Ljubiša Brkić,
potpukovnik, dipl. inž.
VP 3001 Beograd
Dr Božidar Krstić,
docent, dipl. inž.
Mašinski fakultet,
Kragujevac

ANALIZA POGONSKOG MOTORA VOZILA SPECIJALNE NAMENE, SA ASPEKTA POJAVE NEISPRAVNOSTI, PRIMENOM METODE STABLA OTKAZA

UDC: 621.423.004.15:623.437/.438

Rezime:

Primenom metode stabla otkaza analizirane su pojave neispravnosti pogonskog motora vozila specijalne namene. Sa aspekta pojave neispravnosti, u periodu od pet godina, praćena su 532 vozila specijalne namene. To su vozila koja prelaze vrlo mali broj kilometara godišnje, a od njih se zahteva visoka raspoloživost. Zbog toga je posebno važno da se odrede parametri pouzdanosti njihovih sastavnih delova, kao i vozila u celini.

Ključne reči: pouzdanost, otkaz, raspoloživost, vozilo, stablo otkaza.

ANALYSIS OF A SPECIAL-PURPOSE VEHICLES ENGINE FROM THE ASPECT OF INCORRECTNESS

Summary:

Using the failure tree method, the analysis of special-purpose vehicles engine is done from the aspect of incorrectness appearance. The behaviour of 532 vehicles was followed from the aspect of incorrectness appearance in the period of five years. These are vehicles which cross a little number of kilometers over a year, because of their purpose, but they must have high availability. For that reason, a specially important task is to determine reliability parameters of their constituent parts and a complete vehicle as well.

Key words: reliability, failure, availability, vehicle, failure tree.

Uvod

Cilj formiranja stabla otkaza vozila jeste utvrđivanje njegovih kritičnih delova, za poznate uslove korišćenja i održavanja. Analiza stabla otkaza je deduktivna metoda. Prvo se definiše tzv. vršni događaj, a zatim analizira uticaj pouzdanosti pojedinih delova na ukupnu pouzdanost vozila. Osnova ove metode je tzv. stablo otkaza kojim se simbolički opisuju logičke relacije između događaja [1].

Neželjeni (vršni) događaji otkrivaju se induktivnom analizom. Kvalitativnim definisanjem neželjenog do-

gađaja otpočinje ova analiza, a zatim se ide unazad kroz konfiguraciju sistema da bi se pronašli otkazi delova sistema i greške koje mogu dovesti do pojave otkaza. Stablo otkaza predstavlja grafički prikaz odnosa između specifičnih događaja i ukazuje na pojave neželjenog događaja pod njihovim uticajem [1].

Redosled događaja koji mogu prozrokovati neželjeni događaj predstavljaju grane stabla, tzv. moguće puteve njegove pojave. Svi logični redosledi događaja otpočinju sa neželjenim vršnim događajem.

Stablo otkaza nije metod koji uključuje sve moguće otkaze već samo one koji mogu izazvati vršni događaj i čija je pojava najverovatnija. Kada se odredi takav događaj u sledećem nižem nivou stabla unose se oni događaji koji mogu da prouzrokuju vršni događaj. U sledećem nižem nivou svaki od ovih događaja grana se na one koji mogu, preko ovih događaja, uticati na njegovu pojavu, dok se ne dođe do sastavnih delova ili bazičnih događaja [2].

Analiza stabla otkaza obavlja se od vršnog do bazičnog događaja. Kvantitativna analiza stabla otkaza nije moguća ako su nepoznati parametri pouzdanosti komponenata stabla otkaza. Na osnovu rezultata dobijenih analizom stabla otkaza daju se preporuke za preduzimanje potrebnih aktivnosti radi smanjenja pojava neispravnosti i povećanja pouzdanosti vozila.

Za analizu pouzdanosti vozila, sa aspekta pojave otkaza u toku eksploatacije, pogodno je primeniti analizu stabla otkaza, čija je primena moguća u svim fazama njegovog životnog ciklusa [1].

Metoda analize stabla otkaza omogućava određivanje svih potencijalno mogućih otkaza i njihovih uzroka koji mogu dovesti do otkaza vozila kao sistema [2].

