Milić Milićević,
kapetan, dipl. inž.

ANALIZA OTKAZA DIZEL-MOTORA METODOM STABLA OTKAZA

Metoda stabla otkaza, kao jedna od najčešće primenjivanih metoda analize otkaza, primenjena je i u analizi otkaza dizel-motora. Na osnovu prikupljenih podataka izvršena je konstrukcija i analiza stabla otkaza za odabrani vršni događaj. Poseban problem predstavljao je nedostatak podataka potrebnih za analizu stabla otkaza, pa je bilo nužno redukovati već konstruisano stablo otkaza. Najširu primenu metoda stabla otkaza treba da ima u okviru sistema održavanja.

Uvod

Zbog uslova primene u borbenim dejstvima, složenosti i cene, vojni tehnički sistemi zahtevaju bezotkazan rad u što dužem vremenu eksploatacije. Postignuti visoki parametri pouzdanosti rada bitno smanjuju troškove održavanja, što je, sa stanovišta racionalnosti, vrlo značajno. U okviru toga, odgovarajući značaj ima postizanje i zadržavanje na visokom nivou parametara pouzdanosti motora sa unutrašnjim sagorevanjem koji su ugrađeni u vojna motorna vozila.

Shvatanje značaja pouzdanosti i organizovana istraživanja u toj oblasti usloveli su razvoj metoda teorije pouzdanosti. Osnovu istraživanja u tim metodama čine otkazi, odnosno njihova pojava i efekti izazvani tom pojavom. Poseban problem predstavlja analiza otkaza, tj. sagledavanje uzroka nastajanja, posledica na funkciju sistema, kao i određivanje verovatnoća nastanka otkaza. Metoda stabla otkaza predstavlja jednu od osnovnih metoda analize otkaza i ima veoma široku primenu.

Na osnovu prikupljenih informacija o otkazima dizel-motora F4L413FR konstruisano je stablo otkaza za određeni vršni događaj, izvršena analiza stabla otkaza i dati predlozi za primenu u praksi.

Analiza otkaza metodom stabla otkaza

Analiza stabla otkaza jedna je od osnovnih metoda analize pouzdanosti sistema. Razvijena je šezdesetih godina u laboratorijama Boing kompanije za primenu u sistemu naoružanja, a danas ima široku i raznovrsnu primenu u različitim oblastima, kao što su: nuklearne centrale, hemijski procesi, pouzdanost kompleksnih sistema, obezbeđenje kvaliteta, električni i elektronski sistemi, pretvaranje uglja u tečno ili gasno gorivo, sistemi naoružanja i dr.

Analiza stabla otkaza je deduktivna metoda. Najpre se definiše neželjeni događaj, tzv. vršni događaj (»top event«), a zatim se analizira uticaj ponašanja pojedinih elemenata sistema na njegovo pojavljivanje. Analiza se oslanja na dijagram, stablo otkaza (SO),

koji simbolički opisuje logičke relacije između događaja. Pod događajem se podrazumeva mogući uslov ili moguće stanje elementa ili funkcije nekog procesa. Analiza počinje kvalitativnim definisanjem neželjenog događaja, a potom se obavlja unazad kroz konfiguraciju sistema kako bi se pronašli otkazi elemenata sistema i proceduralne greške koje mogu dovesti do neželjenog događaja. Putevi otkaza odnose se na redosled događaja koji vode do neželjenog događaja.

Metodologija analize otkaza obuhvata: određivanje vršnog događaja, upoznavanje rada sistema koji treba da se analizira, konstrukciju stabla otkaza, usvajanje stabla otkaza, ocenu stabla otkaza, obezbeđenje preporuka i alternativa za donošenje odluka.

Konstruisanje stabla otkaza počinje postavljanjem na vrh stabla definisanog vršnog događaja, a u sledeći niži red stabla uvrštavaju se oni događaji koji su neophodni za ostvarenje vršnog događaja. Zatim se, po redu, svaki od ovih događaja razdvaja na sastavne delove da bi se otkrili oni događaji, uzroci i izvori koji doprinose pojavljivanju vršnog događaja. Pri konstruisanju stabla otkaza koriste se tri opšte kategorije simbola:

- simboli za događaje — simboli koji izražavaju prirodu događaja,

- simboli za logičke kapije — simboli koji izražavaju zahteve potrebne za pojavljivanje izlaznog događaja,

- simboli za prenos — simboli koji se koriste da bi se izbeglo dupliranje u stablu otkaza ili da bi se tok informacija preneo na drugu stranu.

Simboli koji se koriste za konstrukciju stabla otkaza prikazani su u literaturi [1].

Da bi konstrukcija stabla otkaza bila uspešna, potrebno je pridržavati se sledećih uputstava:

- 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,

- broj redova stabla na jednoj stranici ne treba da bude veći od četiri ili pet,

- sistem numerisanja događaja ispod vršnog treba da bude jasan i dosledan,

- treba koristiti simbole za prenos da bi se izbeglo dupliranje identičnih grana ili segmenata stabla, i da bi se smanjila složenost stabla koje se nalazi na jednoj stranici.

