

- uslovni intenzitet otkaza:

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

- bezuslovni intenzitet otkaza:

$$w(t) = f(t) + \int_0^t f(t-u) v(u) du \quad (2)$$

- očekivani broj otkaza u intervalu $(t, t+dt)$:

$$w(t_1 \cdot t_2) = \int_{t_1}^{t_2} w(t) dt \quad (3)$$

- uslovni intenzitet opravke:

$$\mu(t) = \frac{v(t)}{Q(t)} \quad (4)$$

- bezuslovni intenzitet opravke:

$$v(t) = \int_0^t g(t-u) w(u) du \quad (5)$$

- očekivani broj opravki:

$$v(t_1 \cdot t_2) = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt \quad (6)$$

- koeficijent zastoja:

$$Q(t) = W(0, t) - V(0, t) \quad (7)$$

Osnovni problem javlja se pri određivanju vrednosti bezuslovnih intenziteta $w(t)$ i $v(t)$, odnosno rešavanja integrala (2 i 5).

Korišćenjem transformacija Laplasa, problem se može svesti na algebarske jednačine sa dve nepoznate:

$$\begin{aligned} L[w(t)] &= L[f(t)] + L[f(t)] L[v(t)] \\ L[v(t)] &= L[g(t)] L[w(t)] \end{aligned} \quad (8)$$

Za neke od poznatih funkcija raspodele, funkcija obnavljanja se, međutim, ne može izračunati niti korišćenjem izraza (8) [2], a jedna od tih je Weibullova raspodela.

Zbog toga se za praktičnu upotrebu koriste izrazi za ocenu navedenih funkcija.

Na osnovu teorema [2, 3]:

$$\lim_{t \Rightarrow \infty} [H(t) - t/m_x] = (\sigma^2 - m_x^2)/2m_x^2 \quad (9)$$

dobija se ocena broja otkaza do trenutka t :

$$W(t) = H(t) \cong \frac{t}{m_x} + \frac{\sigma^2 - T^2}{2T^2} \quad (10)$$

pri čemu greška teži nuli ($\epsilon \Rightarrow 0$) kada $t \Rightarrow \infty$.

Verovatnoća da se element u proizvoljnom trenutku vremena t nađe u ispravnom stanju, sa zadovoljavajućom tačnošću, može se odrediti izrazom:

$$\begin{aligned} A(t) = P(u(u_g)) &= \frac{1}{m_x + m_r} \int_0^\infty R(t) dt = \\ &= \frac{m_x}{m_x + m_r} \end{aligned} \quad (11)$$

Za promenljiv intenzitet otkaza $\lambda(t)$:

$$A(t) = \frac{1}{\frac{m_r}{1} + \lambda(t)} \quad (12)$$

Bezuslovni intenzitet otkaza i opravki:

$$w(t) = \lambda(t) A(t); v(t) = \mu(t) Q(t) \quad (13)$$

Minimalne havarijske kombinacije čine skupove događaja čijom se realizacijom uzrokuje sigurna pojava vršnog događaja. Korišteni su sledeći pokazatelji:

— Q_i^* — koeficijent zastoja:

$$Q_i^* = \prod_{i=1}^n Q_i \quad (14)$$

gde je:

n — broj elemenata minimalne havarijske kombinacije.

— w_i^* — безусловni intenzitet otkaza:

$$w_i^*(t) = \sum_{j=1}^n [1 - Q_j(t)] \lambda_j(t) \prod_{i=1}^n Q_i(t) \quad (15)$$

— λ_i^* — intenzitet otkaza:

$$\lambda_i^* = \frac{w_i^*(t)}{[1 - Q_i^*(t)]} \quad (16)$$

Isti pokazatelji koriste se i za celi sistem. Njihove približne vrednosti dobijaju se iz relacija [1]:

$$Q_s \cong \sum_{i=1}^{N_k} Q_i^*; w_s \cong \sum_{i=1}^{N_k} w_i; \lambda_{is} \cong \sum_{i=1}^{N_k} \lambda_i^* \quad (17)$$

gde je:

N_k — broj minimalnih havarijskih kombinacija.

