Dr Svetomir Minić,
ppuk. dipl. inž.

KONCEPCIJA I MODEL PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA TEHNIČKIH SISTEMA PREMA STANJU SA PROVEROM PARAMETARA STANJA

Uvod

Koncepcija preventivnog održavanja prema stanju, ili skraćeno POPS (On-Condition Based Maintenance), zasniiva se na metodologiji održavanja prema pouzdanosti, ili skraćeno OPP (Reliability Centered Maintenance), i predstavlja metod za objektivno upravljanje procesima promene stanja i održavanja tehničkih sistema. Postupci POPS, po dinamici i sadržaju, zavise od *stanja sistema* što se utvrđuje sprovođenjem *provera stanja*, odnosno praćenjem promene parametra stanja koji reprezentuje stanje posmatranog elementa sistema. U zavisnosti od rezultata izvršene *provere stanja* i konstatovanog *stanja* sistema i njegovih elemenata, donose se odluke o preduzimanju postupaka POPS.

Sušтина modela POPS sa proverom parametara stanja (POPSpps) jeste diskretno ili kontinualno praćenje promene odabranog parametra stanja koji je jednoznačno i sigurno opisuje stanje posmatranog elementa sistema. U ovom radu razrađen je matematički model POPSpps — tzv. model EKRAN kojim se određuje veza između periodičnosti provere parametra stanja i signalizacione tolerancije parametra stanja, pri obezbeđenju zadate pouzdanosti. Model uspostavlja direktne odnose između pouz-

danosti i zakonitosti promene parametra stanja posmatranog elementa i ima neposredni zadatak da odredi izlazne operacione karakteristike modela: vreme *prve* provere stanja, dozvoljenu vrednost parametra stanja i signalizacionu toleranciju parametra stanja u čijim granicama je neophodno sprovesti postupke POPS, kako bi se sprečila pojava stanja *u otkazu*.

Radi primene modela EKRAN definisana je metodologija primene i razvijen je programski paket DMPOPS [13] koji omogućava automatizovanu simulaciju modela. Ovaj programski paket, na osnovu ulaznih podataka za model EKRAN, automatizovano rešava matematičko-modelsku interpretaciju procesa POPS i daje izlazne operacione karakteristike modela koje predstavljaju osnovu za optimalno upravljanje procesima promene stanja i održavanja i odlučivanje o sprovođenju postupaka POPS.

Koncepcija sistema održavanja

Koncepcija sistema održavanja predstavlja njegovo najvažnije obeležje, koje veoma utiče na kvalitet sistema održavanja, a zavisi od principa na os-

novu kojeg se donose odluke o sprovođenju postupaka održavanja [20].

Sa stanovišta koncepcije postoje dva osnovna rešenja: *preventivno i korektivno održavanje*. Obe osnovne koncepcije mogu da se povežu — to je *kombinovano održavanje*. Pod koncepcijom preventivnog održavanja podrazumeva se održavanje koje omogućava smanjenje verovatnoće pojave slučajnih otkaza, odnosno u ovoj koncepciji održavanje ima zadatak da spreči ili odloži pojavu otkaza. Koncepcija korektivnog održavanja traži da se postupci održavanja sprovode samo ako dođe do otkaza, tj. njima se vrši vraćanje sistema iz stanja *u otkazu* u stanje *u radu*.

Kod *preventivnog održavanja* postupci održavanja sprovode se pre nego što dođe do pojave otkaza, tj. u vremenu u kojem je sistem u stanju »u radu«. Sistem preventivnog održavanja treba da počiva na metodologiji održavanja prema pouzdanosti, i da bude zasnovan na poznavanju svojstava pouzdanosti i zakonima pojave otkaza [8].

Najveći praktični značaj imaju dve vrste preventivnog održavanja [20]:

— *preventivno održavanje po vremenu* (*»Hard Time Limit«*) sprovodi se, isključivo, na osnovu apriornih informacija o pouzdanosti, tj. na osnovu raspodele vremena do pojave otkaza za sistem, odnosno njegov sastavni element. Izvodi se u fiksnim vremenskim intervalima i ima unapred utvrđenu radnu sadržinu u vidu propisanih preventivnih postupaka održavanja i zamena sastavnih elemenata ili se ovaj interval može podešavati (adaptirati) prema stanju sistema, konstatovanom pri prethodnom pregledu. Periodična zamena postaje sve značajnija zbog zastupljenosti modularne konstrukcije sistema [15].

— kod *POPS sa proverom parametara stanja** posmatra se i prati diskretno ili kontinualno (*»On-Condition«* i *»Condition-Monitoring«*) neki pokaza-

telj — parametar stanja, koji reprezentuje stanje sistema, odnosno sastavnog elementa, čija je postepena promena stanja slučajna i u funkciji je vremena rada. Na osnovu tako dobijene aposteriorne informacije o vrednostima parametara stanja donosi se odluka o sprovođenju odgovarajućih postupaka POPS ili nastavku korišćenja sistema do sledeće *provere stanja*.