Analizom mogućih potencijalnih otkaza i njihovih uzroka moguće je predvideti preventivne postupke održavanja vozila radi povećanja njegove pouzdanosti, odnosno obezbeđenja zahtevane pouzdanosti u toku eksploatacije vozila.

U ovom radu izvršena je konstrukcija stabla otkaza odabranog pogonskog motora, kvalitativna i kvantitativna analiza, određena pouzdanost motora na osnovu verovatnoće vršnog događaja i date preporuke za preduzimanje preventivnih mera radi smanjenja pojave otkaza i povećanja pouzdanosti.

Formiranje stabla otkaza motora

Struktura stabla otkaza za vršni događaj — otkaz vozila prikazana je na slici 1 sa koje se vidi da će doći do otkaza vozila ukoliko dođe do otkaza jednog ili više njegovih sistema.

Sl. 1 — Struktura stabla otkaza za vršni događaj — otkaz vozila

Do otkaza motora doći će ako dođe do pojave otkaza jednog ili više njegovih mehanizama i uređaja, što je prikazano na slici 2. Otkaz motornog

mehanizma nastaje ako dođe do otkaza nekog od njegovih delova, što je prikazano na slici 3.

Sl. 2 — Struktura stabla otkaza za vršni događaj — otkaz motora

Sl. 3 — Struktura stabla otkaza za vršni događaj — otkaz motornog mehanizma

Do otkaza razvodnog mehanizma motora može doći ako nastupi otkaz nekog od njegovih delova, što je prikazano na slici 4. Otkaz uređaja za

podmazivanje nastaje ako dođe do otkaza nekog od njegovih delova, što je prikazano na slici 5.

Sl. 4 — Struktura stabla otkaza za vršni događaj — otkaz razvodnog mehanizma

Sl. 5 — Struktura stabla otkaza za vršni događaj — otkaz uređaja za podmazivanje

Otkaz uređaja za napajanje gorivom nastaje ako dođe do otkaza jednog od njegovih delova, što je prikazano na slici 6.

Otkaz uređaja za hlađenje nastaje ako dođe do otkaza jednog od njegovih delova, što je prikazano na slici 7.

Otkaz uređaja za paljenje nastaje ako dođe do otkaza jednog od njegovih delova, što je prikazano na slici 8.

Kvantitativna analiza stabla otkaza

Na osnovu pravila Bulove algebre događaja i strukture stabla otkaza za

vršni događaj — otkaz vozila može se napisati [2]:

$$D = D_{Po1} \cup D_{Po2} \cup D_{Po3} \cup D_{Po4} \cup D_{Po5} \cup D_{Po6} \quad (1)$$

a verovatnoća otkaza vozila može se izraziti u obliku [3]:

$$P = P_{Po1} + P_{Po2} + P_{Po3} + P_{Po4} + P_{Po5} + P_{Po6} - \sum_{i=1}^{6-1} \sum_{j=i+1}^6 P_{Poi} \cdot P_{Poj} \quad (2)$$

gde je:

D, P — vršni događaj (otkaz vozila) i verovatnoće otkaza vozila,

D_{Poi}, P_{Poi} — otkaz i verovatnoća pojave otkaza na i -toj kapiji.

Sl. 6 — Struktura stabla otkaza za vršni događaj — otkaz uređaja za napajanje gorivom

Sl. 7 — Struktura stabla otkaza za vršni događaj — otkaz uređaja za hlađenje

Sl. 8 — Struktura stabla otkaza za vršni događaj — otkaz uređaja za paljenje

Oznaka $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ ima respektivno sledeće značenje: motor, sistem za prenos snage, hodni sistem, sistem za kočenje, upravljački sistem i sistem elektro-instalacije.

Uz pretpostavku da se svi događaji na ulazu u ILI kapiju međusobno isključuju, odnosno da su njihovi preseki događaja, tj. proizvodi njihovih verovatnoća jednaki nuli, jednačina (2) može se sa dovoljnom tačnošću napisati u obliku [2]:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 \quad (3)$$

Analogno prethodnoj metodologiji može se napisati izraz za određivanje verovatnoće pojave otkaza pogonskog motora u obliku:

$$P_1 = \sum_{j=1}^6 P_{1j} \quad (4)$$

gde oznaka $j=1, 2, 3, 4, 5, 6$ ima respektivno sledeće značenje: motorski mehanizam, razvodni mehanizam, uređaj za podmazivanje, uređaj za napajanje gorivom, uređaj za hlađenje i uređaj za paljenje.