Zadatak kvalitativne analize stabla otkaza je određivanje »minimalnih preseka (odsečenih) skupova« i »minimalnih skupova staza« stabla otkaza. Odsečeni skup je skup osnovnih otkaza koji, uzeti zajedno, prouzrokuju neželjeni događaj. Ako su svi članovi odsečenog skupa ne samo dovoljni već i neophodni da bi doveli do pojave neželjenog događaja, takav skup se naziva minimalni presek skupa.

»Minimalna staza skupa« je najmanji skup događaja koji ne smeju da se dogode kako ne bi došlo do vršnog događaja. Skup staza je skup osnovnih uspeha koji su zajednički dovoljni da spreče pojavljivanje neželjenog događaja. Ako su svi članovi ovog skupa ne samo dovoljni već i neophodni za obezbeđenje uspeha, odnosno funkcionisanje sistema, onda se takav skup naziva minimalni skup staza.

Minimalni presek skupa i minimalna staza skupa predstavljaju dva ekvivalentna izvora informacija o stanju procesa, a saznanje o jednom ili drugom je dovoljno da se izračuna verovatnoća izabranog vršnog događaja.

Minimalni preseki skupova mogu se dobiti pomoću Bulovih jednačina. Da bi se sproveda analiza potrebno je svaki događaj u stablu otkaza obeležiti Bulovom promenljivom. Označavanje se vrši na sledeći način:

- T... (top-event) — vršni događaj,

- $G_i, i = 1, 2, \dots$ (gates) — posredni događaj,
- $E_j, j = 1, 2, \dots$ (events) — osnovni događaj,
- $P_n, n = 1, 2, \dots$ (primary events) — primarni osnovni događaj,
- $S_m, m = 1, 2, \dots$ (secondary events) — sekundarni bazni događaj.

Zatim se koristi prosti algoritam sa sledeća tri osnovna koraka:

- napišu se Bulove jednačine za svako logičko kolo,
- izvrši se zamena promenljivih njihovim izrazima sve dok se dobije vršni događaj kao funkcija samo osnovnih događaja,
- izvrši se redukcija dobijenog izraza korišćenjem pravila Bulove algebre.

Korišćenjem opisanog algoritma na kraju drugog koraka dobijaju se svi preseki skupova stabla, a na kraju trećeg koraka svi minimalni preseki skupova. Ovaj algoritam, mada sasvim jednostavan, nije efikasan za analizu složenijih stabala otkaza. Uvođenjem određenih modifikacija moguće je poboljšati njegovu efikasnost, a to su:

- odvojeno procesiranje nezavisnih podstabala,
- procesiranje stabla otkaza po stepenima.

Za realne složene sisteme razvijene su tehnike dobijanja minimalnih preseka skupova najvišeg ranga, odnosno minimalnih preseka skupova sa najmanjim brojem članova.

Određivanjem minimalnih preseka skupova ostvaren je prvi uslov za dobijanje kvantitativnih rezultata o stablu otkaza. Ti rezultati dobijaju se korišćenjem metoda teorije verovatnoće, odnosno teorije pouzdanosti. U analizi se, najčešće, polazi od utvrđivanja karakteristika pouzdanosti komponenti, a zatim minimalnih preseka skupova

na kraju, samog neželjenog vršnog događaja, odnosno sistema.

Svaki događaj na ulazu u I ili ILI kapiju ima svoje srednje vreme između otkaza ($MTBF$) ili intenzitet otkaza (λ), kao i vreme trajanja opravke ($MTTR$) ili intenzitet opravke (μ). Na osnovu ovih podataka može se odrediti pouzdanost elementa, odnosno verovatnoća događaja nekog otkaza na ulazu u I ili ILI kapiju.

Osnovni događaji u stablu otkaza biraju se tako da budu statistički nezavisni tj. da ostvarenje nekog od događaja ne utiče na verovatnoću nastanka drugog događaja. Verovatnoća da će rezultat biti takav da će se javiti na izlazu kapije I je proizvod verovatnoća svih ulaznih događaja. Za slučaj ILI kapije verovatnoća nastanka događaja na izlazu je suma verovatnoća događaja na ulazu. Ako događaji u stablu otkaza nisu uzajamno isključivi, u proračunima se vrše određene korekcije.

Kvantitativna analiza stabla otkaza razmatra se sa sledećih stanovišta:

- otkaza nepopravljivih elemenata sistema koji ulaze u logičku kapiju,
- otkaza popravljivih elemenata sistema koji ulaze u logičku kapiju.

Izrazi za izračunavanje verovatnoća pojavljivanja nezavisnih i zavisnih događaja za nepopravljive elemente sistema i neraspoloživosti događaja na izlazu iz logičkih kapija za popravljive elemente sistema, dati su u literaturi [1].

Stablo otkaza za vršni događaj »neispravan sistem za napajanje gorivom«

Dizel-motor sa uređajima predstavlja složen sistem u toku čijeg funkcionisanja postoji mogućnost pojave otkaza. Otkazi kod dizel-motora su raznovrsni i njihova klasifikacija može se izvršiti na način koji je naveden u literaturi [2]. Poseban problem predstav-

lja analiza otkaza, odnosno utvrđivanje efekta svakog pojedinačnog otkaza, njegovog uticaja na funkcionalne karakteristike motora, verovatnoća pojavljivanja pojedinih otkaza, kao i njihova međusobna uslovljenost. Za analizu otkaza kod dizel-motora uspešno se može primeniti metoda stabla otkaza.

