

# ANALIZA OTKAZA GASNOG MOTORA

## ANALYSIS OF GAS MOTOR FAILURE

dr Dobrivoje Čatić<sup>1)</sup>, dr Milan Despotović<sup>2)</sup>, dr Vanja Šušteršič<sup>3)</sup>

**Rezime:** U radu su dati rezultati analize stabla otkaza gasnog motora. U prvom i drugom delu rada dat je kratak opis i postupak primene metode Analize stabla otkaza. Na osnovu dostupne literature izvršena je analiza strukture i načina funkcionisanja komponenti razmatranog objekta. Složenost gasnog motora uslovlila je poseban pristup pri formiranju i analizi stabla otkaza. U zaključku rada istaknut je značaj blagovremenog otkrivanja i otklanjanja potencijalnih uzroka otkaza gasnog motora.

**Ključne reči:** pouzdanost, analiza stabla otkaza, gasni motor

**Abstract:** In this paper the results of gas motor fault tree analysis are presented. In the first two parts the brief description and procedure of fault tree analysis are given. On the basis of available literature the analysis of structure and kinds of functioning of observed object components is carried out. Complexity of gas motor caused particular approach in fault tree form and analysis. In conclusion the importance of duly detection and prevention of potential causes of gas motor failure is stressed.

**Key words:** reliability, fault tree analysis, gas motor

### 1. UVOD

Za analizu otkaza elemenata tehničkih sistema najčešće se koristi Analiza stabla otkaza (Fault Tree Analysis - FTA) [1, 2]. Osnovu analize stabla otkaza predstavlja prevođenje fizičkih sistema na strukturne logičke dijagrame.

Metoda Analize stabla otkaza razvijena je šezdesetih godina prošlog veka u SAD-u za analizu pouzdanosti i sigurnosti funkcionisanja sistema u vojnoj tehnici. Od svog nastanka do danas FTA je našla primenu za analizu otkaza najrazličitijih tehničkih sistema. Ova metoda je naročito pogodna za analizu pouzdanosti i sigurnosti sistema, čiji bi otkazi doveli do katastrofalnih posledica po ljude i životnu sredinu.

Uzročno definisanje stanja sistema koja dovode do otkaza može da se koristi za ocenu pogodnosti održavanja i za izradu plana održavanja tehničkog sistema. Pored toga, stablo otkaza može da posluži kao dijagnostičko sredstvo za utvrđivanje najverovatnijih uzroka nastalog otkaza.

U okviru rada izvršena je analiza potencijalnih načina otkaza četvorotaktnog Oto motora, koji kao gorivo koristi gas dobijen preradom otpadnih voda [3]. Za sprovođenje detaljne analize uzroka i načina otkaza gasnog motora neophodno je poznavanje strukture, načina funkcionisanja i međusobnog odnosa sastavnih elemenata.

### 2. POSTUPAK FTA

Na početku analize pouzdanosti tehničkog sistema metodom Analize stabla otkaza, daje se definicija i utvrđuju se granice i ciljevi sistema. Vršni događaj u stablu otkaza, u zavisnosti od analiziranog sistema, može da bude opšti (u obliku otkaza sistema), ili specifičan (ukoliko uključuje samo neke otkaze sistema ili njegovih komponenti). Od analitičara se zahteva da pre nego što pristupi formiranju stabla otkaza, veoma dobro prouči sistem sa stanovišta strukture, načina funkcionisanja i međusobnog odnosa sastavnih elemenata.

Formiranje stabla otkaza tehničkih sistema vrši se pomoću simbola za događaje, logičke kapije i prenos [2, 4]. Za događaje se koristi veći broj različitih simbola, koji pokazuju da li se radi o složenim ili o bazičnim inicirajućim događajima. Za složene događaje koristi se pravougaonik. Od simbola za bazične događaje najčešće se koristi krug, koji označava stanje elementa sistema uslovljeno njegovim karakteristikama, i romb koji označava nerazvijeni događaj.