Prednosti koncepcije POPS

Kod preventivnog održavanja *po vremenu* postupci održavanja i zamene elemenata sprovode se 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 konstatovanog stanja, *provera stanja* sastavnih elemenata sistema i, u zavisnosti od rezultata *pregleda stanja*, 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 zahtevanog nivoa pouzdanosti i mogućnost prognoziranja preostalog vremena rada elementa.

Primenom POPS izbegavaju se nepotrebne zamene elemenata. Propisivanje zamene nekog elementa, bez obzira na njegovo stanje, krije u sebi rizik kvaliteta novog elementa i rizik kvaliteta ugradnje. To može nepovoljno da utiče na pouzdanost ukoliko je element koji se zamenjuje bio još uvek u ispravnom stanju, odnosno ukoliko je njegova zamena bila faktički nepotrebna [19].

Koncepcija POPS pruža povoljnije uslove za ostvarivanje većeg stepena iskorišćenja radnog veka sastavnih elemenata od koncepcije preventivnog održavanja *po vremenu*, uz istovremeno manje ukupne troškove održavanja, pa i troškove životnog ciklusa sistema [20].

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

Ukoliko su troškovi preventivnog održavanja manji od troškova korektivnog održavanja i njegovih posledica, a ispunjeni su određeni tehnički uslovi (kriterijumi) za primenu POPS, tada je ova koncepcija celishodna [15].

Primeri primene koncepcije POPS

Koncepcija POPS se, zbog svojih prednosti, sve više koristi u svetu u raznim područjima tehnike, što potvrđuju brojni stručni radovi.

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 model *TARAN (Test and Replace as Necessary)*, što znači *Ispitaj i zameni ako je potrebno*, koji se koristi i za održavanje aviona u JAT-u, zatim model *IRAN (Inspect and Replace as Necessary)* [20], i drugi.

Tipičan primer primene koncepcije POPS sa proverom parametara stanja je sistem održavanja francuskih aviona *MIRAGE 2000* [20], koji se zasniva na programima za proveru, odnosno *praćenje stanja i ugrađenim testovima (Condition Monitoring i Built In Tests)*. Treba istaći, da ova koncepcija održavanja nije generalno rešenje za kompletnu konstrukciju aviona, već se za određene agregate, odnosno sisteme aviona, primenjuje koncepcija preventivnog održavanja *po vremenu (Hard Time Limit)* i koncepcija korektivnog održavanja (*Corrective Maintenance*) za elektronske i elektrotehničke komponente. Kombinovano održavanje može dati posebno dobre rezultate.

Najnoviji tenkovi i oklopni transporteri, savremena terenska i teretna vozila (*LEOPARD 2, ABRAMS, BREDLY, T-72, M-84, VIHOR, BVP M-80*, i dr.) opremljeni su izvesnim nivoom dijagnostičkih ekspertnih sistema sa ugrađenim elementima samodijagnostike ili su na osnovama koncepcije POPS

sa proverom parametara stanja utvrđeni lokaliteti *test mesta* ili otvori) za postavljanje *endoskopa* za proveru stanja [9].

Mnogi proizvođači motornih vozila razvili su originalne sisteme *praćenja stanja* (Volkswagen, Renault, BMW i dr.), dok je, na primer, američka armija u potpunosti prešla na ovaj vid održavanja prema stanju USATACOM (U.S. Army Tank Automotive Command) [6].

Iskustva iz primene koncepcije POPS

Postoje mnogobrojna iskustva iz istraživanja i primene POPS tehničkih sistema. Rezultati se, po pravilu, ogledaju u smanjenju troškova i znatnom povećanju efektivnosti funkcije održavanja, odnosno efektivnosti sistema koji se održavaju.

Prednosti primene POPS su sledeće [2]:

- smanjenje troškova održavanja kroz skraćeno vreme održavanja, brzo otkrivanje otkaza, mogućnost prognozi- ranja otkaza što omogućava planiranje radioničkih kapaciteta, rezervnih delova, i sl.

- povećanje operativne gotovosti (raspoloživosti),

- povećanje mogućnosti planiranja održavanja, porast motivisanosti radnika,

- pravovremeno uočavanje *slabih tačaka* (elemenata koji se slabije ponašaju od normalnih),

- bolje projektovanje novih sistema na osnovu saradnje neposrednih korisnika i proizvođača, i dr.

Najbitniji postignuti rezultati POPS ogledaju se u smanjenju broja neočekivanih otkaza i to do 50% [3]. Kod velikih firmi primenom periodičnih *pregleda stanja* uspešno su smanjeni otkazi i do 75%. To dovodi do povećanja pouzdanosti sistema i smanjenja troškova održavanja za 10 do 15%.

Primenom POPS, odnosno dijagnostike, moguće je ostvariti uštede do 15% na sprovođenju postupaka održavanja, smanjenje troškova rezervnih delova za 8 do 12%, smanjenje troškova goriva i maziva za 15% i smanjenje zastoja zbog održavanja za 20%. Takođe, navodi se podatak da je cena *pregleda stanja* sistema klasičnim metodama čak za 70 do 75% veća od cene korišćenja dijagnostičkih instrumenata i uređaja [7].