Dizel-motor F4L413FR ugrađen je na motornom vozilu TAM 110 T7 B/BV koje je vrlo zastupljeno u Vojsci Jugoslavije. To je četvorotaktni motor sa direktnim ubrizgavanjem, vazдушnim hlađenjem i podmazivanjem prinudnom cirkulacijom ulja pod pritiskom.

Definisanje vršnih događaja i konstrukcija stabla otkaza

Da bi se mogla provesti metoda analize stabla otkaza neophodno je za navedeni sistem definisati vršne (top) događaje. U ovom slučaju vršni događaj je neželjeno stanje, odnosno stanje motora pri kojem on ne izvršava funkciju kriterijuma u okviru zadatih parametara. Izbor ovih događaja nije nimalo lak s obzirom na složenost motora kao sistema i na specifične uslove rada. Postavlja se pitanje načina otkrivanja otkaza definisanih vršnim događajem. U izboru vršnih događaja polazi se od onih koji se najčešće javljaju tokom eksploatacije, odnosno onih događaja koji se u tehničkim radionicama najčešće prijavljuju kao neispravnosti motora. Takođe, polazi se i od mogućnosti da ga otkrije rukovalac, bez korišćenja dijagnostičkih metoda i opreme. Kao ograničenje pri izboru vršnih događaja uzet je vid održavanja na kome se date neispravnosti mogu otkloniti. Definisaće se neispravnosti koje se mogu otkloniti u okviru lakog i srednjeg remonta. Za potrebe ovog rada definisan je vršni događaj »neispravan sistem za napajanje gorivom«.

Nakon definisanja vršnog (top) događaja pristupa se konstrukciji stabla otkaza. Da bi konstrukcija bila uspeš-

na, neophodno je prethodno upoznati se sa funkcijom, odnosno radom pojedinih elemenata sistema za napajanje gorivom. Na osnovu toga mogu se definisati otkazi elemenata koji dovode do pojave vršnog događaja. Za ovaj motor pri određivanju otkaza mogu se iskoristiti podaci koji su dati u literaturi [6]. Međutim, pošto su ti podaci nedovoljni i u sistemu održavanja u VJ ne vode se i statistički ne obrađuju podaci o otkazima ovog motora, određeni podaci mogu se dobiti konsultacijom sa stručnim licima koja se bave ovom problematikom.

Sistem za napajanje motora gorivom služi za dovod goriva iz rezervoara do pumpe za ubrizgavanje i da ubrizga određenu količinu goriva u cilindre motora pod određenim pritiskom u određenom trenutku, saglasno redosledu paljenja.

Sistem za napajanje gorivom motora F4L413FR prikazan je na slici 1.

Sl. 1 — Šema sistema za napajanje motora gorivom

1 — rezervoar za gorivo, 2 — predprečistač, 3 — ručna pumpa za gorivo, 4 — dobavna pumpa, 5 — fini prečistač, 6 — pumpa za ubrizgavanje goriva, 7 — brizgaljka, 8 — rezervoar za gorivo grejača kabine, 9 — elektromagnetni ventil, 10 — grejač usisnog vazduha, 11 — usisni kolektor, 12 — grejač kabine

Stablo otkaza za vršni događaj »neispravan sistem za napajanje gorivom« prikazano je na slikama 2, 3, 4. i 5.

Neispravnost sistema za napajanje gorivom ogleda se u neizvršavanju njegovog zadatka, odnosno u ubrizgavanju neodgovarajuće količine goriva ili u u-

galjka ne dobija odgovarajuću količinu goriva« nastaje usled gubitka goriva zbog »nezaptivenosti priključaka cevi visokog pritiska« ili zato što »pumpa za ubrizgavanje ne potiskuje dovoljno goriva«. »Neispravnost pumpe za ubrizgavanje«, »neispravnost regulatora bro-

Sl. 2 — Stablo otkaza za vršni događaj »neispravan sistem za napajanje gorivom«

brizgavanju goriva pod neodgovarajućim pritiskom ili u neubrizgavanju goriva u određenom trenutku. To su posredni događaji koji zahtevaju dalju razradu, a spojeni logičkom *ILI* kapijom grade vršni događaj. Brizgaljke treba da obezbede ubrizgavanje određene količine goriva u cilindre motora pod tačno određenim visokim pritiskom, da daju određeni oblik mlazu i da ga što bolje rasprše. Brizgaljka neće ubrizgati odgovarajuću količinu goriva ako je neispravna ili ako ne dobija odgovarajuću količinu goriva. »Neispravnost« brizgaljke, koja utiče na količinu ubrizganog goriva, ogleda se u »zaglavlivanju igle brizgaljke u otvorenom položaju« ili u »nezaptivenosti brizgaljke«. Posredni događaj »briz-

ja okretaja«, »nedovoljna količina goriva koju dobija pumpa za ubrizgavanje« i »neispravnost komandi pumpe za ubrizgavanje« su događaji koji proizvode posredni događaj »pumpa za ubrizgavanje ne potiskuje dovoljnu količinu goriva«.