Logički simboli u stablu otkaza označavaju međusobnu uslovljenost i povezanost događaja nižeg i višeg nivoa. Tako na primer, "ILI" logička kapija proizvodi izlaz ako se desi jedan ili više ulaznih događaja. Za razliku od nje, "I"

---

1) dr Dobrivoje Čatić, Mašinski fakultet Kragujevac, Sestre Janjić 6, mail: caticd@kg.ac.rs

2) dr Milan Despotović, Mašinski fakultet Kragujevac, Sestre Janjić 6, mail: mdespotovic@kg.ac.rs

3) dr Vanja Šušteršič, Mašinski fakultet Kragujevac, Sestre Janjić 6, mail: vanjas@kg.ac.rs

logička kapija proizvodi izlaz samo ako se dese svi ulazni događaji.

Simboli za prenos u obliku trouglova, sa identifikacionom oznakom u vidu slova unutar njih, omogućavaju formiranje složenih stabala otkaza u vidu matičnog stabla i određenog broja podstabala.

Kada je stablo otkaza kompletirano, ono se sistematski analizira radi razumevanja logike povezanosti događaja i boljeg uvida u različita stanja sistema. Po usvajanju stabla otkaza, u zavisnosti od krajnjeg cilja primene FTA metode, može se vršiti kvalitativna i/ili kvantitativna analiza. Na osnovu dobijenih i usvojenih rezultata posredstvom stabla otkaza, daju se predlozi korektivnih mera sa ciljem otklanjanja uočenih nedostataka ili predlozi alternativnih rešenja.

### 3. STRUKTURA GASNOG MOTORA

U okviru rada razmatran je četvorotaktni Oto motor, koji kao gorivo koristi gas dobijen preradom otpadnih voda. To je vodom hlađeni motor sa 12 cilindara u konfiguraciji V-70, sa oznakom tipa motora JW 212 G austrijskog proizvođača JENBACHER WERKE AG (slika 1).



**Slika 1 - Gasni motor tipa JW 212 G**

Na osnovu dostupne literature izvršeno je detaljno upoznavanje strukture i načina funkcionisanja komponenata gasnog motora [5]. Gasni motor, kao složeni sistem, sastoji se od kućišta motora, sistema za paljenje, sistema za podmazivanje, sistema za hlađenje, sistema za startovanje motora, elektro sistema, izduvnog sistema i drugih sastavnih celina.

Sistem paljenja motora sastoji se od jednog generatora paljenja, po jedne svećice i indukcionog kalema po cilindru i potrebnih kablova za paljenje. Sistem paljenja svakog motora je fabrički podešen, dok fino podešavanje vrše mehaničari proizvođača motora nakon

ugradnje. Regulacija ugaone brzine, odnosno broja obrtaja motora, vrši se mehaničkim ili elektronskim regulatorom brzine.

Sistem za podmazivanje motore obuhvata: zupčastu pumpu za ulje, ventil za regulisanje pritiska ulja, sigurnosni ventil, hladnjak za ulje, filter za ulje sa servisnim indikatorom i druge elemente.

Osnovni deo sistema hlađenja motora je zupčasta pumpa kapaciteta  $40 \text{ m}^3/\text{h}$ . Njena uloga je da omogući cirkulaciju rashladne tečnosti u motoru.

Sistem za startovanje gasnog motora sastoji se od elektropokretača snage  $9 \text{ kW}$ , akumulatora i kablova za vezu.

### 4. STABLO OTKAZA GASNOG MOTORA

Složenost gasnog motora usloвила je poseban pristup pri analizi i formiranju stabla otkaza. Na samom početku analize javio se problem definisanja vršnog događaja, koji će u punoj meri uključiti u razmatranje većinu potencijalnih načina otkaza elemenata gasnog motora. Pored toga, propisi o bezbednosti u radu nalažu korišćenje automatskih sistema kontrole i upravljanja, koji dovode do zaustavljanja gasnog motora u određenim situacijama. Ispravnost određenog broja komponenti utiče samo na mogućnost startovanja motora. Dalje, neispravnost ili nepodešenost nekih strukturnih celina dovodi do delimičnog otkaza gasnog motora, odnosno do smanjenja njegovog stepena iskorišćenja. Zbog svega prethodno navedenog, analiza otkaza gasnog motora izvršena je tako što je formiran veći broj nezavisnih stabala otkaza za različite vršne događaje.