Osnovni preduslovi za uvođenje koncepcije POPS su [1]:

- posedovanje potrebnih instrumenata i metoda,
- obezbeđenost stručnim kadrom,
- pogodna organizacija rada,
- raspoloživost sistema za *provere stanja*,
- posedovanje potrebne informatičke podrške, odnosno primena elektronskog računara.

Na razvoju metoda dijagnostike, instrumenata i uređaja za obavljanje *pregleda stanja* poslednjih godina se mnogo radi. U tom smislu potrebno je da se i konstrukcije samih sistema prilagode ovom vidu održavanja.

Karakteristike koncepcije POPS

Teorijska postavka koncepcije POPS sa proverom parametara stanja zasniva se na *pregledu stanja*, odnosno na diskretnom ili kontinualnom *praćenju stanja* sastavnih elemenata sistema i uočavanju ili prognoziranju vremenaskog trenutka dostizanja graničnih vrednosti parametara stanja. Prema rezultatima pregleda, odnosno *provere stanja*, preduzimaju se odgovarajući postupci održavanja [13].

Koncepcija POPS sa proverom parametara stanja prikazana je na slici 1 [15] na kojoj se vidi 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 sistema.

Sli. 1 — Koncepcija POPS sa proverom parametra stanja $X(t)$

ΔX — »signalizaciona tolerancija« parametra stanja, Δt — vreme za sprovođenje postupaka POPS, i_p — interval »provere stanja«

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

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

Model preventivnog održavanja prema stanju sa proverom parametara stanja — model POPS_{pps}

Osnovna ideja za primenu modela POPS_{pps}, zasnovana na uzajamnoj vezi kontinualne promene parametra stanja

i pouzdanosti, jeste da se na osnovu organizovanog praćenja promene parametra stanja, koji treba i identifikovati, *proveri stanje* sastavnog elementa sistema. Na osnovu tako dobijenih rezultata *provere stanja* treba preduzeti odgovarajuće postupke održavanja [11, 14].

Model $POPS_{pps}$ ima plansko-preventivni karakter [14]. Planiraju se periodičnosti i obim postupaka *pregleda stanja*. Preventivni karakter obezbeđuje se stalnim praćenjem parametara stanja sistema radi blagovremenog otkrivanja *predotkaznog* stanja, tj. dozvoljene vrednosti parametra stanja (x_d) ili otkrivanja granične vrednosti parametra stanja (x_g), pri kojoj se javlja otkaz.

Model $POPS_{pps}$ primenjuje se isključivo kod sistema koji imaju kontinualnu promenu stanja tokom vremena korišćenja, tj. za koju se može odrediti funkcionalna zavisnost između intenziteta promene parametara stanja i vremena rada, odnosno $x=f(t)$.

Kontinualna (postepena) i diskretna (trenutna) promena parametara stanja (slika 2) posledica su procesa habanja,

Sl. 2 — Diskretna (trenutna) i kontinualna (postepena) promena parametra stanja u funkciji vremena rada sistema

starenja i drugih uticaja slučajnog karaktera kojima su izloženi sastavni elementi sistema.

Kod diskretne promene razlikuju se samo dva stanja (*u radu* i *u otkazu*),

dok se kod kontinualne promene može razlikovati nekoliko *međustanja*, što se svodi na mogućnost praćenja promene parametra stanja sistema.

Diskretna i kontinualna promena parametara stanja dovode do *iznenadnih* i *postepenih* otkaza sistema, respektivno.

Prema načinu pojave otkazi mogu biti [18]:

— iznenadni otkaz (Sudden Failure) koji se uočava u trenutku vremena, i

— postepeni otkaz (Gradual Failure) čiji razvoj može da se prati u dužem vremenskom periodu.

Za postepeni otkaz karakteristična je određena zakonitost promene parametra stanja, dok kod iznenadnog otkaza promena parametra stanja praktično ne postoji (slika 3).

Sl. 3 — Mehanizam postepenog i iznenadnog otkaza sistema

Veliki broj sastavnih elemenata sistema tokom rada *akumuliraju* oštećenja, pa se i u pozadini *iznenadnih* otkaza, koji dovode do naglog gubitka sposobnosti funkcionisanja, najverovatnije krije proces *nagomilavanja* oštećenja [17].

Sistem je pogodan za primenu modela $POPS_{pps}$ ako sadrži kritične ele-

mente kod kojih otkaz nastaje postepeno, a ne iznenada.

Kontinualna promena parametra stanja elementa u funkciji vremena rada, koja prethodi *postepenom* otkazu, u suštini, predstavlja tzv. *akumuliranje oštećenja* [4], a uslov za primenu diskretnog ili kontinualnog praćenja stanja je i prognoziranje preostalog vremena rada elementa.