Pumpa za ubrizgavanje goriva zajedno sa regulatorom broja obrtaja namenjena je da tačno u određeno vreme prema određenom redosledu, kroz brizgaljke ubrizga u cilindre motora odgovarajuću količinu goriva, u zavisnosti od opterećenja motora. Neispravnosti pumpe za ubrizgavanje koje dovode do neodgovarajuće količine potisnutog goriva su: »neispravnost ventila rasterećenja«, »neispravnost elementa pumpe«, »neodgovarajući hod zupčaste let-

ve« i »vazduh u pumpi za ubrizgavanje«. Ovi događaji, svaki za sebe, mogu prouzrokovati posredni događaj »neispravnost pumpe za ubrizgavanje« i zato čine ulaz u logičku *ILI* kapiju.

Vazduh u pumpi za ubrizgavanje može da se pojavi usled »neispravnos-

Ventil rasterećenja neće izvršavati svoju funkciju ukoliko otkaze opruga, pohabano je sedište ventila ili ventil ostane zaglavljen u otvorenom položaju. Potiskivanje goriva u pumpi za ubrizgavanje vrši klip elementa svojim translatornim kretanjem ka gornjoj

Sl. 3 — Stablo otkaza za vršni događaj »neispravan sistem za napajanje gorivom« (nastavak sl. 2)

ti prelivnog ventila« ili zbog »nezaptivenosti spojeva u instalaciji«. Ventil rasterećenja je namenjen da:

— razdvoji natklipni prostor pumpe od cevi visokog pritiska kada ne traje potiskivanje,

— u svom povratnom hodu rastereti prostor visokog pritiska i onemogućiti da, zbog reflektovanih talasa, dođe do naknadnog ubrizgavanja goriva,

— svojim rasterećenjem reguliše nivo stalnog pritiska u zapremini između ventila i brizgaljke i, na taj način, smanji zakašjenje između početka potiskivanja i početka ubrizgavanja goriva.

mrtvoj tački. Od položaja uzdužnog kanala klipa u odnosu na otvore u cilindru zavisice količina ubrizganog goriva. Ta se količina reguliše zakretanjem klipa u cilindru. »Pohaban klip«, »otkaz opruge elementa« i »nepodešen početak potiskivanja« su događaji koji spojeni logičkom *ILI* kapijom čine događaj »neispravan element pumpe«. »Nepodešenost početka potiskivanja« je posledica »nepodešenosti vijka za regulaciju« ili »velikih zazora između brega bregastog vratila i potiskivača (usled istrošenosti potiskivača)« ili »istrošenosti ležajeva bregastog vratila«.

»Neodgovarajući hod zupčaste letve« jeste događaj koji nastaje zbog »zaglavljivanja zupčaste letve« ili zbog »nepodešenog graničnika praznog hoda« ili zbog toga što je »nazubljeni segment nepravilno uzubljen sa zupčastom letvom«. Pomeranje zupčaste letve izaziva zakretanje klipa, što direktno utiče na količinu potisnutog, a time i ubrizganog goriva. Zbog toga, ako je pomeranje zupčaste letve neodgovarajuće, i količina potisnutog goriva biće neodgovarajuća.

Regulator broja obrtaja ima zadatak da podešava količinu goriva koja se ubrizgava u cilindre, zavisno od broja obrtaja i opterećenja motora, spreči prekid rada motora na praznom ho-

nost komande pumpe za ubrizgavanje« ili »zaglavljivanje poluge regulatora« utiču na pojavu nedovoljnog startnog punjenja pri pokretanju motora. Ukoliko oslabi ili pukne spoljna opruga u sklopu opruga regulatora ili je njen prednapon nepodešen, regulator neće regulisati količinu ubrizganog goriva na minimalnom broju obrtaja. Na eksploatacionom području količina ubrizganog goriva reguliše se pomeranjem zupčaste letve preko komande pumpe visokog pritiska. Međutim, otkaz ili nepodešen prednapon opruge za izjednačenje takođe mogu uticati na količinu ubrizganog goriva. Otkaz ili nepodešen prednapon srednje ili unutrašnje opruge u sklopu opruga regulatora dovode

Sl. 4 — Stablo otkaza za vršni događaj »neispravan sistem za napajanje gorivom« (nastavak sl. 3)

du i ograniči maksimalan broj obrtaja. Takođe, pri pokretanju motora mora obezbediti dodatno startno punjenje. »Neispravnost regulatora broja obrtaja« ogleda se u neizvršavanju ovih zadataka, tj. u neobezbeđenju startnog punjenja, u neregulisanju minimalnog i maksimalnog broja obrtaja i neregulisanju količine ubrizganog goriva na eksploatacionom području. »Neisprav-

do toga da regulator ne ograničava maksimalni broj obrtaja.