Verovatnoća pojave otkaza motornog mehanizma može se napisati u obliku:

$$P_{11} = \sum_{k=1}^7 P_{11k} \quad (5)$$

gde oznaka $k=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ ima respektivno sledeće značenje: klip, klipnjača, blok, radilica, cilindar, glava cilindra, klipni prstenovi.

Uzimajući u obzir prethodno navedeno može se napisati konačan izraz za određivanje verovatnoće pojave otkaza motornog mehanizma u obliku:

$$P_{11} = 4P_{1.1.1} + 4P_{1.1.2.1} + 4P_{1.1.2.2} + P_{1.1.3} + P_{1.1.4} + 4P_{1.1.5} + 4P_{1.1.6.1} + 8P_{1.1.6.2} + 8P_{1.1.6.3} + 4P_{1.1.6.4} + 16P_{1.1.7} \quad (6)$$

gde je:

- $P_{1.1.1}$ — verovatnoća otkaza klipa,
- $P_{1.1.2.1}$ — verovatnoća otkaza ležaja velike pesnice,
- $P_{1.1.2.2}$ — verovatnoća otkaza ležaja male pesnice,
- $P_{1.1.3}$ — verovatnoća otkaza bloka motora,
- $P_{1.1.4}$ — verovatnoća otkaza radilice,
- $P_{1.1.5}$ — verovatnoća otkaza cilindra,
- $P_{1.1.6.1}$ — verovatnoća otkaza glave cilindra,
- $P_{1.1.6.2}$ — verovatnoća otkaza vođica ventila,
- $P_{1.1.6.3}$ — verovatnoća otkaza sedišta ventila,
- $P_{1.1.6.4}$ — verovatnoća otkaza zaptivača glave,
- $P_{1.1.7}$ — verovatnoća otkaza klipnih prstenova.

Verovatnoća pojave otkaza razvodnog mehanizma može se izraziti u obliku:

$$P_{12} = P_{1.2.1.1} + 5P_{1.2.1.2} + P_{1.2.1.3} + 8P_{1.2.2.1} + 8P_{1.2.2.2} + 8P_{1.2.2.3} + 16P_{1.2.2.4} + 8P_{1.2.2.5} \quad (7)$$

gde je:

- $P_{1.2.1.1}$ — verovatnoća otkaza zupčanika bregastog vratila,
- $P_{1.2.1.2}$ — verovatnoća otkaza ležajeva bregastog vratila kojih ima 5 i pretpostavljamo da su im verovatnoće jednake,
- $P_{1.2.1.3}$ — verovatnoća otkaza bregastog vratila,
- $P_{1.2.2.1}$ — verovatnoća otkaza podizača ventila (ima ih 8),
- $P_{1.2.2.2}$ — verovatnoća otkaza šipke podizača (ima ih 8),
- $P_{1.2.2.3}$ — verovatnoća otkaza klackalica (ima ih 8),
- $P_{1.2.2.4}$ — verovatnoća otkaza opruga ventila (ima ih 16),
- $P_{1.2.2.5}$ — verovatnoća otkaza ventila (ima ih 8).

Verovatnoća pojave otkaza uređaja za podmazivanje može se izraziti u obliku:

$$P_{1.3}=P_{1.3.1}+P_{1.3.2.1}+P_{1.3.2.2}+P_{1.3.2.3}+P_{1.3.2.4}+P_{1.3.3} \quad (8)$$

gde je:

- $P_{1.3.1}$ — verovatnoća otkaza kartera za ulje,
- $P_{1.3.2.1}$ — verovatnoća otkaza zupčanika za pogon pumpe za ulje,
- $P_{1.3.2.2}$ — verovatnoća otkaza zaptivača pumpe za ulje,
- $P_{1.3.2.3}$ — verovatnoća otkaza zupčastog para pumpe za ulje,
- $P_{1.3.2.4}$ — verovatnoća otkaza ventila za regulisanje pritiska ulja,
- $P_{1.3.3}$ — verovatnoća otkaza cevovoda za ulje.

