SISTEMSKI PRILAZ IZBORU KONCEPCIJE I MODELA PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA PREMA STANJU MOTORNIH VOZILA

U radu su prikazani klasifikacija, karakteristike i kriterijumi za izbor savremene koncepcije i modela preventivnog održavanja motornih vozila i naznačeni problemi za primenu u praksi.

Istražen je algoritam za izbor koncepcije i modela sistema održavanja i odabran model preventivnog održavanja prema stanju sa kontrolom nivoa pouzdanosti, za primenu na motornim vozilima.

Uvod

Na uspešno izvršenje funkcije cilja motornog vozila, pored konstrukcijskih osobina, utiče i koncepcija sistema održavanja i primenjeni model održavanja [4].

Pod koncepcijom sistema održavanja podrazumeva se obeležje sistema koje zavisi od principa, na osnovu kojeg se donose odluke o sprovođenju postupaka održavanja, pa, u tom smislu, postoje osnovne koncepcijske mogućnosti: *preventivno*, *korektivno* i *kombinovano* održavanje. Modeli održavanja uprošćeno interpretiraju realne procese promene stanja i održavanja i sistem održavanja, pomoću matematički izraženih odnosa određenih parametara ili pokazatelja — kriterijuma, s ciljem upravljanja ovim procesima i sistemom, odnosno određivanja optimalnih, izlaznih operacionih karakteristika modela [2, 9].

Izborom koncepcije *preventivnog održavanja prema stanju (POPS)* — (engleski »*On-Condition Based Maintenance*«) i uspešnom primenom odgovarajućeg modela POPS na motornim vozilima, mogu se ostvariti mnogi efekti — povećati pouzdanost i gotovost i smanjiti troškovi održavanja, što su tri relevantna faktora preko kojih se meri ili ocenjuje kvalitet sistema održavanja. Sama po sebi, koncepcija POPS

predstavlja jedan od najperspektivnijih i najekonomičnijih načina upravljanja procesima promene stanja i održavanja motornih vozila [9].

Danas je u svetu u teoriji održavanja, razvijen veliki broj modela održavanja [1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 14]. Među njima posebnu pažnju privlače modeli POPS [9]. Razvijeni matematički modeli su aproksimacije procesa održavanja, pa mogu poslužiti za izbor i dalju razradu za primenu na motornim vozilima. Zajedničko svojstvo modela POPS jeste da počivaju na kontinualnoj promeni parametra stanja ili pokazateljima pouzdanosti i razvijeni su za „pojedine elemente«. Postavlja se problem organizovanja optimalnog procesa preventivnog održavanja za motorno vozilo kao veoma složeni sistem, čije se stanje određuje »stanjem« sastavnih elemenata¹. Teorija i praksa održavanja motornih vozila ukazuju na to da se rešenja za optimalno, dinamičko upravljanje procesima promene stanja i održavanja i dobijanje meritorne ocene stanja motornog vozila moraju zasnovati na *metodi kombinovane primene koncepcija i modela održavanja*, na nivou sastavnih elemenata.

Stoga, nameće se potreba za posebnim *sistemskim prilazom* izboru

¹ Pod elementom se podrazumeva: podsistem, komponenta, agregat, uređaj, sklop, podsklop, sastavni deo motornog vozila.

Sl. 1 — Savremene koncepcije održavanja motornih vozila

konceptije i modela održavanja, za primenu na motornim vozilima, koji se razmatra u ovom radu. Međutim, izbor najpovoljnije konceptije sistema održavanja u smislu primene POPS, preventivnog održavanja »po vremenu« ili korektivnog održavanja uslovljen je nizom uticaja tehničkog i ekonomskog karaktera. Precizna metodologija koja bi omogućila rešavanje ovih pitanja ne postoji, te se daje jedan od mnogih prilaza. Predložen je jedan model POPS sa kontrolom nivoa pouzdanosti za primenu na motornim vozilima.

Entiteti i trend razvoja savremenih konceptija održavanja motornih vozila

Stanje i pravci razvoja ukazuju na to da se danas u svetu, u oblasti teorije i prakse održavanja motornih vozila, primenjuju ili predstavljaju osnovne razvojne tendencije, savremene konceptije održavanja, prikazana na slici 1.

Preventivno održavanje »po vremenu« (engleski »Hard Time Limit«) sprovodi se isključivo na osnovu apriornih informacija o pouzdanosti, tj. na osnovu raspodele vremena do pojave otkaza za motorno vozilo, odnosno njegov sastavni element [2]. Izvodi se u fiksnim vremenskim intervalima i ima unapred utvrđenu radnu sadržinu u vidu propisanih preventivnih postupaka održavanja i zamena sastavnih elemenata ili se, pak, ovaj interval može podešavati (»adaptirati«) prema stanju motornog vozila konstatovanom pri prethodnom pregledu stanja. Periodična zamena postaje sve značajnija zbog povišene modularne gradnje sistema [10].