Pumpa za ubrizgavanje neće potiskivati dovoljnu količinu goriva ukoliko ne dobije dovoljnu količinu goriva, što se javlja u slučaju »zaprljanog prečistača goriva« ili »nezaptivenosti spojeva« ili zato što »dobavna pumpa ne potiskuje potrebnu količinu goriva«. »Neispravna dobavna pumpa«, »zaprljan

predprečistač goriva» i »prazan rezervoar za gorivo» uzroci su zbog kojih dobavna pumpa ne potiskuje potrebnu količinu goriva ka pumpi za ubrizgavanje. Pritisak ubrizgavanja goriva određen je prednaponom opruge u brizgaljci. Pritisak ubrizgavanja i veličina otvora na brizgaljci utiču na kvalitet raspršivanja goriva, a time i na proces sagorevanja. Otkaz ili nepodešen prednapon opruge u brizgaljci osnovni su faktori koji utiču na veličinu pritiska

gorevanja 10° KV posle GMT. Ubrizgavanje goriva u određenom trenutku izostaje zbog »nepodešenog početka potiskivanja elementa«, »nepodešenog ugla predubrizgavanja pumpe« ili zbog »neispravnog regulatora početka ubrizgavanja«. Pri povećanju broja obrtaja kolenastog vratila motora smanjuje se vreme za sagorevanje pa je potrebno ranije ubrizgati gorivo u cilindre, što obavlja regulator početka ubrizgavanja.

Sl. 5 — Stablo otkaza za vršni događaj »neispravan sistem za napajanje gorivom« (nastavak sl. 4)

ubrizgavanja. Pored njih, određen uticaj imaju i hod igle brizgaljke i površina protočnog preseka otvora brizgaljke.

Momenat ubrizgavanja utiče na period pritajenog sagorevanja, a preko njega i na ceo tok sagorevanja. Pri suviše ranom ubrizgavanju period pritajenog sagorevanja se povećava, rad motora je ekonomičan, ali bučan, i praćen velikim mehaničkim naprezanjima. Pri suviše malom uglu predubrizgavanja rad motora je mekan, bešuman ali je neekonomičan. Najpovoljniji ugao predubrizgavanja je onaj koji omogućava dostizanje maksimalnog pritiska sa-

Kvalitativna i kvantitativna analiza konstruisanog stabla otkaza

Nakon završene konstrukcije i usvajanja stabla otkaza obavlja se njegova kvalitativna i kvantitativna analiza. S obzirom na to da je stablo otkaza za navedeni vršni događaj detaljno razrađeno, izvršiće se njegova redukcija da bi se analiza uprostila. Pri ovoj redukciji stablo otkaza ne gubi na svom kvalitetu, jer su nerazrađeni otkazi sa veoma malom verovatnoćom ili otkazi koji se pojavljuju kao otkazi

sklopa čija bi razrada činila analizu glomaznijom. Redukovano stablo otkaza prikazano je na slici 6. Kvalitativna analiza obavljaće se pomoću pravila Bulove algebre. Da bi se analiza mogla sprovesti, potrebno je označiti sve događaje u stablu otkaza. Spisak događaja sa oznakama dat je u tabeli 1.

Tabela 1

Spisak događaja sa oznakama za stablo otkaza prikazano na slici 6

Redni broj	Oznaka događaja	DOGAĐAJ
1.	T	neispravnost sistema za napajanje gorivom
2.	G ₁	brizgaljka ne ubrizgava odgovarajuću količinu goriva
3.	G ₂	neodgovarajući pritisak u brizganog goriva
4.	G ₃	neubrizgavanje goriva u određenom trenutku
5.	G ₄	brizgaljka ne dobija odgovarajuću količinu goriva
6.	G ₅	pumpa za ubrizgavanje ne potiskuje dovoljnu količinu goriva
7.	G ₆	neispravna pumpa za ubrizgavanje
8.	G ₇	pumpa za ubrizgavanje ne dobija dovoljnu količinu goriva
9.	G ₈	neispravan regulator broja obrtaja
10.	G ₉	neispravan ventil rasterećenja
11.	G ₁₀	neispravan element pumpe
12.	G ₁₁	dobavna pumpa ne potiskuje dovoljnu količinu goriva
13.	G ₁₂	regulator ne reguliše minimalan broj obrtaja
14.	G ₁₃	regulator ne reguliše količinu ubrizganog goriva na ekspl. području
15.	G ₁₄	regulator ne ograničava maksimalan broj obrtaja
16.	P ₁	neispravna brizgaljka
17.	P ₂	otkaz opruge u brizgaljci
18.	P ₃	neispravan regulator početka ubrizgavanja