Verovatnoća pojave otkaza uređaja za napajanje gorivom može se izraziti u obliku:

$$P_{1.4}=P_{1.4.1.1}+P_{1.4.1.2}+P_{1.4.1.3}+2P_{1.4.2.1}+4P_{1.4.2.2}+4P_{1.4.2.3}+4P_{1.4.2.4}+4P_{1.4.2.5.1}+4P_{1.4.2.5.2}+4P_{1.4.2.5.3}+P_{1.4.2.6}+P_{1.4.3.1}+P_{1.4.3.2}+P_{1.4.4}+4P_{1.4.5.1}+4P_{1.4.5.2} \quad (9)$$

gde je:

- $P_{1.4.1.1}$ — verovatnoća otkaza opruge pumpe niskog pritiska,
- $P_{1.4.1.2}$ — verovatnoća otkaza ventila pumpe niskog pritiska,
- $P_{1.4.1.3}$ — verovatnoća otkaza klipa pumpe niskog pritiska,
- $P_{1.4.2.1}$ — verovatnoća otkaza ležaja pumpe visokog pritiska (2),
- $P_{1.4.2.2}$ — verovatnoća otkaza opruge elemenata pumpe visokog pritiska (ima ih 4),
- $P_{1.4.2.3}$ — verovatnoća otkaza podizača elemenata pumpe (ima ih 4),
- $P_{1.4.2.4}$ — verovatnoća otkaza opruge elemenata pumpe (ima ih 4),
- $P_{1.4.2.5.1}$ — verovatnoća otkaza sedišta potisnog ventila (ima ih 4),

- $P_{1.4.2.5.2}$ — verovatnoća otkaza opruge potisnog ventila (ima ih 4),
- $P_{1.4.2.6}$ — verovatnoća otkaza zupčaste letve,
- $P_{1.4.3.1}$ — verovatnoća otkaza opruge regulatora pumpe visokog pritiska,
- $P_{1.4.3.2}$ — verovatnoća otkaza ležaja regulatora,
- $P_{1.4.5.1}$ — verovatnoća otkaza opruge brizgaljke,
- $P_{1.4.5.2}$ — verovatnoća otkaza elemenata brizgaljke.

Verovatnoća otkaza uređaja za hlađenje može se izraziti u obliku:

$$P_{1.5}=P_{1.5.1.1}+P_{1.5.1.2}+2P_{1.5.1.3}+P_{1.5.2} \quad (10)$$

gde je:

- $P_{1.5.1.1}$ — verovatnoća otkaza remena za pogon ventilatora,
- $P_{1.5.1.2}$ — verovatnoća otkaza rotora ventilatora,
- $P_{1.5.1.3}$ — verovatnoća otkaza ležaja ventilatora,
- $P_{1.5.2}$ — verovatnoća otkaza hladnjaka za ulje.

Verovatnoća otkaza uređaja za paljenje može se izraziti u obliku:

$$P_{1.6}=P_{1.6.1}+P_{1.6.2}+P_{1.6.3}+P_{1.6.4.1}+2P_{1.6.4.2}+2P_{1.6.4.3}+10P_{1.6.4.4}+P_{1.6.4.5}+P_{1.6.4.6}+P_{1.6.4.7} \quad (11)$$

gde je:

- $P_{1.6.1}$ — verovatnoća otkaza prekidača za paljenje,
- $P_{1.6.2}$ — verovatnoća otkaza instalacije za paljenje
- $P_{1.6.3}$ — verovatnoća otkaza elektromagnetnog prekidača,
- $P_{1.6.4.1}$ — verovatnoća otkaza četkica elektropokretača,
- $P_{1.6.4.2}$ — verovatnoća otkaza ležajeva elektropokretača,
- $P_{1.6.4.3}$ — verovatnoća otkaza pobudnog namotaja,
- $P_{1.6.4.4}$ — verovatnoća otkaza opruga elektropokretača,

- $P_{1.6.4.5}$ — verovatnoća otkaza namotaja rotora,
 $P_{1.6.4.6}$ — verovatnoća otkaza zupčanika sa lamelastom spojnicom elektropokretača,
 $P_{1.6.4.7}$ — verovatnoća otkaza vratila sa pužem elektropokretača.