#### 4.1 Stablo otkaza za vršni događaj „Isključenje gasnog motora“

Do prestanka rada gasnog motora može doći usled automatskog isključenja ili ručnog isključenja od strane operatera. Stablo otkaza za vršni događaj "Isključenje gasnog motora" prikazano je na slici 2.

Automatska kontrola rada i zaustavljanja gasnog motora odnosi se na trenutno isključenje motora u slučaju: niskog pritiska ulja u motoru, niskog nivoa ulja u motoru, niskog nivoa rashladne tečnosti, previsoke temperature rashladne tečnosti, niskog pritiska gasnog goriva ili povećanog ili sniženog broja obrtaja.

Zaustavljanje rada motora od strane operatera vrši se ukoliko se u toku rada javi buka u motoru ili oseti miris gasnog goriva ili izduvnih gasova u prostoriji gde je smešten motor ili ukoliko dođe do

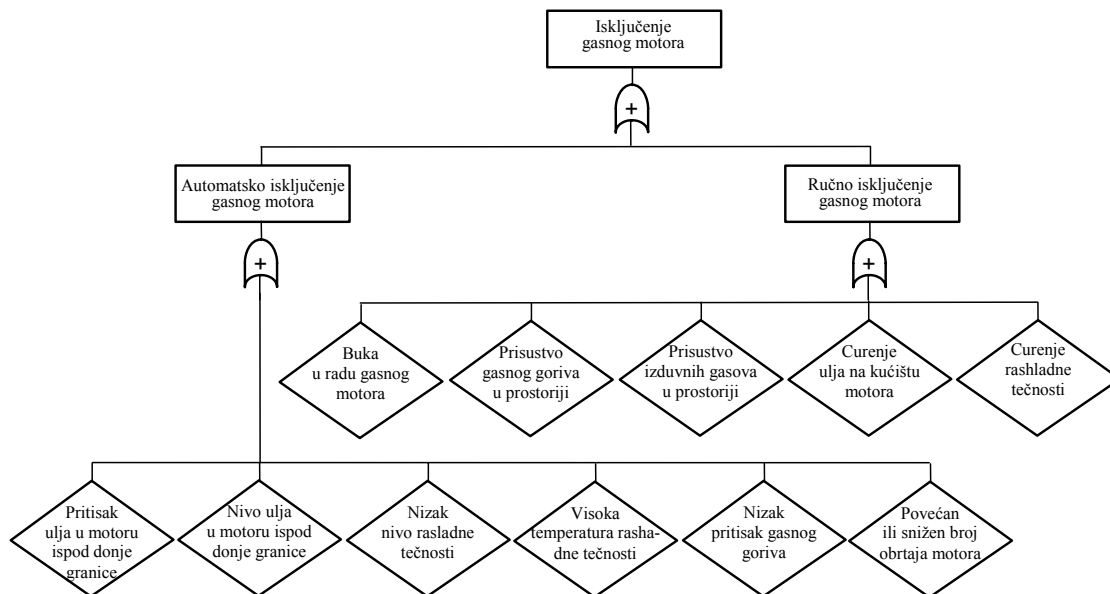
pojave curenja ulja za podmazivanje ili rashladne  
tečnosti na motoru.

Ukoliko se pojavi neobična buka pri radu gasnog motora, neophodno je trenutno zaustavljanje motora i aktiviranje sigurnosnog ventila za dovod gasa. Zatim se utvrđuju uzroci pojave buke.

Izduvni gasovi motora su otrovni i mogu izazvati teže posledice po zdravlje ljudi ako se udišu. Zbog mogućnosti da dođe do oštećenja elemenata izduvnog sistema i ispuštanja izduvnih gasova u prostoriju gde je smešten motor, neophodno je periodično ispitivanje zaptivanja na

izduvnom vodu za gas. U vezi sa tim, sprovodi se vizuelna kontrola pojave naprslina, korozije i stanja zaptivnih elemenata.