Redni broj	Oznaka događaja	DOGAĐAJ
19.	P ₄	zaprljan prečistač goriva
20.	P ₅	otkaz opruge u ventilu rasterećenja
21.	P ₆	pohabano sedište ventila rasterećenja
22.	P ₇	pohaban klip
23.	P ₈	otkaz opruge elementa
24.	P ₉	zaprljan predprečistač goriva
25.	P ₁₀	neispravna dobavna pumpa
26.	P ₁₁	otkaz spoljne opruge u regulatoru
27.	P ₁₂	otkaz opruge izjednačenja
28.	P ₁₃	otkaz srednje opruge
29.	P ₁₄	otkaz unutrašnje opruge
30.	S ₁	nepodešen prednapon opruge
31.	S ₂	nepodešen početak potiskivanja elementa
32.	S ₃	nepodešen ugao ubrizgavanja pumpe
33.	S ₄	gubitak goriva usled nezaptivenosti
34.	S ₅	neispravne komande pumpe za ubrizgavanje
35.	S ₆	vazduh u pumpi za ubrizgavanje
36.	S ₇	neodgovarajući hod zupčaste letve
37.	S ₈	nezaptivenost spojeva
38.	S ₉	nedovoljno startno punjenje
39.	S ₁₀	otvoren ventil rasterećenja
40.	S ₁₁	nepodešen početak ubrizgavanja elementa
41.	S ₁₂	prazan rezervoar za gorivo
42.	S ₁₃	nepodešen prednapon spoljne opruge
43.	S ₁₄	neispravne komande pumpe za ubrizgavanje
44.	S ₁₅	nepodešen prednapon opruge izjednačenja
45.	S ₁₆	nepodešen graničnik poluge
46.	S ₁₇	nepodešen prednapon srednje i unutrašnje opruge

Prvi korak u analizi je formiranje jednačina za svaku logičku kapiju.

Za prikazano stablo otkaza jednačine su:

$$\begin{aligned} T &= G_1 + G_2 + G_3 \\ G_1 &= P_1 + G_4 \\ G_2 &= P_2 + S_1 \\ G_3 &= S_2 + S_3 + P_3 \\ G_4 &= S_4 + G_5 \\ G_5 &= G_6 + G_7 + G_8 + S_5 \\ G_6 &= S_6 + G_9 + G_{10} + S_7 \\ G_7 &= P_4 + G_{11} + S_8 \\ G_8 &= S_9 + G_{12} + G_{13} + G_{14} \\ G_9 &= P_5 + P_6 + S_{10} \\ G_{10} &= P_7 + P_8 + S_{11} \\ G_{11} &= S_{12} + P_9 + P_{10} \\ G_{12} &= P_{11} + S_{13} \\ G_{13} &= S_{14} + P_{12} + S_{15} \\ G_{14} &= P_{13} + S_{16} + P_{14} + S_{17} \end{aligned}$$

Kada su formirane sve jednačine, završen je prvi korak analize i pristupa se sprovođenju drugog koraka, odnosno promenljive se zamenjuju njihovim izrazima sve dok se ne dobije vršni događaj kao funkcija samo osnovnih događaja. Zamena promenljivih njihovim izrazima ima sledeći tok:

$$\begin{aligned} G_8 &= S_9 + P_{11} + S_{13} + S_{14} + P_{12} + S_{15} + P_{13} + \\ &\quad + S_{16} + P_{14} + S_{17} \\ G_7 &= P_4 + S_{12} + P_{10} + P_9 + S_8 \\ G_6 &= S_6 + P_5 + S_{10} + P_6 + S_{11} + P_7 + P_8 + S_7 \\ G_5 &= S_6 + P_5 + S_{10} + P_6 + S_{11} + P_7 + P_8 + S_7 + \\ &\quad + P_4 + S_{12} + P_{10} + S_8 + P_9 + S_9 + S_{13} + \\ &\quad + P_{11} + S_{14} + P_{12} + S_{15} + P_{13} + S_{16} + P_{14} + \\ &\quad + S_{17} + S_5 \\ G_4 &= S_4 + S_6 + P_5 + S_{10} + P_6 + S_{11} + P_7 + P_8 + \\ &\quad + S_7 + P_4 + S_{12} + P_{10} + S_8 + P_9 + S_9 + \\ &\quad + S_{13} + P_{11} + S_{14} + P_{12} + S_{15} + P_{13} + S_{16} + \\ &\quad + P_{14} + S_{17} + S_5 \\ G_1 &= P_1 + S_4 + S_6 + P_5 + S_{10} + P_6 + S_{11} + P_7 + \\ &\quad + P_8 + S_7 + P_4 + S_{12} + P_{10} + S_8 + P_9 + \\ &\quad + S_9 + S_{13} + P_{11} + S_{14} + P_{12} + S_{15} + P_{13} + \\ &\quad + S_{16} + P_{14} + S_{17} + S_5 \\ T &= P_1 + S_6 + S_4 + P_5 + S_{10} + P_6 + S_{11} + P_7 + \\ &\quad + S_7 + P_8 + P_4 + S_{12} + P_{10} + S_8 + P_9 + \\ &\quad + S_9 + S_{13} + P_{11} + S_{14} + P_{12} + S_{15} + P_{13} + \\ &\quad + S_{16} + P_2 + S_1 + S_2 + S_3 + P_3 + P_{14} + \\ &\quad + S_{17} + S_5 \end{aligned}$$

Na kraju drugog koraka dobijaju se svi preseki skupova stabla otkaza. Da bi se dobili minimalni preseki skupova, potrebno je izvršiti redukciju dobijenog izraza korišćenjem pravila Bulove algebre. U ovom slučaju redukcija nije moguća, što znači da su u drugom koraku dobijeni minimalni preseki skupova. Za konstrukciju stabla otkaza upotrebljene su samo logičke *ILI* kapije, tako da se u Bulovim jednačinama pojavljuje samo operacija sabiranja. Na taj način kvalitativna analiza u svom rezultatu ima onoliko minimalnih preseka skupova koliko ima početnih događaja. Svi dobijeni minimalni preseki skupova su istog ranga, jer se sastoje od samo jednog člana. Minimalni skupovi staza dobijaju se zamenom početnog stabla otkaza dualnim. U ovom slučaju umesto logičkih *ILI* kapija figurirale bi logičke *I* kapije. Na osnovu toga može se zaključiti da postoji samo jedan minimalni skup staza, koji i nije minimalan, jer uključuje sve početne događaje. Ako su stabla otkaza konstruisana uz upotrebu samo jedne vrste logičkih kapija, provođenje kvalitativne analize ne daje rezultate od praktične vrednosti.