Koristeći sve prethodno navedene izraze može se napisati konačan izraz za određivanje verovatnoće otkaza motora SUS za pogon vozila u obliku:

$$P_1 = 4P_{1.1.1} + 4P_{1.1.2.1} + 4P_{1.1.2.2} + P_{1.1.3} + P_{1.1.4} + 4P_{1.1.5} + 4P_{1.1.6.1} + 8P_{1.1.6.2} + 8P_{1.1.6.3} + 4P_{1.1.6.4} + 16P_{1.1.7} + P_{1.2.1.1} + 5P_{1.2.1.2} + P_{1.2.1.3} + 8P_{1.2.2.1} + 8P_{1.2.2.2} + 8P_{1.2.2.3} + 16P_{1.2.2.4} + 8P_{1.2.2.5} + P_{1.3.1} + P_{1.3.2.1} + P_{1.3.2.2} + P_{1.3.2.3} + P_{1.3.2.4} + P_{1.3.3} + P_{1.4.1.1} + P_{1.4.1.2} + P_{1.4.1.3} + 2P_{1.4.2.1} + 4P_{1.4.2.2} + 4P_{1.4.2.3} + 4P_{1.4.2.4} + 4P_{1.4.2.5.1} + 4P_{1.4.2.5.2} + 4P_{1.4.2.5.3} + P_{1.4.2.6} + P_{1.4.3.1} + P_{1.4.3.2} + P_{1.4.4} + 4P_{1.4.5.1} + 4P_{1.4.5.2} + P_{1.5.1.1} + P_{1.5.1.2} + 2P_{1.5.1.3} + P_{1.5.2} + P_{1.6.1} + P_{1.6.2} + P_{1.6.3} + P_{1.6.4.1} + 2P_{1.6.4.2} + 2P_{1.6.4.3} + 10P_{1.6.4.4} + P_{1.6.4.5} + P_{1.6.4.6} + P_{1.6.4.7} \quad (12)$$

Na osnovu praćenja pojave otkaza motora SUS ugrađenog u 523 vozila iste namene ($N=523$) u periodu od 5 godina, za koje vreme su prešla po 25.000 kilometara u proseku, dobijeni su podaci o broju otkaza (n_i) i njihovim uzrocima, kao i o njihovom uticaju na vršni događaj — otkaz vozila:

- $n_{1.3.1}=1$ — otkaz zaptivača kartera,
 $n_{1.3.2}=1$ — otkaz pumpe za ulje,
 $n_{1.3.3}=1$ — otkaz cevi za ulje,
 $n_{1.4.2.1}=3$ — otkaz ležaja pumpe visokog pritiska,
 $n_{1.4.2.2}=2$ — otkaz opruge pumpe visokog pritiska,
 $n_{1.4.2.4}=3$ — otkaz elementa pumpe visokog pritiska,
 $n_{1.4.2.5.2}=3$ — otkaz opruge potisnog ventila,
 $n_{1.4.5}=2$ — otkaz brizgaljke,
 $n_{1.5.1.1}=3$ — otkaz remena za pogon ventilatora,
 $n_{1.6.1}=2$ — otkaz prekidača za paljenje,

- $n_{1.6.3}=4$ — otkaz elektromagnetnog prekidača elektropokretača,
 $n_{1.6.4.6}=4$ — otkaz zupčanika elektropokretača.

Verovatnoća pojave otkaza može se izraziti u obliku [3]:

$$P_i = \frac{n_i}{N \cdot m} \quad (13)$$

gde je:

- n_i — broj otkaza,
 N — ukupan broj vozila,
 m — broj istih delova na sklopu motora.

Korišćenjem prethodno navedenog izraza dobijaju se vrednosti za verovatnoću pojave otkaza ranije navedenih delova:

$$P_{1.3.1}=1,91 \cdot 10^{-3}; P_{1.3.2}=1,91 \cdot 10^{-3}; \\ P_{1.3.3}=1,91 \cdot 10^{-3}; P_{1.4.2.1}=2,86 \cdot 10^{-3}; \\ P_{1.4.2.2}=9,95 \cdot 10^{-4}; P_{1.4.2.4}=1,43 \cdot 10^{-3}; \\ P_{1.4.2.5.2}=1,43 \cdot 10^{-3}; P_{1.4.5}=9,95 \cdot 10^{-4}; \\ P_{1.5.1.1}=5,73 \cdot 10^{-3}; P_{1.6.1}=3,82 \cdot 10^{-3}; \\ P_{1.6.3}=7,64 \cdot 10^{-3}; P_{1.6.4.1}=1,91 \cdot 10^{-3}; \\ P_{1.6.4.6}=7,64 \cdot 10^{-3};$$