Pored navedenih pokazatelja procesa za element, minimalne havarijske kombinacije i sistem, program »ANALIZA« omogućuje i ocenu značajnosti

(importance) elemenata i minimalnih havarijskih kombinacija. Ovim pokazateljem ocenjuje se uloga (doprinos) svakog elementa, odnosno minimalne havarijske kombinacije realizaciji vršnog događaja. Na osnovu vrednosti parametra značajnosti mogu se donositi odluke o redosledu dijagnostike stanja, izvršenja postupaka održavanja, i sl., a može biti i osnova za projektovanje i optimizaciju strukture sistema [2].

Problemom određivanja parametra značajnosti bavio se veći broj autora (Birnbbaum, Fussel — Vessele, Barlow — Proschan, itd.) koji su predložili modele za ocenu.

U programu se koristi pristup Fussel-Vesselea po kojem se računa verovatnoća kojom događaj (i) unosi uticaj na otkaz sistema. Polazi se od pretpostavke da i element koji nije kritičan može pridonositi realizaciji otkaza, ako se nalazi u jednom ili nekoliko havarijskih kombinacija [10,40]. Pod pojmom »nije kritičan« podrazumeva se da se obnavljanjem elementa ne utiče na promenu opšteg stanja sistema. Značajnost elementa i minimalne havarijske kombinacije određuju se prema izrazima:

$$I_i^{FV} = \frac{\sum_{k=1}^{k_j} Q_k^*}{Q_s}; \quad I_k^{FV} = \frac{Q_k^*}{Q_s} \quad (18)$$

gde je:

k_j — broj minimalnih havarijskih kombinacija koje sadrže element i.

PRIMER

Korišćenjem komentarisano softvera analizirano je stablo otkaza radne kočnice motornog vozila TAM-5000. Blok-dijagram sistema prikazan je na slici 1. Elementi i parametri sistema, bitni za analizu stabla otkaza dati su u tabeli 1.

Elementi i parametri sistema za kočenje motornog vozila TAM 5000

Br.	Naziv	Klasa	Oznaka	Rad. st.	Nepr. st.
1.	Br. obrtaja radilice	P	bo	R	S,O
2.	Remen	E	re	R	S,O
3.	Kompresor za vazduh	E	ko	R	I,Z
4.	Pritisak vazduha na izlazu iz kompresora	P	p8	R	S,O
5.	Cevi: ko-reg. pritiska	E	c4	R	D,O
6.	Pr. ulaz u reg. prit.	P	p7	R	S,O
7.	Regulator pritiska	E	rp	R	N
8.	Pr. izlaz iz reg. prit.	P	p6	R	S,O
9.	Cevi: reg. pr.-rezervoar	E	c3	R	D,O
10.	Pr. ulaz u rezervoar	P	p5	R	S,O
11.	Rezervoar	E	rez	R	N
12.	Pr. izlaz iz rezervoara	P	p4	R	S,O
13.	Cevi: rez.-servo cilindar	P	c2	R	D,O
14.	Pr. u servo cilindru	P	p3	R	S,O
15.	Sila na pedali kočnice	P	Fs	R	O
16.	Sistem poluga	E	sp	R	N
17.	Servo cilindar	E	gz	R	Z
18.	Sila na klipu glavnog kočionog cilindra	P	Fg	R	S,O
19.	Glavni kočioni cilindar	E	gt	R	Z,V
20.	Prit. izlaz iz gl. koč. cil.	P	p2	R	S,O
21.	Cevi: gkcil-koč. cilindri	E	c1	R	D,V,O
22.	Pr. ulaz u koč. cil.	P	p1	R	S,O
23.	Kočioni cilindar	E	kc	R	Z
24.	Obloge papuča	E	dp	R	P,I,M,K
25.	Koeficijent trenja	P	ft	R	S
26.	Sila na papuče kočnice	P	Fp	R	S,O
27.	Sila trenja papuče-doboš	P	Ft	R	S,O

Oznakama P i E definisane su klase ulaznih parametara: »P«— kada je ulaz parametar sistema i »E«— kada je ulaz element sistema.

Oznakama S, I, D, N, Z definisana su stanja izlaznih parametara sa vred-

nostima od dozvoljenih. Oznakom »0« definisano je stanje izlaznog parametara jednako nuli. Oznake P, I, M i K imaju sledeća značenja: P— papuče su pregrejane, I — papuče su istrošene, M — papuče su zamašćene, K — veliki zazor između papuča i doboša.