Kvantitativna analiza prikazanog stabla otkaza razmatra se sa stanovišta otkaza popravljivih elemenata sistema koji ulaze u logičku kapiju. To znači da za svaki događaj na ulazu treba odrediti intenzitet otkaza (λ) i intenzitet opravke (μ). Za događaj na izlazu iz kapije, kao i za vršni događaj, računa se njegova verovatnoća pojavljivanja. U ovom slučaju, verovatnoća pojavljivanja vršnog događaja predstavlja neraspoloživost sistema, jer vršni događaj predstavlja neželjeno stanje sistema. Dobija se verovatnoća da sistem u datom trenutku vremena neće obavljati svoju funkciju u zadovoljavajućim granicama funkcije kriterijuma. Najveća prepreka provođenju kvantitativne analize je obezbeđenje verodostojnih podataka. Pošto se nisu mogli obezbediti svi potrebni podaci za spro-

vođenje analize stabla u potpunosti, bilo je nužno redukovati stablo otkaza u skladu sa raspoloživim podacima. Redukovano stablo otkaza prikazano je

gde je:

U_0 — neraspoloživost događaja na izlazu iz *ILI* kapije,

Sl. 6 — Redukovano stablo otkaza za kvalitativnu analizu

na slici 7, a spisak događaja za takvo stablo dat je u tabeli 2.

Neraspoloživost početnih događaja izračunava se po formuli:

$$U_i = 1 - A_u = 1 - \frac{\mu}{\mu + \lambda} = \frac{\lambda_i}{\mu_i + \lambda_i}$$

gde je:

λ — konstantni intenzitet otkaza i-tog elementa (za eksponencijalnu raspodelu),

μ — konstantni intenzitet opravke.

Neraspoloživost posrednih događaja i vršnog događaja računa se po formuli:

$$U_0 = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - U_i) \quad i=1, 2, \dots, n$$

U_i — neraspoloživost i-tog nezavisnog događaja otkaza na ulazu u *ILI* kapiju.

Podaci za intenzitete otkaza sa kojima se vršio proračun uzeti su iz literature [3] ili su dobijeni prognoziranjem uz korišćenje koeficijenata navedenih u literaturi [2, 3, 4]. Podaci za intenzitete opravke dobijeni su proračunom po obrascu:

$$\mu = \frac{1}{MTTR}$$

gde je:

MTTR — srednje vreme opravke.

Navedeni izraz vredi samo u slučaju eksponencijalne raspodele. Vred-

Sl. 7 — Redukovano stablo otkaza za kvantitativnu analizu

nosti za MTTR uzete su iz literature [5] ili su dobijene konsultacijom sa stručnim licima. Kao rezultat kvantitativne analize dobija se neraspoloživost vršnog događaja $U_T=0,0715$, što znači da postoji verovatnoća od 7,15% da sistem za napajanje u određenom trenutku n vremena t neće izvršavati svoju funkciju u zadovoljavajućim granicama funkcije kriterijuma, odnosno u sistemu će postojati neispravnost koja će rezultirati nepravilnim radom sistema. S obzirom na to da podaci za proračun (tabela 2) nisu verodostojni, ova analiza može da posluži samo kao primer sprovođenja kvantitativne analize.

Tabela 2

Spisak događaja za stablo otkaza prikazano na slici 7.

Red. br.	oznaka	naziv događaja	μ [opr/h]	$\lambda \times 10^{-3}$ [o/h]	$U_i \times 10^{-3}$
1.	T	neispravan sistem za napajanje gorivom	/	/	71,5
2.	G ₁	neodgovarajuća količina ubrizganog goriva	/	/	29,9
3.	G ₂	neodgovarajući pritisak ubrizganog goriva	/	/	35
4.	G ₃	neodgovarajući trenutak ubrizgavanja goriva	/	/	8,18
5.	G ₄	brizgaljka ne dobija odgovarajuću količinu goriva	/	/	24
6.	P ₁	neispravna brizgaljka	2	12,28	6,11
7.	P ₂	otkaz opruge u brizgaljci	0,4	7,2	17,168
8.	P ₃	neispravan regulator početka ubrizgavanja	0,2	1,44	7,148
9.	P ₄	zaprljan prečistač goriva	3,33	46,77	13,85
10.	P ₅	neispravna dobavna pumpa	0,67	0,368	0,549
11.	P ₆	neispravna pumpa za ubrizgavanje sa regulatorom	0,67	1	1,49
12.	S ₁	nepodešen prednapon opruge u brizgaljci	1,11	20,574	18,198
13.	S ₂	nepodešen početak ubrizgavanja	1,33	1,39	1,044
14.	S ₃	nezaptivenost spojeva	1	8,42	8,34
15.	S ₄	neispravne komande pumpe za ubrizgavanje	0,5	0,1	0,219