Ovakvim prilazom se ne razgraničavaju samo dva ekstremna stanja *u radu* i *u otkazu*, već se mogu uočiti i prelazna stanja elementa (*međustanja*) koja su karakteristična za sve elemente sa *postepenom* promenom stanja [17].

Model $POPS_{pps}$ predviđa metode za definisanje:

- zakonitosti promene stanja sistema,
- sistema dijagnostike stanja, i
- sistema prognoziranja preostalog resursa rada.

Postoje dve osnovne varijante modela $POPS_{pps}$ [10, 14, 20]:

- sa diskretnom proverom parametra stanja (slika 4), i
- sa kontinualnom proverom parametra stanja (slika 5).

Obe varijante modela su na slikama 4 i 5 prikazane pomoću dijagrama stohastičkog procesa promene parametra stanja $x(t)$ i tzv. *tranzitivnog dijagrama* [20] stohastičkog procesa karakterističnih stanja tehničkog sistema.

Ova zakonitost promene parametra stanja $x(t)$ predstavlja oblik iskazivanja funkcija cilja. Nivo parametra stanja x_n označava nominalno, odnosno radno stanje posmatranog elementa (sistema) kao objekta održavanja, x_d je dozvoljeni nivo parametra stanja, posle koga treba sprovesti odgovarajuće postupke POPS ili preventivne zamene, a x_g je *granično stanje* ili stanje *u otkazu*.

U slučaju diskretne (periodične) provere parametra stanja (slika 4) radi se o modelu preventivnih pregleda, odnosno *provera stanja*, koji traži da se

u pogodno odabranim trenucima vremena, t_1, t_2 , itd., a ponekad i neprekidno (slika 5), vrše provere merodavnih pa-

Sl. 4 — Model POPS sa periodičnom proverom parametra stanja $x(t)$

$R(t)$ — pouzdanost, t_1 — trenutak »prve« provere stanja, t_2 — trenutak »druge« provere stanja, $X(t)$ — parametar stanja, x_n — nominalna vrednost, x_d — dozvoljena vrednost, x_g — granična vrednost

Sl. 5 — Model POPS sa kontinualnom proverom parametra stanja $X(t)$

$R(t)$ — pouzdanost, $X(t)$ — parametar stanja, x_n — nominalna vrednost, x_d — dozvoljena vrednost, x_g — granična vrednost

rametara stanja. U zavisnosti od dobijenih rezultata *provera stanja* odlučuje se o eventualnim preventivnim zamena ili o sprovođenju drugih postupaka POPS.

Model EKRAN za vezu periodičnosti provere stanja sastavnog elementa sistema sa signalizacionom tolerancijom parametra stanja

Model EKRAN za vezu periodičnosti provere stanja sastavnog elementa sistema sa signalizacionom tolerancijom parametra stanja.

Jedan od modela POPS sa proverom parametara koji se može primeniti na sistem je model EKRAN [14].

Naime, za otkrivanje *predotkaznog stanja*, tj. dozvoljene vrednosti parametra stanja (x_d), ili granične vrednosti parametra stanja (x_g) pri kojoj se javlja stanje *u otkazu*, može se iskoristiti princip određivanja tzv. *signalizacione tolerancije* parametra stanja. To je dijapazon između granične i dozvoljene vrednosti parametra. Ako parametar stanja dostigne dozvoljenu vrednost (x_d) znači da je neophodno izvršiti određene postupke održavanja, kako bi se sprečila pojava stanja *u otkazu*. Veličina *signalizacione tolerancije* ($\Delta x = x_g - x_d$) zavisi od veličine periodičnosti *provere stanja* ($\Delta t = t_2 - t_1$), u intervalu Δt između dve *provere stanja*.

Modelom EKRAN određuje se veza periodičnosti provere parametra stanja ($\Delta t = t_2 - t_1$) i *signalizacione tolerancije* parametra stanja ($\Delta x = x_g - x_d$) pri obezbeđenju željenog nivoa pouzdanosti. Model je zasnovan na realnoj situaciji da stohastičke promene parametara stanja elemenata sistema nameću potrebu njihovog držanja u granicama dozvoljenih odstupanja funkcije cilja — pouzdanosti.

Za dobijanje optimalne periodičnosti *provere stanja* na slici 6 su prikazani [14]:

$x(t)$ — monotona funkcija vremena t , koja odgovara proveravanom parametru stanja sistema;

x_g — granična vrednost parametra stanja, posle koje dolazi do *otkaza* elementa, a poznata je iz normativno-tehničke dokumentacije sistema;

x_d — dozvoljena vrednost parametra stanja je takva da interval $\Delta x = x_g - x_d$ određuje *signalizacionu toleranciju*, čija je vrednost relevantna izlazna operaciona karakteristika modela.

Oblast $(0, x_d)$ može se nazvati *ispravnim stanjem* elementa (stanje 1), oblast (x_d, x_g) stanjem u kojem se primenjuju postupci POPS (stanje 2), a oblast (x_g, ∞) stanjem kada se javlja *otkaz* (stanje 3).