Danas se primenjuju dva karakteristična pristupa konceptije POPS [8]:

— kod POPS sa proverom parametara stanja² ($POPS_{pps}$) posmatra se i prati diskretno ili kontinualno (engleski »On-Condition« i »Condition Monitor-

² Pod parametrom stanja podrazumeva se: strukturni ili dijagnostički parametar.

ing«) neki pokazatelj-parametar stanja, koji reprezentuje stanje motornog vozila, odnosno sastavnog elementa, čija je postepena promena stanja slučajna u funkciji vremena rada i, na osnovu tako dobijene aposteriorne informacije o vrednostima parametara stanja, donosi se odluka o sprovođenju odgovarajućih postupaka POPS ili nastavku korišćenja motornog vozila do sledeće »provere stanja«;

— kod POPS sa kontrolom nivoa pouzdanosti ($POPS_{knp}$) (engleski »Reliability Level Inspection«), kriterijum stanja sastavnih elemenata i motornog vozila u celini, jeste dozvoljeni nivo pouzdanosti. Motorno vozilo se koristi bez ograničenja resursa za održavanje, sve dok je stvarni nivo pouzdanosti veći od dozvoljenog nivoa pouzdanosti.

Današnju realnost predstavljaju i ekspertni sistemi za održavanje (engleski »Expert Maintenance Systems« — EXMAS), koji su kao software proizvodi razvijeni pomoću »baza znanja«, izgrađenih na osnovu postojećih znanja o opštim i posebnim karakteristikama procesa i sistema održavanja, odnosno podatka o klasifikacionim tipičnim otkazima motornog vozila i smeštenih u elektronski računar. Aktivizacijom »baze znanja« uspostavlja se veštačka ekspertiza, tj. pomoću definisanih simptoma, dijagnoza i sistema zaključivanja o stanju, generišu se odluke korisnika o sprovođenju aktivnosti održavanja motornog vozila.

»Samoodržavanje«, odnosno razvoj savremenih »sistema bez održavanja« (engleski »Self-Maintenance« ili »Maintenance Free«), predstavlja danas jednu od osnovnih razvojnih tendencija savremenih konstrukcionih rešenja motornih vozila i predmet su opsežnih istraživanja [4]. Naime, »sistem bez održavanja« može da se realizuje samo ukoliko su obezbeđeni visoki nivoi pouzdanosti svih sastavnih elemenata i sistema u celini, što rezultira znatnim smanjenjem verovatnoće otkaza i po-

trebe za održavanjem, odnosno omogućava se rad motornog vozila u znatno dužim vremenskim intervalima bez zastoja zbog održavanja.

Zašto koncepcija POPS

U većini slučajeva, promena stanja jednog sistema kao vremenska funkcija je nepoznata i zbog toga preventivno održavanje »po vremenu« nije uvek najefektivnija koncepcija.

Razlika između koncepcije preventivnog održavanja »po vremenu« i POPS je suštinska, iako obe predstavljaju preventivnu aktivnost. Dok se kod preventivnog održavanja »po vremenu« postupci preventivnog održavanja i zamene elemenata sprovode posle propisanog vremenskog ili eksploatacionog resursa, bez obzira na »stanje« elementa, kod POPS sa proverom parametara stanja vrši se, po utvrđenoj dinamici u funkciji od konstaovanog stanja, »provera stanja« sastavnih elemenata motornog vozila i preduzimaju se postupci održavanja samo ako su nađene vrednosti parametara stanja izvan dozvoljenih granica odstupanja. Na taj način postiže se potpunije iskorišćenje radnog veka sastavnih elemenata, u odnosu na preventivno održavanje »po vremenu«, uz obezbeđenje željenog nivoa pouzdanosti.

Koncepcija POPS, prema tome, pruža povoljnije uslove za ostvarivanje većeg stepena pouzdanosti i iskorišćenja radnog veka sastavnih elemenata od koncepcije preventivnog održavanja »po vremenu«, uz istovremeno snižavanje ukupnih troškova održavanja, pa i troškova životnog ciklusa motornog vozila [2]. Ukoliko su troškovi preventivnog održavanja manji od troškova korektivnog održavanja i njegovih posledica, a ispunjeni su određeni tehnički uslovi za primenu POPS, tada je ova koncepcija najcelishodnija [10].

Karakteristični primeri primene koncepcije POPS

Zbog svojih prednosti, koncepcija POPS se u svetu sve više koristi u raznim područjima tehnike, što potvrđuju brojni radovi sa istoka i zapada.

Primena koncepcije POPS sa proverom parametara stanja došla je do izražaja naročito u vazduhoplovstvu, gde su razvijeni posebni sistemi održavanja na osnovama ove koncepcije. Jedan od najpoznatijih je tzv. sistem TARRAN (engleski »Test And Replace as Necessary«, što u prevodu znači »Ispitaj i zameni ako je potrebno«), koji se koristi i za održavanje aviona u JAT-u [2].

Tipičan primer primene koncepcije POPS sa proverom parametara stanja je sistem održavanja francuskih aviona »MIRAGE 2000«, koji se zasniva na programima za proveru, odnosno »praćenje stanja« i »ugrađenim testovima« (engleski »Condition Monitoring« i »Built In Tests«). Ali, treba istaći, ova koncepcija održavanja nije generalno rešenje za celu konstrukciju aviona, već se za određene sastavne elemente primenjuje koncepcija preventivnog održavanja »po vremenu« (engleski »Hard Time Limit«) i korektivnog održavanja (engleski »Corrective Maintenance«).