Umesto zaključka

Metoda stabla otkaza je metoda analize pouzdanosti sistema kojom se povećava nivo kvalitativnog znanja o sistemu koji se analizira. Krajnji rezultat analize stabla otkaza je razumevanje analiziranog sistema u takvom obliku da omogućuje:

- identifikaciju potencijalnih otkaza koji bi se desili u podsistemima ili sistemu,

- kvantitativno izraženo znanje o sistemu,

- potpune opise »uzrok i posledica«,

- pravilan inženjerski sud o tome kako, zašto i sa kojom frekvencijom otkazuje sistem,

- korišćenje analize po osnovnim pravcima u sistemu, na osnovu koje je moguće odrediti uticaj promena na sistem ili primenu sistema.

Metoda stabla otkaza može se primeniti za analizu pouzdanosti sistema u toku njegovog celokupnog ciklusa. U fazi projektovanja može se primeniti u predviđanju mogućih otkaza sistema i otkrivanju slabih mesta još u projektu. U fazi eksploatacije koristi se za ocenu pogodnosti za održavanje ili za projekte sistema održavanja tehničkih sistema. Ona je korisno dijagnostičko sredstvo, a služi za predviđanje najverovatnijih uzroka otkaza sistema u slučaju da je do njega došlo.

Stablo otkaza je pogodno sredstvo za prezentaciju ili argumentovanje usvojenih ili predloženih rešenja za poboljšanje pouzdanosti sistema i olakšava analizu pouzdanosti složenih sistema. Stablo otkaza se konstruiše sa ciljem simboličkog predstavljanja događaja koji mogu dovesti do pojave neispravnosti, čime se omogućava lakše uočavanje slabih mesta u sistemu.

Za dizel-motor F4L413FR definisan je jedan vršni događaj i konstruisano je stablo otkaza za njega. To nisu svi neželjeni događaji na motoru koji bi se mogli definisati kao vršni. U literaturi [7] definisano je šest vršnih događaja, ali ni time spisak vršnih događaja nije konačan. Takođe, za pojedine sisteme na motoru nisu, pri konstrukciji stabla otkaza, uzeti u obzir svi mogući otkazi tih sistema već samo oni koji mogu biti uzroci pojave vršnog događaja. Pri konstrukciji stabala otkaza korištene su *ILI* logičke kapije, što nikako ne umanjuje vrednost stabala, već govori o nedostatku kvantitativnih pokazatelja za pojedine otkaze elemenata sistema. Snažna baza podataka potrebna je ne samo za konstruisanje, već i za kvalitativnu analizu, što sistem održavanja TMS u Vojsci Jugoslavije ne pruža u dovoljnoj meri. Najveći problem pri sprovođenju analize stabla otkaza predstavlja obezbeđenje podataka o pouzdanosti komponenti sistema. Analiza stabla otkaza za realne sisteme nesumljivo je uslovljena primenom računara, odnosno postojanjem odgovarajuće softverske podrške.

Analizom konstruisanog stabla mogu se uočiti kritični ili manje pouzdani sastavni delovi motora i predložiti njihova modifikacija. Najširu primenu metoda stabla otkaza treba da ima u okviru sistema održavanja i to kao dijagnostičko sredstvo za lokalizaciju otkaza. To znači da se pri utvrđivanju uzroka pojavljivanja nekog neželjenog stanja sistema može iskoristiti konstruisano stablo otkaza. Pri tome bi se, prateći puteve otkaza od vršnog događaja ka početnim događajima, otkrio uzrok pojave neželjenog stanja sistema. Analizom stabla otkaza može se ustanoviti za koje je komponente sistema potrebna provera parametara stanja merenjem i, na osnovu toga, predložiti modifikacije za poboljšanje pogodnosti za dijagnostiku.

Analiza pouzdanosti metodom stabla otkaza zahteva znatne troškove. Međutim, ukoliko se njenim sprovođenjem postigne povećanje pouzdanosti i

pogodnosti za održavanje, primena metode stabla otkaza sasvim je opravdana.

Literatura:

- [1] Ivanović G. i dr.: Pouzdanost-analiza i projektovanje, TU SSNO, Beograd, 1988.
- [2] Todorović J. i dr.: Efektivnost sistema u mašinstvu, Naučna knjiga, Beograd, 1981.
- [3] Muždeka S.: Logistika, TU SSNO, Beograd, 1981.
- [4] Adamović Ž.: Logistički sistem održavanja, Privredni pregled, Beograd, 1989.
- [5] Nadležnost jedinica-ustanova za tehničko održavanje i srednji remont za izvođenje radova sa jedinstvenim normativom vremena, TU SSNO, Beograd, 1975.
- [6] Automobil TAM 110 T7 B/BV, TU SSNO, Beograd, 1986.
- [7] Milićević M.: Analiza otkaza dizel motora metodom stabla otkaza (diplomski rad), CVTŠ KoV JNA, Zagreb, 1990.