Zamenom ovih vrednosti u izraz (12) dobija se vrednost verovatnoće pojave otkaza motora u analiziranom periodu:

$$P=0,0533$$

na osnovu koje se zaključuje da je pouzdanost motora navedenog vozila

$$R=1-P=1-0,0533=0,9467$$

Iz navedene analize se vidi da pouzdanost pogonskog motora navedenih vozila za posmatrani period iznosi 94,67 %. Analizom dobijenih rezultata može se zaključiti da je najviše otkaza motora nastupilo usled otkaza uređaja za paljenje, zatim uređaja za napajanje gorivom i uređaja za hlađenje. Kod otkaza uređaja za paljenje naj-

više je otkazivao elektromagnetni prekidač za uključivanje elektropokretača i zupčanik sa lamelastom spojnicom elektroprekidača, što znači da su to najkritičniji delovi. Pri preventivnim pregledima treba proveriti čistoću elektromagnetnog prekidača i elektropokretača i pritegnutost spojeva. Posebnu pažnju treba posvetiti obuci ljudstva u rukovanju, kako bi se smanjio broj otkaza zbog nepravilnog rukovanja. Kod otkaza uređaja za napajanje gorivom najviše je otkazivala pumpa visokog pritiska, a analizom otkaza može se zaključiti da je najviše otkaza nastupilo usled pojave vode i drugih nečistoća u gorivu, pa je potrebno preduzeti mere na preventivnom čišćenju rezervoara za gorivo, cevovoda za gorivo, kao i prečistača goriva i njihovoj zameni radi sprečavanja ili smanjenja pojava otkaza usled vode i nečistoća u gorivu. Kod otkaza uređaja za hlađenje najčešće je otkazivao remen za pogon ventilatora, pa je potrebno, pri preventivnim pregledima proveriti zategnutost remena kao i njegov izgled i, po potrebi, vršiti zatezanje ili zamenu. Nakon 5000 pređenih kilometara ili dva puta godišnje potrebno je obavljati preventivni pregled motora i njegovih uređaja radi utvrđivanja stanja i preduzimanja potrebnih akcija preventivnog održavanja radi smanjenja broja otkaza i

time povećanja pouzdanosti pogonskog motora.

Preduzimanjem prethodno navedenih mera može se smanjiti broj otkaza, čime bi se povećala pouzdanost motora.

Zaključak

Radi obezbeđenja potrebne pouzdanosti motornih vozila, neophodna je primena postupaka predviđanja i analize pouzdanosti u svim fazama životnog ciklusa, posebno u fazi razvoja.

Metoda stabla otkaza prikladna je za analizu otkaza i donošenje zaključaka o mogućim merama za povećanje pouzdanosti motornih vozila. Ona omogućava identifikaciju svih mogućih otkaza, koji samostalno, ili u kombinaciji sa drugim otkazima, dovode do pojave otkaza motornog vozila. Otklanjanjem uzročnika pojave potencijalnih otkaza moguće je poboljšati nivo pouzdanosti.

Pogonski motor nije raščlaŋjivan do najsitnijih delova jer se radi o vrlo složenom sklopu. U radu je prikazan onaj nivo primene metode stabla otkaza koji je dovoljan da se dođe do rezultata koji upućuju na moguće pravce delovanja radi poboljšanja pouzdanosti analiziranih motornih vozila.

Literatura:

- [1] Krstić, B.: Eksploatacija motornih vozila i motora, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1997.
- [2] Ivanović, G., Stanivuković, D.: Pouzdanost analiza i projektovanje, TUSNO, 1988.
- [3] Stojović, M.: Istraživanje karakteristika pouzdanosti asinhronih zglobnih prenosnika, Magistrski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 1990.

- [4] Ivanović, G., Popović, P., Stojović, M.: Primena analize stabla otkaza u projektovanju motornog vozila, Motorna vozila motori, saopštenja 92/93., Kragujevac, 1990.