Najnoviji tenkovi i oklopni transporteri, savremena terenska i teretna vozila (tenk LEOPARD 2, ABRAMS, BREIDLY, T-72, M-84, »VIHOR«, BVP M-80, i dr.) opremljeni su izvesnim nivoom dijagnostičkih ekspertnih sistema sa ugrađenim elementima samodijagnostike ili su, pak, na osnovama koncepcije POPS sa proverom parametara stanja, utvrđeni lokaliteti za »proveru stanja« pri radu ili održavanju [14].

Praktična primena koncepcije POPS sa proverom parametara stanja može se realizovati na motornim vozilima isključivo za one sastavne elemente kod kojih se promena parametara stanja (X) vrši kontinualno u funkciji vremena rada (t), tj. $X = f(t)$. Ova koncepcija održavanja je od bitnog značaja

za sastavne elemente motornog vozila kod kojih se javljaju tzv. »postepeni« i »pozni« otkazi, koji se karakterišu rastućim zakonom promene intenziteta otkaza (λ), a mogu se relativno lako identifikovati ili proceniti za naredni period, kao što su otkazi usled habanja, starenja, korozije i drugih fizičko-hemijskih procesa.

Koncepcija POPS sa kontrolom nivoa pouzdanosti primenjuje se za održavanje savremenih aviona i to onih sastavnih elemenata aviona koji nisu vezani za sigurnost leta [8]. Praktična primena ove koncepcije omogućava sniženje troškova održavanja, pa se zbog toga široko primenjuje u mnogim svetskim avio-kompanijama. Ovu koncepciju održavanja razradila je avio-kompanija »Pan American«, i u novije vreme je potpuno prešla na ovaj model, a koriste ga i ostale avio-kompanije [8].

Pretpostavka je da bi koncepcija POPS sa kontrolom nivoa pouzdanosti mogla naći praktičnu primenu i na motornim vozilima za određene istotipske sastavne elemente sa diskretnom promenom parametara stanja u funkciji vremena, tj. $X \neq f(t)$, čiji otkazi ne utiču na funkcionalnu ispravnost vozila i imaju približno konstantan intenzitet otkaza (λ).

Karakteristike koncepcije POPS i kriterijumi za njen izbor

Koncepcija POPS sa proverom parametara stanja motornog vozila

Teoretska postavka koncepcije POPS sa proverom parametara stanja zasniva se na »pregledu stanja«, odnosno na diskretnom ili kontinualnom »praćenju stanja« sastavnih elemenata motornog vozila i uočavanju ili prognoziранju vremenskog trenutka dostizanja graničnih vrednosti parametara stanja. Prema rezultima pregleda, odnosno »provere stanja«, preduzimaju se odgovarajući postupci održavanja [2].

Sl. 2 — Konceptcija POPS sa proverom parametra stanja $X(t)$

ΔX — »signalizaciona tolerancija« parametra stanja

Δt — vreme za sprovođenje aktivnosti POPS

t_p — interval »provere stanja«

Konceptcija POPS sa proverom parametara stanja ilustrovana je na slici 2 [10], koja prikazuje jedan mogući slučaj zakonitosti promene parametra stanja s dinamikom »provere stanja«, gde su definisane: granica upozorenja (X_d) (»predotkazni nivo«) i granica otkaza (X_g) koja se utvrđuje eksperimentalno i daje se u normativno-tehničkoj dokumentaciji motornog vozila.

Granica upozorenja predstavlja tzv. dozvoljenu vrednost parametra stanja (X_d), a određuje se kao jedan od relevantnih pokazatelja modela POPS sa proverom parametara stanja. Granice upozorenja i otkaza definišu »signalizacionu toleranciju« (ΔX), što dozvoljava vreme (Δt) za preduzimanje aktivnosti POPS. Signalizaciona tolerancija, dakle, određuje stepen osetljivosti odabrane dijagnostičke metode na parametar stanja i njegovu identifikaciju, u skladu sa zakonom promene parametara stanja posmatranog sastavnog elementa.

Osnovni zadatak POPS je, dakle, »stabilizacija« parametra stanja, tj. sprečavanje njegovog izlaska iz dozvoljenih granica odstupanja, odnosno iz »signalizacione tolerancije«.

Zakovitost promene većine parametara stanja motornog vozila može se izraziti matematičkom zavisnošću [8]:

$$X(t) = V \cdot t^\alpha + X_n \quad (1)$$

gde je:

V — koeficijent koji karakteriše brzinu promene parametra stanja;

t — vreme rada sastavnog elementa motornog vozila;

α — pokazatelj stepena promene parametra stanja (uzima se iz tablica u literaturi);

X_n — nominalna (početna) vrednost parametra stanja.

Jedan od karakterističnih modela POPS sa proverom parametara stanja, koji je formiran modeliranjem postupka retrospekcije, dijagnostike i prognostike opisan je u [9]. Kod ovog modela u koraku retrospekcije proučava se tendencija zakonitosti promene parametra stanja, u koraku dijagnostike ocenjuje se stanje sastavnog elementa u datom trenutku vremena, dok se u koraku prognostike prognozira, odnosno određuje tendencija promene parametra stanja u narednom periodu rada.

Dijagnostika stanja ima zadatak da utvrdi stanje sastavnog elementa bez njegovog rasklapanja, što se rešava na osnovu merenja dijagnostičkog parametra koji je povezan sa strukturnim parametrom matematički definisanom regresivnom krivom [9]. Treba naglasiti da se model POPS sa proverom parametra stanja može koristiti i kod sastavnih elemenata koji nemaju adekvatan dijagnostički parametar. U tom slučaju se dijagnostika stanja zanemaruje i model sačinjavaju retrospekcija i prognostika. Pri proveru stanja direktno se meri strukturni parametar, pa se na osnovu toga određuje vreme sledeće »provere stanja«.