U radu motora može doći do curenja ulja usled oštećenja hladnjaka za ulje, zaptivača glave motora, poklopaca kućišta motora, korita za ulje, zatim zaptivnog prstena vratila pumpe za rashladnu tečnost itd. U dodiru sa vrelim delovima motora ulje se može zapaliti, pa je između ostalog i zbog toga neophodno preduzeti mere da ne dođe do curenja ulja za podmazivanje motora.



Slika 2 - Stablo otkaza gasnog motora za vršni događaj "Isključenje gasnog motora"

Curenje rashladne tečnosti može se utvrditi vizuelno ili preko gubitka pritiska u sistemu za hlađenje motora. Za vreme rada motora rashladna tečnost je vruća i pod pritiskom. Zbog mogućnosti iznenadnog pucanja delova sistema za hlađenje i isticanja vrela tečnosti, oštećeni ili dotrajali elementi moraju se odmah zameniti.

Na osnovu uputstva za korišćenje gasnog motora, neophodno je održavati spoljne površine motora čistim i suvim. To omogućava blagovremeno otkrivanje curenja ulja za podmazivanje ili rashladne tečnosti. Kada su u pitanju motori sa unutrašnjim sagorevanjem, u praksi je potvrđeno da se ozbiljna oštećenja motora otkrivaju preko curenja pogoskih sredstava.

#### 4.2 Analiza otkaza sistema za startovanje gasnog motora

Sistem za startovanje gasnog motora sastoji se od elektropokretača (startera), akumulatora i kablova za vezu. Bilo koji od otkaza strukturnih

celina dovodi do nemogućnosti startovanja motora. Efektivno vreme rada sistema za startovanje je veoma malo u odnosu na vreme rada motora, pa se može pretpostaviti da je njegova pouzdanost u toku životnog veka gasnog motora zadovoljavajuća. Na slici 3 prikazano je stablo otkaza sistema za startovanje gasnog motora.

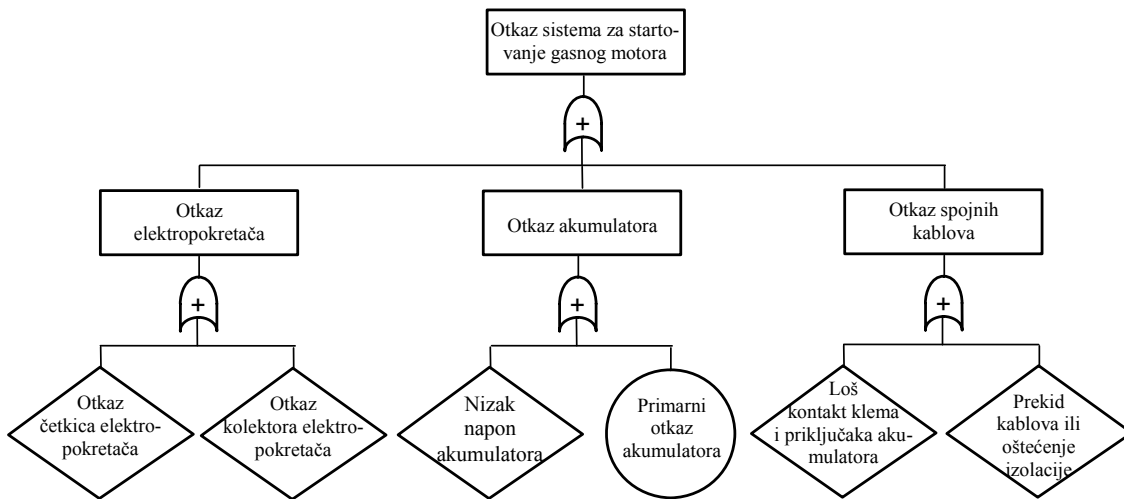
Otkaz elektropokretača može da nastane ukoliko dođe do otkaza četkica ili ako dođe do oštećenja kolektora motora. Pregorevanje namotaja statora i rotora retko se dešava u praksi, pa zbog toga nije uzeto u razmatranje.