Sl. 6 — Veza periodičnosti »provere stanja« elementa (Δt) sa »signalizacionom tolerancijom« parametra stanja (Δx) — model EKRAN)

t_1 — vremenski trenutak »prve provere stanja« elementa, t_2 — vremenski trenutak »druge provere stanja« elementa, $\bar{x}$ — srednja vrednost promene parametra stanja, 1 — ispravno stanje, 2 — stanje u kojem se primenjuju postupci POPS, 3 — stanje »u otkazu«, $\Delta x = x_g - x_d$ — »signalizaciona tolerancija« parametra stanja, $\Delta t = t_2 - t_1$ — periodičnost »provere stanja« elementa, x_n — nominalna vrednost parametra stanja, x_d — dozvoljena vrednost parametra stanja, x_g — granična vrednost parametra stanja, $f(x,t)$ — funkcija gustine raspodele parametra stanja, $\Psi(t, x_g)$ — funkcija gustine raspodele stanja elementa »u otkazu«, $\overline{ab}$ — »horizontalni ekran«, $\overline{bc}$ — »vertikalni ekran«

Usvajajući da su t_1 i t_2 odgovarajući trenuci izvođenja *prve* i *druge provere stanja* parametra, respektivno, t_x — slučajni trenutak presecanja vrednosti x_d i x_g , tj. t_d i $t_g \in t_x$, može se napisati verovatnoća ispravnog rada elementa koristeći sliku 6, $\Psi(t_x, x_d)$ i

$f(x, t_2)$ kao gustine raspodele slučajne veličine t_x na nivou x_d i slučajne veličine $x \in x(t)$ u trenutku t_2 :

$$P\{t_x \leq t_1\} \text{ pri } x_d = P\{x > x_g\} \text{ pri } t_2, \quad (1)$$

odnosno, koristeći se poznatim zakonitostima iz teorije verovatnoće, mogu se napisati jednačine:

$$\int_{x_g}^{\infty} f(x, t_2) dx = \int_0^{t_1} \psi(t_x, x_d) dt_x, \quad (2)$$

$$\int_{x_d}^{\infty} f(x, t_2) dx = \int_0^{t_2} \psi(t_x, x_d) dt_x, \quad (3)$$

Posle upoređenja jednačina (2) i (3) može se dobiti matematički model — model EKRAN:

$$\int_{x_d}^{x_g} f(x, t_2) dx = \int_{t_1}^{t_2} \psi(t, x_d) dt. \quad (4)$$

Može se zaključiti da za monotoni proces $x(t)$ sa zadatim t_1 i x_g sledeći trenutak provere parametra stanja t_2 i *predotkazni nivo* x_d zadovoljavaju jednačinu (4) za opšte uslove korišćenja sistema.

U toku realnog procesa korišćenja sistema, sve vrednosti $x(t_x)$ grupisane se oko srednje vrednosti $\bar{x}(t_x)$ i imaće rasipanje oko nje izraženo standardnom devijacijom.

Jednačina koja potpuno opisuje matematički model promene parametara stanja koje kvantitativno definiše dijapazon vrednosti datih parametara u kome se nalazi $x(t)$, uz korišćenje intervala poverenja $\pm \sigma_x$ ($\pm 2\sigma_x$, $\pm 3\sigma_x$), za slučaj linearne promene parametra stanja je:

$$x(t) = a \cdot t + x_n \pm 3\sigma_x, \quad (5)$$

gde su:

a — koeficijent koji karakteriše brzinu promene parametra stanja

$$\left(a = \frac{dx}{dt} \right)$$

t — vreme rada elementa,

x_n — nominalna (početna) vrednost parametra stanja.

U jednačini (4), u jednom slučaju se za zadato t_1 može uzeti $t_1 = 0$. U drugom slučaju, vrednost za trenutak *prve provere stanja* (t_1) određuje se iz uslova zadatog nivoa verovatnoće pouzdanosti $p_z = R_z$, ili verovatnoće nastanka otkaza $p_o = 1 - p_z$. Može se napisati za neki trenutak (t_1), odnosno, u opštem slučaju, za trenutak (t_x):

$$P\{x_g \leq \infty, t_x\} = \int_{x_g}^{\infty} f(x, t_x) dx \leq p_o, \quad (6)$$

odnosno:

$$P(t_x) = \int_0^{t_x} \psi(t_x \cdot x_g) dt = \frac{\Phi[\bar{x}(t_x) - x_g]}{\sigma_x} \quad (7)$$

Što predstavlja vezu karakteristika pouzdanosti sistema i parametara stanja.

Prema tome, iz dokazane teoreme (4) proizlazi sledeća jednačina:

$$\int_0^{t_1} \psi(t, x_d) dt = \int_{t_1}^{t_2} \psi(t, x_g) dt. \quad (8)$$

Korišćenjem teoreme (4) obezbeđuje se takav raspored EKRANA, pri kojem sve trajektorije procesa $x(t)$ prolaze kroz *horizontalni neprovidni ekran* ($\overline{ab}$) i padaju na *vertikalni neprovidni ekran* ($\overline{bc}$), (slika 6).