Osnovna idejna zamisao pri formiranju modela POPS sa proverom parametara stanja jeste da se na osnovu

izmerenih vrednosti parametra stanja sastavnog elementa motornog vozila reše dva osnovna pitanja održavanja:

— kada treba izvršiti sledeću »proveru stanja«, i

— kada treba sprovesti odgovarajuće postupke održavanja da bi se obezbedio zadati nivo pouzdanosti.

Kriterijum za primenu POPS sa proverom parametara stanja može se odrediti iz odnosa intervala »provere stanja« (i_p) i srednjeg vremena rada sastavnog elementa motornog vozila između otkaza (t_m) (engleski MTBF).

Primena POPS sa proverom parametara stanja može da bude efektivna u slučaju kada raspored ponovljenih tokova promene nekog parametra stanja ima široko rasturanje, kao što je prikazano na slici 3. U ovom slučaju, dužina intervala »provere stanja« (i_p) znatno je manja od MTBF ($i_p \ll \text{MTBF}$) [10].

Sl. 3 — Promena parametra stanja $X(t)$ za primenu POPS

i_p — interval »provere stanja«
 MTBF — srednje vreme između otkaza

žavanja »po vremenu« (t_i) nije znatno manji od MTBF, pa ćemo u ovom slučaju primeniti preventivno održavanje »po vremenu« [10],

Sl. 4 — Promena parametra stanja $X(t)$ za primenu preventivnog održavanja »po vremenu«

t_i — interval preventivnog održavanja »po vremenu«

MTBF — srednje vreme između otkaza

Koncepcija POPS sa kontrolom nivoa pouzdanosti sastavnih elemenata motornog vozila

Koncepcija POPS sa kontrolom nivoa pouzdanosti svodi se na princip da se istotipski sastavni elementi motornog vozila koriste bez ograničenja resursa za održavanje, uz izvršenje neophodnih aktivnosti korektivnog održavanja, sve dok je stvarni nivo pouzdanosti (R_s) veći od dozvoljenog nivoa pouzdanosti (R_d), slika 5.

Dakle, kod POPS sa kontrolom nivoa pouzdanosti, kriterijum stanja istotipskih sastavnih elemenata motornog vozila je dozvoljeni nivo pouzdanosti (R_d) koji se izražava pokazateljem pouzdanosti. Za rešenje postavljenog zadatka takav pokazatelj mora posedovati maksimum informacija o stanju sastavnog elementa, mora biti pogodan za obavljanje uporedne analize, a, isto tako, mora biti kritičan prema promenama procesa eksploatacije motornog

vozila u celini. Tim zahtevima najpotpunije može odgovarati kretanje intenziteta otkaza (λ) [8].

Sl. 5 — Konceptija POPS sa kontrolom nivoa pouzdanosti $R(t)$

R_s — stvarni nivo pouzdanosti

R_d — dozvoljeni nivo pouzdanosti

t_k — periodičnost kontrole nivoa pouzdanosti

Naročito mesto kod POPS sa kontrolom nivoa pouzdanosti zauzima izbor dozvoljenog nivoa pouzdanosti (R_d). Za početak primene modela POPS sa kontrolom nivoa pouzdanosti moguće je određivanje dozvoljenog nivoa pouzdanosti (R_d) za istotipske sastavne elemente motornog vozila na osnovu iskustva u procesu eksploatacije za prethodnih 3—5 godina, a u funkciji optimalnih troškova održavanja. Može se preporučiti primena periodičnosti kontrole nivoa pouzdanosti grupe istotipskih elemenata određenog skupa motornih vozila, npr. kvartalno, godišnje, i sl.

U slučaju kada se prilikom kontrole nivoa pouzdanosti ustanovi da se stvarni nivo pouzdanosti (R_s) ne nalazi u granicama utvrđenih (dozvoljenih) normi, tj. ako je $R_s < R_d$, obavlja se a-

naliza uzroka odstupanja i preduzima ju se mere za povećanje nivoa pouzdanosti.

Algoritam za izbor najbolje koncepcije održavanja motornih vozila

Polazeći od opisanih karakteristika i kriterijuma za izbor odgovarajuće koncepcije održavanja, metodom *systemskog prilaza* vrši se izbor najbolje koncepcije održavanja za pojedine sastavne elemente motornog vozila, čiji je algoritam prikazan na slici 6. Izbor najbolje koncepcije u smislu primene POPS sa proverom parametara stanja, POPS sa kontrolom nivoa pouzdanosti, preventivnog održavanja »po vremenu« ili korektivnog održavanja uslovljen je nizom uticaja tehničkog i ekonomskog karaktera. Osnovno opredeljenje u odnosu na tehničke karakteristike motornog vozila sprovodi se na osnovu karaktera intenziteta otkaza, tj. ako je intenzitet otkaza u vremenskoj bazi rastuća funkcija, treba primeniti preventivno održavanje. Opredeljenje u odnosu na ekonomske karakteristike motornog vozila vezano je za analizu odnosa odgovarajućih troškova održavanja [6].