Ako dođe do otkaza elektropokretača, prvo treba proveriti grafitne četkice da li su ispravne i da li se mogu lako pokretati u vodicama držača četkica. Četkica se menja kada se slomi, odlepi ili bilo kako ošteti. Ispravan kolektor elektropokretača mora da ima jednoličnu, glatku sivo-crnu površinu i da bude bez prašine, ulja i masti. Kolektori koji su izgrebani ili ekscentrični usled habanja, obrađuju se u za to opremljenim radionicama.

Za kvalitetno startovanje motora neophodan je akumulator sa odgovarajućim karakteristikama.

Postoji veći broj uzroka koji dovode do pojave niskog nivoa napona akumulatora i oni u ovom radu nisu detaljno razmatrani. Akumulatori imaju svoj radni vek. Čak i u idealnim uslovima

eksploatacije i održavanja, pre ili kasnije dolazi do primarnog otkaza akumulatora uslovljenog njegovim unutrašnjim karakteristikama.



**Slika 3 - Stablo otkaza sistema za startovanje gasnog motora**

Startovanje gasnog motora može da bude onemogućeno i otkazima vezanim za kablove za vezu akumulatora i elektropokretača. Prekid kablova za vezu retko se dešava. Postoji mogućnost oštećenja izolacije ovih kablova u dodiru sa zagrejanim delovima motora i odvođenja struje na masu. Najčešći razlog neispravnosti je loš kontakt, odnosno labava veza klema i priključaka akumulatora.

#### 4.3 Delimični otkazi elemenata gasnog motora

Delimični otkazi elemenata gasnog motora dovode do smanjenja stepena korisnog dejstva, odnosno do smanjenja energetske efikasnosti. Radi detaljne analize svih događaja koji dovode do smanjenja energetske efikasnosti, formirano je stablo otkaza koje je prikazano na slici 4.

Smanjenje pritiska gasnog goriva na dovodu u motor može da nastane usled zaprljanosti filtera za gas ili otkaza regulatora pritiska gasa. Ukoliko dođe do zaprljanosti filtera za gas, uložak filtera se pere u toploj vodi i suši. Obično se kod regulatoru pritiska gasa vrši zamena membrane regulatora, dok se ostali delovi ispiraju u rastvaračima za čišćenje i suše komprimovanim vazduhom.

Smanjeni dotok vazduha u motor dovodi do veće potrošnje gasnog goriva, uz istovremeno smanjenje snage motora. Nedovoljna količina vazduha onemogućava potpuno sagorevanje usisanog gasa. Tokom rada motora, ako se na servisnom indikatoru potpritiska na usisnom vodu za vazduh javi maksimalni potpritisak, motor se

mora zaustaviti dok se ne očisti ili zameni uložak filtera.

Otkaz ventila za mešanje gasa utiče na stvaranje neodgovarajuće smeše gasno gorivo - vazduh, odnosno dovodi do lošeg sagorevanja. Ukoliko dođe do otkaza ovog elementa, vrši se njegovo čišćenje i zamena membrane ventila.

Sistem paljenja motora je u ispravnom stanju ukoliko svi cilindri motora rade korektno. Do delimičnog otkaza sistema paljenja motora dolazi ukoliko otkazu: indukciono kalem, razvodnik paljenja, svećice, silikonski kablovi za vezu ili ako tačka paljenja motora nije podešena.

Pri ispitivanju indukcionog kalema, prvo treba pregledati i proveriti kontakte indukcionog kalema na niskonaponskoj i visokonaponskoj strani da li su dobro učvršćeni i čisti. Struja niskog napona mora da bude odgovarajuća. Indukcioni kalem u ispravnom stanju, pri praznom hodu motora, treba da daje napon od 30 kV. Ako je napon manji, indukcioni kalem se mora se zameniti.