Na taj način, određena je veza *signalizacije tolerancije* ($\Delta x = x_g - x_d$) i periodičnosti provere parametra stanja ($\Delta t = t_2 - t_1$).

Za normalni zakon raspodele $f(x, t)$ slučajnog procesa $x(t)$, koristeći jednačinu (8), može se odrediti zavisnost *signalizacije tolerancije* (Δx) od periodičnosti *provere stanja* (Δt).

Za određivanje trenutka izvođenja provere parametra stanja, potrebno je odrediti gustine raspodele $f(x, t_2)$ i $\Psi(t, x_d)$. Neka su, za normalni zakon promene

ne parametra stanja, matematičko očekivanje $m_x(t)$ i srednje kvadratno odstupanje $\sigma_x(t)$ aproksimirani linearnim zavisnostima:

$$\begin{aligned} m_x(t) &= m_a + m_b \cdot t, \\ \sigma_x(t) &= \sigma_a + \sigma_b \cdot t, \end{aligned} \quad (9)$$

gde su:

$m_a, m_b, \sigma_a, \sigma_b$ — parametri stanja u trenucima a i b označenim na slici 6.

$$(m_b = \left(\frac{dm}{dt}; \sigma_b = \frac{d\sigma}{dt}\right).$$

Koeficijenti parametra stanja izračunavaju se prema sledećim jednačinama [14]:

$$\begin{aligned} m_a &= \frac{t_{i+1} \cdot m_x(t_i) - t_i \cdot m_x(t_{i+1})}{t_{i+1} - t_i} \\ m_b &= \frac{m_x(t_{i+1}) - m_x(t_i)}{t_{i+1} - t_i} \\ \sigma_a &= \frac{t_{i+1} \cdot \sigma_x(t_i) - (t_i \cdot \sigma_x(t_{i+1}))}{t_{i+1} - t_i} \\ \sigma_b &= \frac{\sigma_x(t_{i+1}) - \sigma_x(t_i)}{t_{i+1} - t_i} \end{aligned} \quad (10)$$

Ovakva aproksimacija je od velike koristi za rešavanje periodičnosti *provere stanja* sistema. Tada se gustina raspodele $f(x, t_2)$ može odrediti prema:

$$\begin{aligned} f(x, t_2) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_a + \sigma_b \cdot t)}} \cdot \\ &\cdot \exp \left[-\frac{(x - m_a - m_b \cdot t)^2}{2(\sigma_a + \sigma_b \cdot t)} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

a gustina raspodele prvog presecanja *predotkaznog nivoa*:

$$\Psi(t, x_d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(x_d - m_a - m_b \cdot t)^2}{2(\sigma_a + \sigma_b \cdot t)} \right] \frac{d}{dt} \left[\frac{x_d - m_a - m_b \cdot t}{\sigma_a + \sigma_b \cdot t} \right] \quad (12)$$

Trenutak prve provere stanja elementa može se dobiti iz uslova da sastavni element ispuni zahtevanu pouzdanost.

Tako se iz jednačine (6) može dobiti trenutak *prve provere stanja elementa* (t_1), posle unosenja $f(x, t_1)$ za normalnu raspodelu:

$$t_1 = \frac{1}{m_b - \sigma_b \cdot U_{1-p_0}} (x_g - \sigma_a \cdot U_{1-p_0} - m_a) \quad (13)$$

gde je:

U_{1-p_0} — kvantil normalne raspodele (kumulativne učestalosti) koji odgovara verovatnoći pouzdanosti p_z za vreme Δt , (uzima se iz tablica u literaturi).

Dozvoljena vrednost parametra stanja (x_d) i *signalizaciona tolerancija* (Δx) mogu se izračunati uvođenjem jednačina (11) i (12) u jednačinu (4) i obavljanjem neophodnih transformacija i integracija (za normalni zakon raspodele parametra stanja), kao zavisnosti od periodičnosti provere parametra stanja.

$$\begin{aligned} x_d &= f(\Delta t) \text{ i } \Delta x = x_g - x_d = \\ &= f(\Delta t), \text{ odnosno:} \end{aligned}$$

$$x_d = \frac{\sigma_a(x_g - m_b \cdot \Delta t) + \sigma_b(x_g \cdot t_1 + m_a \cdot \Delta t)}{\sigma_a + \sigma_b(t_1 + \Delta t)} \quad (14)$$

$$\Delta x = x_g - x_d = \frac{(x_g \cdot \sigma_b + m_b \cdot \sigma_a - m_a \cdot \sigma_b) \cdot \Delta t}{\sigma_a + \sigma_b(\Delta t + t_1)} \quad (15)$$