U skladu sa podacima o pokazateljima pouzdanosti, matematičkim zakonitostima promene parametara stanja, »konstrukcijskoj« pogodnosti za održavanje, troškovima održavanja, i dr., moguće je izvršiti izbor najbolje koncepcije održavanja, a zatim i odgovarajući model održavanja za primenu na motornim vozilima [9, 13].

Prilikom izbora koncepcije i modela održavanja, potrebno je, pre svega, ispitati pokazatelje pouzdanosti: funkciju gustine pojave stanja u otkazu $f(t)$, intenzitet otkaza (λ) i srednje vreme između otkaza (engleski MTBF).

Odluka o pogodnosti primene neke koncepcije održavanja mora se doneti za svaki sastavni element posebno. Zbog toga je neophodno »dekomponovanje«

Sl. 6 — Algoritam za izbor koncepcije sistema održavanja motornog vozila

motornog vozila na sastavne elemente. Analiza uticaja pojedinih elemenata na pouzdanost započinje funkcionalnom analizom strukture motornog vozila u kojoj se svi sastavni elementi dele u grupe, zavisno od karaktera uticaja promene parametara stanja na funkcionisanje motornog vozila. U toj logičkoj strukturnoj analizi mogu se identifikovati sledeće četiri osnovne grupe parametara stanja ([16]:

— *I grupa*: parametri čije odstupanje dovodi do ugrožavanja bezbednosti motornog vozila u saobraćaju (nekih elemenata sistema za kočenje, uređaja za upravljanje, i dr.);

— *II grupa*: parametri čije odstupanje utiče na nivo gotovosti, odnosno raspoloživosti motornog vozila;

— *III grupa*: parametri čije odstupanje dovodi do havarije motornog vozila (to su parametri sigurnosti: pritisak, temperatura, itd.);

— *IV grupa*: parametri čije odstupanje dovodi do narušavanja tolerancija određenih pri projektovanju motornog vozila.

Za identifikovane grupe parametara stanja razmatra se, u koraku izbora modela održavanja, izbor odgovarajućeg kriterijuma optimizacije procesa održavanja, tj. primenjuju se modeli preventivnog održavanja na bazi kriterijuma maksimalne gotovosti, minimalnih troškova održavanja ili višekriterijumska analiza.

Ako otkaz sastavnog elementa motornog vozila utiče na pouzdanost vozila u radu i u smislu njegove funkcionalne ispravnosti, pri porastu intenziteta otkaza (λ) primeniće se model POPS sa proverom parametara stanja ili preventivno održavanje »po vremenu«.

Sledeći korak analize jeste da se za svaki element, na osnovu praktičnog iskustva i analitičkih razmatranja utvrde moguće vrste otkaza. Za svaku vrstu otkaza (postepeni ili iznenadni otkaz) sledi algoritam odlučivanja, prema slici 6.

Kao što se vidi sa slike 7, područje primene koncepcije preventivnog održavanja »po vremenu« je, u principu, određeno rastućom funkcijom intenziteta otkaza (period III na slici 7). To su tzv. »pozni« otkazi koji obično potiču od starenja, korozije, zamora, habanja i drugih procesa slabljenja osnovne strukture materijala, a karakterišu se progresivnim ili rastućim zakonom promene intenzitetu otkaza (λ). Za primenu koncepcije preventivnog održavanja »po vremenu«, osnovni kriterijumi za izbor su: ne postoji efektivna koncepcija POPS i u porastu su otkazi elementa.

Naravno, prisutni su i tzv. slučajni (»iznenadni«) otkazi, koji predstavljaju rezultat »normalnog« habanja sastavnih elemenata motornog vozila, kao i raznih vrsta preopterećenja, nepropisnog rukovanja i drugih slučajnih činioca, a za koje je intenzitet otkaza tokom vremena korišćenja motornog vozila približno konstantan (period II na slici 7), a javljaju se i tzv. »rani« (»ugrađeni«) otkazi (period I na slici 7).

Prema [8], za istotipske sastavne elemente sistema, sa približno konstantnim intenzitetom otkaza (λ) primeniće se koncepcija POPS sa kontrolom nivoa pouzdanosti (period II na slici 7). Za sastavne elemente motornog vozila područje primene ove koncepcije može biti prošireno i na početni deo perioda III na slici 7, koji se karakteriše rastućim zakonom promene intenziteta otkaza (λ).

Za elemente sa konstantnim intenzitetom otkaza (λ) uvek će se primeniti korektivno održavanje.

Prema [11], »pregledi stanja«, odnosno koncepcija POPS sa proverom parametara stanja može i mora se sprovesti u sva tri perioda (slika 7).

Da bi se primenila koncepcija POPS sa proverom parametara stanja, potrebno je da se identifikuje jedan (ili više) parametar stanja, merodavan za stanje jednog elementa, i da se on može meriti. Potrebno je, zatim, da se de-

finiše zakonitost promene parametra stanja u funkciji vremena rada, te da se ustanove relevantne granice otkaza, koje se zasnivaju na prethodnom iskustvu.

Sl. 7 — Dijagram intenziteta otkaza $\lambda(t)$ — kriterijum za izbor koncepcije održavanja motornog vozila

Model POPS sa proverom parametara stanja može se primeniti na elemente kod kojih otkaz nastaje »postepeno«, a ne »iznenada« [13]. Za »postepeni« otkaz karakteristična je određena zakonitost kontinualne promene parametra stanja u funkciji vremena rada koja prethodi otkazu, tj. dolazi do tzv. »akumulacije« oštećenja. Kod »iznenadnog« otkaza, kontinualna promena parametra stanja praktično ne postoji.