Pojava torzionog zazora u elastičnoj krstastoj ploči razvodnika paljenja može da dovede do poremećaja podešenosti tačke paljenja motora.

Uobičajeni znaci oštećenja svećice su: svećica ne baca varnicu, bakarno jezgro centralne elektrode istrošeno, centralna elektroda raspuknuta i može čak dodirnuti bočne elektrode ili lom bočnih elektroda. Prilikom kontrole, ako svećica baca varnicu, vrši se provera zazora između elektroda svećice. Optimalna veličina zazora u konkretnom slučaju iznosi 0,4 mm. Ako je usled

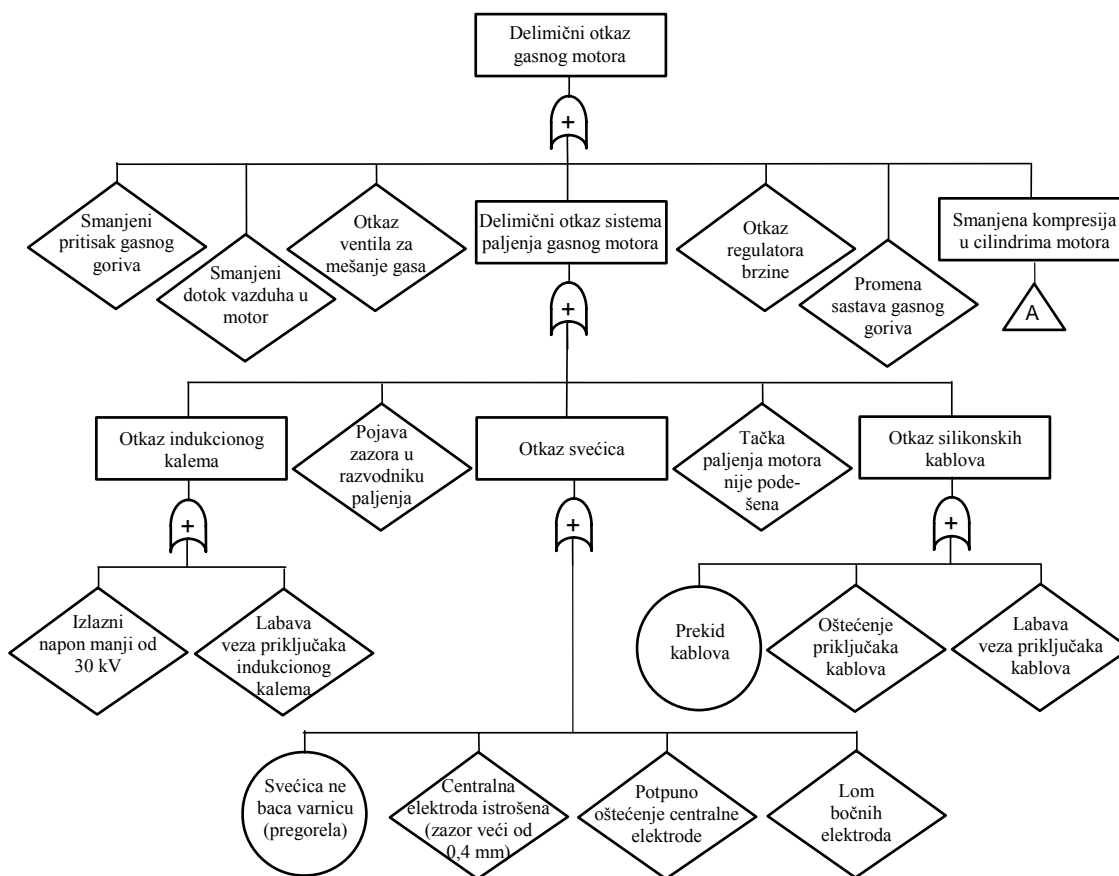
istrošenosti centralne elektrode zazor veći, dozvoljeno je jedno podešavanje zazora svećice. Veći broj podešavanja zazora može da dovede do loma bočnih elektroda.