Ako je izmerena vrednost parametra stanja ispod definisane dozvoljene vrednosti (x_d), mora se tražiti *trenutak sledeće provere stanja* i to za svaki sastavni element sistema posebno. Zato prvo treba izračunati $\Delta_x(t_1) = x_d - x(t_1)$. Nakon obavljenih transformacija i in-

tegracija i uvođenja jednačina (11) i (12) u jednačinu (4) dobija se:

$$t_2 = \frac{t_1(m_a \cdot \sigma_b - m_b \cdot \sigma_a) + \sigma_a \cdot x_d - (\sigma_a + \sigma_b) \cdot x_g}{m_a \cdot \sigma_b - m_b \cdot \sigma_a - \sigma_b \cdot x_d} \quad (16)$$

odnosno:

$$t_2 = \frac{1}{a} [x_d + \Delta x(t_1)]. \quad (17)$$

Jednačine (16) i (17) određuju *trenutak druge provere stanja elementa*. U trenutku t_2 ponavlja se isti postupak kao i u trenutku t_1 .

Razvoj algoritma za primenu modela EKLAN

Model EKLAN primenjuje se kroz sledeće korake (prikazane algoritamski na slici 7):

1. Definirati parametar stanja (x) sistema, koji se menja u funkciji vremena rada sistema, tj. $x = f(t)$.

2. Na bazi eksperimentalnih ispitivanja sistema utvrditi koeficijente a i b iz jednačine promene parametra stanja $x(t) = a \cdot t^b + x_n$ i pribaviti podatke iz normativno-tehničke dokumentacije za početnu (nominalnu) vrednost parametra stanja (x_n) i graničnu vrednost parametra stanja (x_g) pri kojoj dolazi do otkaza sastavnog elementa sistema.

3. Izvršiti izbor dijagnostičkog parametra stanja (Y) (u slučaju kada se strukturni parametar x određuje preko dijagnostičkog parametra (Y) sa kojim je povezan regresivnom krivom $x = A \cdot Y + B$, gde su A i B koeficijenti koji se određuju na bazi eksperimentalnih ispitivanja sistema, a dijagnostički parametar treba u potpunosti da odgovara strukturnom parametru, tj. koeficijent korelacije (r) treba da je: $r = \pm 1$ [7]).

4. Odrediti standardnu devijaciju (σ_x) za slučaj normalne raspodele parametra stanja (x).

5. Pribaviti podatak o nivou zadate pouzdanosti (R_z) i iz tablica normalne raspodele odrediti $F(R)$ i kvantil normalne raspodele (U_{1-p_0}).

6. Za uzorak $n \geq 30$ istotipskih sastavnih elemenata sistema, i za njihove fiksirane vrednosti vremena rada t_1 i t_2 , koristeći podatke o broju otkaza $N(\Delta t)$ i $N(t)$ odrediti gustinu raspodele parametra stanja $f(t)$, pouzdanost $R(t)$ i nepouzdanost $F(t)$.

7. Za fiksirane vrednosti vremena rada sastavnog elementa sistema t_1 i t_2 odrediti empirijske gustine raspodele parametra stanja $f(x, t_1)$ i $f(x, t_2)$, matematička očekivanja $m_x(t)$ i srednja kvadratna odstupanja $\sigma_x(t)$.

8. Nacrtati histograme raspodele parametra stanja $f(x, t_1)$ i $f(x, t_2)$ i grafik promene matematičkog očekivanja $m_x(t)$.

9. Odrediti matematička očekivanja $m_x(t_i)$ i $m_x(t_{i+1})$ i srednja kvadratna odstupanja parametra stanja $\sigma_x(t_i)$ i $\sigma(t_{i+1})$ koristeći podatke za $F(t)$ (grafičkom metodom pomoću verovatnosnog papira za normalnu raspodelu ili pomoću elektronskog računara).

10. Izračunati koeficijente m_a , m_b , σ_a i σ_b prema formulama (10).

11. Izračunati matematičko očekivanje $m_x(t)$ i srednje kvadratno odstupanje $\sigma_x(t)$ za normalni zakon raspodele parametra stanja, prema formuli (9).

12. Izračunati vremenski trenutak *prve* provere parametra stanja (t_1) prema formuli (13).

13. Izračunati dozvoljenu vrednost parametra stanja (x_d) prema formuli (14).

14. Izračunati *signalizacionu toleranciju* parametra stanja $\Delta x = x_g - x_d$ prema formuli (15).

15. Ako je izmerena vrednost parametra stanja (x_i) veća od dozvoljene vrednosti parametra stanja (x_d), tj. $x(t_i) \geq x_d$, pristupa se sprovođenju postupaka POPS, kako bi se element pono-

Sl. 7 — Algoritam modela EKRAN

vo vratio u stanje ispravnosti (tako da parametar stanja ima vrednost ispod dozvoljene, odnosno $x < x_d$).

16. Ako je izmerena vrednost parametra stanja (x_i) manja od dozvoljene vrednosti parametra stanja (x_d), tj. $x_i < x_d$, onda se određuje vremenski trenutak *druge* provere parametra stanja (t_2) prema formulama (16 i 17). Zato prvo treba izračunati $\Delta x(t_1) = x_d - x(t_1)$.