U slučaju kada su minimalni troškovi održavanja sastavnog elementa motornog vozila kriterijumska funkcija, sledeći korak pri izboru koncepcije održavanja sprovodi se analizom troškova održavanja, pri čemu troškovi primene date koncepcije preventivnog održavanja moraju biti manji od troškova korektivnog održavanja i njegovih posledica. Postupak odlučivanja kod izbora koncepcije održavanja u slučaju primene kriterijuma minimalnih troškova održavanja definisan je algoritmom na slici 6.

Konačno, za svaki definisani parametar stanja ili kombinaciju parametara bira se odgovarajući model koncepcije održavanja, a zatim sledi izbor metoda dijagnostike i instrumenata i uređaja.

Ako bi se postupci POPS izvodili strogo po »lokalnim« periodičnostima za pojedine sastavne elemente vozila, bili bi veći troškovi, smanjila bi se operativna gotovost, nastali bi problemi u organizaciji održavanja, i sl. Zbog toga se, umesto periodičnosti »provere stanja« pojedinačnog elementa, vrši optimalno grupisanje »provera stanja«, odnosno određuje se periodičnost »provere stanja« za grupu elemenata [13].

Izbor modela POPS

Modeli koji uprošćeno interpretiraju proces i sistem održavanja nazivaju se modelima održavanja [2]. Pomoću modela određuju se vrednosti parametara odabrane koncepcije — interval vremena (t_i) ako je u pitanju preventivno održavanje »po vremenu« ili interval »provere stanja« (i_p) i dozvoljena vrednost parametra stanja (X_d) ako je odabrana koncepcija POPS sa proverom parametara stanja, i dr.

Kriterijumi pomoću kojih su definisani pojedini modeli održavanja prikazani su na slici 8 [9].

I pored velikih međusobnih razlika, modeli POPS imaju izvesna zajednička obeležja [2, 9]:

— počivaju na kontinualnoj promeni parametara stanja i pokazateljima pouzdanosti, što znači da je za optimizaciju procesa održavanja bitan preduslov poznavanje matematičkih zakonitosti promene parametara stanja i zakonitosti pouzdanosti elemenata i sistema u celini;

— prvenstveno obuhvataju koncepcijska obeležja sistema održavanja, odnosno efekte primene koncepcije POPS. Ređe se modelima obuhvataju i

MODELI ODRZAVANJA

Sl. 8 — Kriterijumi za razvoj modela održavanja motornih vozila; $f(t)$ — funkcija gustine stanja u otkazu

osobine sistema održavanja sa stanovišta organizacije i tehnologije, što umanjuje stvarne mogućnosti optimizacije;

— počivaju na bazi kriterijuma optimizacije, koji se odnose, prvenstveno, na koncepciju održavanja, kao što su minimalni troškovi ili maksimalna gotovost. U literaturi nisu dostupni matematički modeli koji povezuju kriterijume gotovosti i troškova — kao kompromisno rešenje optimizacije, odnosno razmena koje ide od jednog u korist drugog kriterijuma (engleski »*Trade Off*«), kojem se teži [9]. Naime, ako bi želeli da, istovremeno, uzmemo u obzir kriterijume maksimalne gotovosti motornog vozila i minimalnih troškova održavanja javio bi se kontradiktoran problem, koji je matematički nerešiv, jer se ne može postići maksimalna gotovost uz minimalne troškove održavanja. Ume-

sto toga, moguće je: (1) postići maksimalnu gotovost pri zadatim troškovima održavanja ili (2) minimizirati troškove održavanja pri zadatoj gotovosti motornog vozila. Dakle, ili gotovost ili troškovi održavanja moraju se unapred zadati, a samo jedna od tih dveju veličina može se optimizirati.

— nedostatak skoro svih modela održavanja jeste što su do sada razvijeni za »pojedine« elemente [7]. Postavlja se problemsko pitanje: kako organizovati optimalni proces POPS za složeni sistem, kao što je, na primer, savremeno terensko neborbeno motorno vozilo sa $(15-18) \cdot 10^3$ sastavnih elemenata?

Rešenje se mora tražiti u optimizaciji provere parametara stanja grupe sastavnih elemenata, što rezultira sniženjem troškova održavanja.

Jedan model preventivnog održavanja prema stanju sa kontrolom nivoa pouzdanosti

Postavke i definicije

Pretpostavka je da bi model POPS sa kontrolom nivoa pouzdanosti ($POPS_{knp}$), koji je opisan u [8], i koristi se u vazduhoplovstvu, mogao naći praktičnu primenu i na motornim vozilima za određene istotipske sastavne elemente.

Odgovarajuća matematička interpretacija koncepcije $POPS_{knp}$ poslužila je za formiranje modela kojim je moguće kontrolisati nivo pouzdanosti sastavnih elemenata sistema u procesu eksploatacije.

U ovom modelu se, kao pokazatelj pouzdanosti, koristi $\omega(t)$ — parametar toka otkaza (vremenski trenuci pojave otkaza formiraju neki tok koji može da se nazove tokom otkaza). U svojstvu toka otkaza koristi se »vodeća funkcija« $\omega(t)$ datog toka — to je matematičko očekivanje broja otkaza za vreme t :

$$\omega(t) = M \cdot r(t) \quad (2)$$

gde je:

$r(t)$ — broj otkaza za vreme t .