Sl. 1

Sl. 2

Pokazatelji za puni proces

ELEMENT	Q(t)	A(t)	w(t)	v(t)	W(t)	V(t)
Doboš-papuče:st.	0.00061	0.99939	0.00004	0.00004	0.33313	0.33252
Kaiš(remen):st.	0.00046	0.99954	0.00011	0.00011	0.99954	0.99909
Kompresor:st.	0.00016	0.99984	0.00001	0.00001	0.09998	0.09982
Cevi:kompr.-reg.p:st	0.00013	0.99987	0.00002	0.00002	0.14284	0.14271
Regulator pritis.:st	0.00070	0.99930	0.00006	0.00006	0.55517	0.55447
Cevi:reg.pr.-rez.:st	0.00011	0.99989	0.00002	0.00002	0.14284	0.14273
Rezervoar:st.	0.00026	0.99974	0.00001	0.00001	0.12497	0.12471
Cevi:rez.-gkcz.:st.	0.00018	0.99982	0.00002	0.00002	0.14283	0.14265
Foluge:st.	0.00013	0.99987	0.00001	0.00001	0.12498	0.12486
Gl.koč.cil.zraka.:st	0.00071	0.99929	0.00003	0.00003	0.24982	0.24911
Dotok ulja:st.	0.00005	0.99995	0.00002	0.00002	0.19999	0.19995
Gl.koč.cil.teč.:st.	0.00082	0.99918	0.00005	0.00005	0.39967	0.39885
Cevi:gkct.-kc.:st.	0.00016	0.99984	0.00002	0.00002	0.14283	0.14267
Kočioni cilindar:st.	0.00068	0.99932	0.00005	0.00005	0.39973	0.39904

Pri definisanju vršnog događaja nije razmatrano vozilo u interakciji sa okolinom u procesu kočenja već samo parametri kočnica. Zbog toga je kao vršni, definisan događaj: »smanjen moment kočenja između papuča i doboša«.

Kvalitativna analiza stabla otkaza izvršena je korišćenjem programa »STABLO« pomoću kojeg su dobijene uprošćene tablice za sve parametre sistema i konačna tabela kritičnih kombinacija na osnovu koje je konstruisano stablo otkaza razmatranog sistema, slika 2.

Kvantitativna analiza stabla otkaza izvršena je korišćenjem programa »ANALIZA«. Program koristi datoteke podataka o ulaznim parametrima i havarijskim kombinacijama koje formira program »STABLO«. Za sve navedene elemente uneseni su podaci o

srednjim vremenima rada do otkaza i srednjim vremenima stanja »u otkazu«. Kao izlazni, dobijene su tabele pokazatelja gotovosti elementa, havarijskih kombinacija i sistema u celini. U ovom radu prikazani su pokazatelji sistema za puni proces, tabela 2.

Zaključak

Paket programa omogućuje automatizovanu kvantitativnu i kvalitativnu analizu stabla otkaza. S obzirom na to da problem takve prirode zahteva dosta memorijskog prostora, uvedena su ograničenja koja se odnose na broj stanja ulaznih parametara, broj elemenata sistema koji se analizira i broj minimalnih havarijskih kombinacija. Program može raditi sa maksimalno pet stanja ulaznih parametara (jedno rad-

koji se analiziraju i dve stotine havarijskih kombinacija. Navedena ograničenja ne predstavljaju prepreku za kvalitetnu analizu stabla otkaza, jer se sva-

no i četiri otkazna), pedeset elemenata ki element sistema može analizirati odvojeno i dobivena stabla posle toga spojiti u jedno.

Literatura:

- [1] Henley, E. J., Kumamoto, H.: Reliability engineering and risk assessment, ruski prevod, Masinostroenie, Moskva, 1984.
- [2] Beichelt, F., Franken, P.: Zuverlässigkeit und Instandhaltung, mathematische Methoden, Veb Verlagstechnik, Berlin, 1983.
- [3] Druzinin, G. V.: Nadežnost avtomatizirovanih proizvodstvenih sistem, Energoatomizdat, Moskva, 1986.

- [4] Dhillon, B. S., Singh, Ch.: Engeneering Reliability, New Techniques and Applications, ruski prevod, 1981.
- [5] Rainske, K., Usakov, I. A.: Ocenka nadežnosti sistem s ispoljzovanjem grafov, Radio i svjaz, Moskva, 1988