Optimalna tačka paljenja motora zavisi od vrste gasnog goriva, opreme motora i drugih uslova. Pri prvom puštanju u rad (prijemu) motor se fino podešava za korišćeni tip gasa. U zavisnosti od detonacione osetljivosti gasa, vrši se podešavanje paljenja i označavanje na motoru od strane stručnog lica.

Kad su u pitanju kablovi koji povezuju elemente sistema za paljenje motora, može doći do njihovog prekida, oštećenja ili labavih veza na priključcima. Zbog toga treba periodično proveravati stanje kablova. Spaljeni (uglavnom pocrneli) ili nagoreli priključci dovode do smanjenja napona

na svećici i lošeg sagorevanja smeše u cilindru. Oštećene kablove treba odmah zameniti.

Otkaz regulatora brzine odražava se na promenu broja obrtaja motora. Međutim, uzrok nekontrolisane promene broja obrtaja motora ne mora da bude uvek regulator brzine. Smanjenje broja obrtaja može da nastane usled povećanog opterećenja motora ili delimičnog otkaza motora u smislu da sistem paljenja jednog ili više cilindara motora nije ispravan. Kada se utvrdi da promena broja obrtaja motora nije uzrokovana povećanim opterećenjem ili lošim radom motora, pristupa se podešavanju regulatora brzine.



Slika 4 - Stablo otkaza za vršni događaj "Delimični otkaz gasnog motora"

Popravku ili rad na podešavanju regulacionog sistema mogu izvoditi samo specijalizovana stručna lica. Nestručan rad na sistemu regulacije brzine može prouzrokovati oštećenje ili neefikasnost motora. U najgorem slučaju može doći do ozbiljnih oštećenja motora, usled prekoračenja maksimalno dopuštenog broja obrtaja.

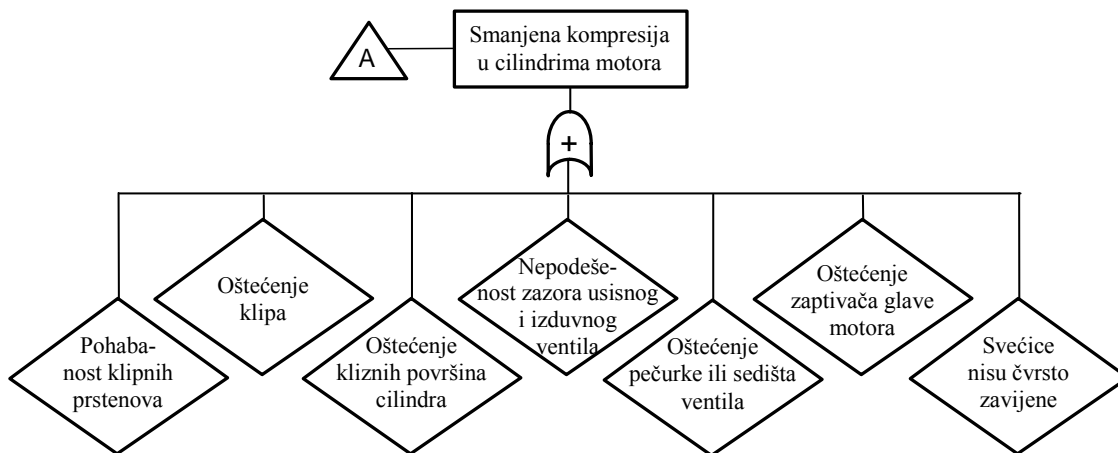
Smanjenje kompresije u cilindrima motora dovodi do smanjenja snage motora uz istu potrošnju goriva, odnosno do njegove energetske neefikasnosti. Nezavisno podstablo otkaza za vršni događaj "Smanjena kompresija u cilindrima

motora" prikazano je na slici 5. Pad pritiska u komorama za sagorevanje može da nastane usled većeg broja uzroka, kao na primer usled: pohabivosti klipnih prstenova, oštećenja klipa, oštećenja kliznih površina cilindra, nepodešenosti zazora usisnog i izduvnog ventila, oštećenja pečurke i sedišta ventila ili stvaranja naslaga, oštećenja zaptivača glave motora ili labave veze svećice.