Teoretska postavka modela $POPS_{knp}$ zasniva se na Poasonovoj raspodeli slučajno promenljive veličine [3]:

$$p = \frac{r^n}{n!} e^{-r} \quad (3)$$

Kod Poasonove raspodele (3) određuje se verovatnoća (p) da će od ukupno » r « očekivanih pojava biti » n « određenih pojava, gde je $n=0, 1, 2, \dots$; $n!$ =faktorijel bilo kojeg realnog broja n .

Matematički model $POPS_{knp}$

Polazni parametri za ovaj model su [8]:

n_s — stvarni broj otkazata istotipskih elemenata sistema za praćeni period eksploatacije;

t_{sr} — srednje vreme »u radu« elemenata;

N — broj posmatranih sistema;

a — broj istotipskih elemenata u sistemu čiji se nivo pouzdanosti kontroliše.

Nivo pouzdanosti skupa istotipskih elemenata kontroliše se putem upoređivanja stvarnog broja otkaza istotipskih elemenata posmatranog skupa sistema (n_s) s »gornjom granicom regulacije« (GGR), u čijim granicama praćeni broj otkaza ima slučajni karakter.

Gornja granica regulacije zasniva se na krivoj raspodele po Poasonu i određuje se sa usvojenom verovatnoćom (p_z) i gornjom granicom otkaza (n_{max}), prema [8]:

$$p_z = \sum_{n=0}^{n_{GGR}} \frac{(\omega_s \cdot N \cdot t_{sr} \cdot a)^n}{n!} \exp(-\omega_s \cdot N \cdot t_{sr} \cdot a)^n \quad (4)$$

gde je:

ω_s — planirani parametar toka (kretanja) otkaza (to je, u stvari, dozvoljeni nivo pouzdanosti), koji se za početak primene modela $POPS_{knp}$ određuje na osnovu iskustva, odnosno ispitivanjem eksploatacije sistema u prethodnom vremenskom periodu (3—5 godina);

$p_z=0,975$ — zadati nivo verovatnoće gornje granice broja otkaza prema literaturi [8].

Uvrštavanjem vrednosti polaznih parametara u jednačinu (4) i njenim rešavanjem dobija se vrednost GGR.

Kontrola nivoa pouzdanosti ostvaruje se upoređivanjem veličina (n_s i (GGR), što služi kao »signal modela« $POPS_{knp}$, na bazi kojeg se donose odluke. Ako se konstatuje da je $n_s < GGR$, produžava se primena modela $POPS_{knp}$. Ako je $n_s > GGR$, preduzimaju se mere

za povećanje nivoa pouzdanosti elemenata (menja se periodičnost kontrole, ispituje se uzrok otkaza, menjaju se uslovi eksploatacije, i sl.) i proverava ekonomska pogodnost tih mera. Ako preduzete mere daju nepovoljan rezultat, razmatra se konstrukcijski nedostatak elemenata. U slučaju da se ne usvoji povećanje nivoa pouzdanosti, prelazi se na model preventivnog održavanja »po vremenu« ili korektivno održavanje.

Model POPS_{knp} realizuje se na bazi obrade statističkih podataka o pouzdanosti sistema tokom celog perioda eksploatacije korišćenjem računara.

Primer

Primenu modela POPS_{knp} pokazaćemo na realnom primeru.

Radi obezbeđenja i održavanja zadanog nivoa pouzdanosti, za skup istotipskih kotrljajnih ležišta jednog sklopa motornog vozila, na osnovu podataka o njihovim otkazima, za prethodni 1-godišnji period eksploatacije datog skupa motornih vozila, primenićemo model POPS_{knp}.

Polazni podaci za matematički model (4) su sledeći:

$N=30$	— broj motornih vozila;
$a=2$	— broj istotipskih kotrljajnih ležišta u sklopu ;
$n=3$	— stvarni broj otkaza kotrljajnih ležišta za prethodni jednogodišnji period eksploatacije;
$t_{sr}=800$ [h]	— srednje vreme »u radu« kotrljajnog ležišta;
$\omega_s=4,2 \cdot 10^{-5}$	— parametar toka kretanja otkaza kotrljajnih ležišta, određen praćenjem trogodišnjeg perioda eksploatacije skupa motornih vozila;
$p_z=0,975$	— zadati nivo verovatnoće gornje granice broja otkaza prema literaturi [8].

Uvrštavanjem polaznih podataka u jednačinu (4) i njenim rešavanjem, dobija se relevantni pokazatelj modela (4), tzv. »gornja granica regulacije« (GGR):

$$0,975 = \sum_{n=0}^{n=GGR} \frac{4,2 \cdot 10^{-5} \cdot 30 \cdot 800 \cdot 2)^n}{n!} \exp$$

$$(-4,2 \cdot 10^{-5} \cdot 30 \cdot 800 \cdot 2)^n = \sum_{n=0}^{n=GGR} \frac{(2)^n}{n!} e^{-2} =$$

$$= e^{-2} + \frac{2}{1!} e^{-2} + \frac{2^2}{2!} e^{-2} + \frac{2^3}{3!} e^{-2} + \dots \quad (5)$$

$$0,975 > 0,1353 + 0,2706 + 0,2706 + 0,1804 + 0,0902;$$

$$0,975 < 0,1353 + 0,2706 + 0,2706 + 0,1804 + 0,0902 + 0,0360;$$

$$GGR \sim 4,5.$$

Na osnovu stvarnog broja otkaza kotrljajnih ležišta (n_s) i dobijenog rezultata proračuna modela za »gornju granicu regulacije« (GGR), može se postaviti nejednačina modela POPS_{knp}:

$$n_s = 3 < GGR = 4,5, \quad (6)$$

koja predstavlja »signal modela«.