Prilikom ispitivanja kompresije motora prvo treba da se prekontrolišu zazor na usisnim i izduvnim ventilima i po potrebi podesi. Posle toga, motor treba da radi dok ne postigne radnu

temperaturu. Motor se isključuje i zatvara se dovod gasa. Svećice se jedna po jedna skidaju i na njihovo mesto postavlja se merač pritiska. Motor se startuje pomoću elektropokre-tača do dostizanja maksimalnog pritiska. Očitana vrednost pritiska na meraču predstavlja kompresiju za dati cilindar.

Razlika pritisaka između dva cilindra ne treba da iznosi više od 2 bara. Kod većeg odstupanja treba prekontrolisati glavu cilindra, zaptivanje glave cilindra, sedišta ventila, unutrašnji prečnik cilindra i eventualno klip i klipne prstenove.



**Slika 5 - Nezavisno podstablo otkaza za vršni događaj "Smanjena kompresija u cilindrima motora"**

Pohabanost košuljice cilindra utiče na povećanje zazora između cilindra i klipa. U slučaju većih vidljivih oštećenja košuljice cilindra (kao npr. zarezi, pragovi na gornjem delu otvora) ili veće pohabanosti koja se utvrđuje merenjem prečnika cilindra, košuljica cilindra i klip treba da budu zamenjeni.

Nepravilnosti u radu motora i otkazi pojedinih komponenti mogu biti otkriveni merenjem temperature izduvnih gasova. Temperatura izduvnog gasa je važan pokazatelj kvaliteta sagorevanja i uopšte radnih uslova motora. Meri se pomoću termoparova, koji se zavijaju u izbušene otvore na izduvnim granama svakog cilindra. Na taj način, temperatura izduvnih gasova cilindara motora može se proveriti u bilo kom trenutku.

## 5. ZAKLJUČAK

Analiza pouzdanosti tehničkih sistema zasniva se na analizi otkaza njihovih elemenata. Formiranje stabla otkaza gasnog motora omogućava detaljnu analizu razmatranog sistema sa stanovišta pojave otkaza, utvrđivanje uzročno-posledičnih veza između otkaza strukturnih celina različitih nivoa pripadnosti, evidentiranje najvećeg broja potencijalnih načina otkaza sastavnih elemenata, formiranje blok-dijagrama pouzdanosti itd.

Uz detaljnu analizu razlika u pogledu strukture i načina funkcionisanja, formirano

stablo otkaza gasnog motora može da se koristi za analizu otkaza i drugih varijanti konstrukcionog izvođenja.

Trajnost, pouzdanost i ekonomičnost gasnog motora u velikoj meri zavise od pravilne eksploatacije i održavanja. Ispravnost i podešenost pojedinih komponenti motora značajno utiče na stepen iskorišćenja, odnosno na njegovu energetska efikasnost.

Praćenje i merenje i parametara funkcionisanja od presudnog je značaja za blagovremeno otkrivanje nedostataka kod gasnog motora. Na taj način dobija se informacija za preduzimanje mera održavanja, u cilju otklanjanja uzroka.

## LITERATURA

- [1] Barlow R. E., Proschan F.: Statistical Theory of Reliability and Life Testing Probability Models, Holt, Rinehart and Winston, Inc., New York, 1975.
- [2] Lazor J. D.: Failure mode and effects analysis (FMEA) and Fault tree analysis (FTA) (Success tree analysis - STA), In Handbook of Reliability Engineering and Management, McGraw-Hill, 1995., pp. 6.1-6.46.
- [3] von Schwach W.: Automotor – Stručna knjiga o automobilu, Zavod za udžbenike, Sarajevo, 1979.



[4] Čatić D.: Metode pouzdanosti mašinskih sistema, Univerzitetski udžbenik, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Kragujevac, 2009.

[5] . . . : Dokumentacija, katalozi i servisna uputstva fabrike gasnih motora JENBACHER WERKE AG iz Austrije.