Kontrola nivoa pouzdanosti kotrljajnih ležišta ostvaruje se upoređivanjem dobijenih vrednosti n_s i GGR u nejednačini (6). U ovom primeru je $n_s < GGR$, što znači da kontrolisani nivo pouzdanosti zadovoljava, pa je »signal modela« da se nastavlja primena modela POPS_{knp}, do sledeće kontrole nivoa pouzdanosti.

Umesto zaključka

POPS je savremena koncepcija održavanja u intenzivnom razvoju, novi prilaz u održavanju motornih vozila, čijom se uspešnom primenom mogu ostvariti značajni efekti — održati traženi nivo pouzdanosti motornog vozila, istovremeno smanjujući troškove održavanja.

Kod primene POPS treba rešiti relevantna pitanja: *šta, kada i kako pregledati i koje mere, odnosno postupke održavanja, treba preduzeti*, vodeći računa o efektivnosti i ekonomičnosti POPS.

Ključni su problemi: izbor minimalnog broja parametara stanja mero-davnih za ocenu stanja sastavnog elementa motornog vozila, definisanje zakonitosti promene parametara stanja u funkciji vremena rada motornog vozila, određivanje pokazatelja pouzdanosti, izbor adekvatnog matematičkog modela POPS i određivanje pokazatelja (izlaznih operacionih karakteristika) odabranog modela (optimalnih vremenskih in-

tervala »provere stanja« (i_p), dozvoljene vrednosti parametra stanja (X_d), verovatnoće »postepenog« otkaza, dozvoljenog nivoa pouzdanosti (R_d) i tzv. »gornje granice regulacije« (GGR), i dr.), »konstrukcijska« neprilagođenost motornih vozila za koncepciju POPS, što se mora rešavati još u fazi razvoja motornog vozila, i dr.

Sistemska prilaz izboru koncepcije i modela održavanja i njihova primena metodom kombinovanja na nivou sastavnih elemenata motornog vozila, predstavlja jedan od mogućih pravaca rešavanja problema optimalnog upravljanja procesima stanja i održavanja motornog vozila.

Literatura:

- [1] Todorović, J.: Inženjerstvo održavanja tehničkih sistema, JUMV, Beograd, 1993. *
- [2] Todorović, J.: Održavanje motornih vozila — Osnovi teorije održavanja, Mašinski fakultet, Beograd, 1984.
- [3] Todorović, J., Zelenović, D.: Efektivnost sistema u mašinstvu, Naučna knjiga, Beograd, 1981.
- [4] Todorović, J.: Kočenje motornih vozila, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1988.
- [5] Duboka, Č.: Tehnologije održavanja vozila I, Mašinski fakultet, Beograd, 1992.
- [6] Arsenić, Ž., Vasić, B.: Efektivnost tehničkih sistema — Rešavanje karakterističnih problema primenom računara, Mašinski fakultet, Beograd, 1991.
- [7] Gertsbakh, I. B.: Models of preventive maintenance, North-Holland publishing company, Amsterdam-New York-Oxford, 1977.
- [8] Smirnov, N. N., Icković, A. A.: Obsluživanje i remont aviaacionoj tehnici po sastojanju, Transport, Moskva, 1980.
- [9] Minić, S.: Istraživanje modela preventivnog održavanja prema stanju i njihova primena na motornim vozilima, Magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 1988.
- [10] Smit, K.: Why Condition Monitoring? — Condition Monitoring as Part of a Maintenance Concept for Complex Equipment, XIII Konferencija YUMO '86, Beograd, 1986.
- [11] Stanivuković, D., Kecojević, S.: IIS koncepcija održavanja, IIS — prolećni seminar: Savremene koncepcije održavanja, Dubrovnik, 1989.
- [12] Stanivuković, D.: The Future of the Maintenance — An Overview, IFIP Working Conference on Diagnostic and Preventive Maintenance Strategies in Manufacturing Systems, Dubrovnik, 1987.
- [13] Minić, S., Todorović, J.: Izbor koncepcije i modela preventivnog održavanja prema stanju motornih vozila, Vojnotehnički glasnik 4, Beograd, 1990.
- [14] Lazović, M.: Prilog definiranju strategije održavanja prema stanju složenih mašinskih sistema, Doktorska disertacija, Visoke vojnotehničke škole KoV JNA, Zagreb, 1989.
- [15] Knežević, J.: Upravljanje procesima održavanja i obnavljanja tehničkih sistema na osnovu teorije pouzdanosti, OMO, Beograd, 1988.
- [16] Đurić, M., i dr.: Koncept razvoja sistema kontrole dinamičkih sistema, Naučno-tehnički pregled 7, Vojnotehnički institut KoV, Beograd, 1990.