17. Izračunati periodičnost provere parametra stanja $\Delta t = t_2 - t_1$.

18. U trenutku t_2 ponavlja se isti postupak kao i u trenutku t_1 .

Prikaz metodologije za primenu modela EKРАН

Postavljen je zahtev da se oceni stanje glavnog prenosnika (veličina bočnog zazora zupčanika) bez njegovog skidanja sa motornog vozila i rasklapanja. Taj problem je moguće rešiti primenom dijagnostičke metode merenja sumarnog ugaonog (radijalnog) zazora glavnog prenosnika [5, 10, 16], odnosno primenom modela EKРАН [10, 11].

U radu [10] su, za uzorak $n=30$ glavnih prenosnika i za pretpostavljene raspodele vrednosti sumarnog ugaonog (radijalnog) zazora glavnog prenosnika, određene operacione karakteristike modela EKРАН.

Na bazi ispitivanja [5, 16] definisana je postepena promena sumarnog ugaonog (radijalnog) zazora glavnog prenosnika motornog vozila, čija je zakonitost promene data u obliku stepene funkcije $Y(t) = a \cdot t^b + Y_n$ (slika 8), što je uslov za primenu modela EKРАН.

Za fiksirane vrednosti rada glavnog prenosnika t_1 i t_2 , određene su empirijske gustine raspodele dijagnostičkog parametra $f(Y, t_1)$ i $f(Y, t_2)$, matematičko očekivanje $m_y(t)$ i srednje kvadratno odstupanje dijagnostičkog parametra $\sigma_y(t)$ [10].

Sl. 8 — Postepena promena sumarnog ugaonog (radijalnog) zazora glavnog prenosnika (Y) u zavisnosti od pređenog puta motornog vozila ($Y = f(t)$)

Histogrami raspodele dijagnostičkog parametra $f(y, t_1=6000 \text{ km})$ i $f(y, t_2=12000 \text{ km})$ dati su na slikama 9 i 10.

Sl. 9 — Histogram raspodele $f(y, t)$ sumarnog ugaonog zazora u trenutku $t_1 = 6000 \text{ [km]}$ glavnog prenosnika motornog vozila

Za normalni zakon raspodele dijagnostičkog parametra, matematičko očekivanje $m_y(t)$ i srednje kvadratno odstupanje $\sigma_y(t)$ aproksimirani su linijskim funkcijama:

$$m_y(t) = m_a + m_b \cdot t, \quad (18)$$

$$\sigma_y(t) = \sigma_a + \sigma_b \cdot t,$$

gde su:

a i b — vremenski trenuci označeni na slici 6.

Radi proračuna modela EKTRAN odabrani su početni podaci za sumarni ugaoni zazor glavnog prenosnika motornog vozila:

Sl. 10 — Histogram raspodele $f(y, t)$ sumarnog ugaonog zazora u trenutku $t_2 = 12000$ [km] glavnog prenosnika motornog vozila

$Y_n = 20^\circ$ — nominalna vrednost dijagnostičkog parametra,

$Y_g = 55^\circ$ — granična vrednost dijagnostičkog parametra,

$R_z = 0,95$ — zadata (zahtevana) pouzdanost, i

$U_{1.p_0} = 2$ — kvantil normalne raspodele (uzima se iz tablica u literaturi).

Koeficijenti m_a , m_b , σ_a i σ_b izračunavaju se prema (10) i dobijene su vrednosti:

$$m_a = 27$$

$$m_b = 0,0005$$

$$\sigma_a = 12$$

$$\sigma_b = 0,000166.$$

Prema izrazima (13, 14 i 15) izračunate su izlazne operacione karakteristike modela EKTRAN: vremenski trenutak prve provere stanja glavnog prenosnika $t_1 = 24 \times 10^3$ [km], dozvoljena vrednost dijagnostičkog parametra $Y_d = 49,6^\circ$ i signalizaciona tolerancija dijagnostičkog parametra $\Delta Y = 5,3^\circ$.

Na osnovu rezultata proračuna modela ilustrovan je princip modela EKTRAN na slici 11.

Sl. 11 — Zavisnost dozvoljene vrednosti (Y_d) i »signalizacione tolerancije« dijagnostičkog parametra (ΔY) od periodičnosti »provere stanja« (Δt) elementa, dobijena na osnovu proračuna modela EKTRAN, za dati primer

Simulacija modela EKTRAN primenom elektronskog računara

Na osnovu razvijenog algoritma i definisane metodologije za primenu modela EKTRAN, u prethodnim tačkama, u okviru programskog paketa DMPOPS [13], razvijen je računarski program za simulaciju modela EKTRAN. Na bazi podataka o elementima motornog vozila, tj. njihove vremenske slike stanja, izvršen je izbor raspodele i utvrđen karakter funkcije intenziteta otkaza (λ). Koristeći te podatke i podatke o ulaznim parametrima modela EKTRAN (prikazane na slici 12), simuliran je model EKTRAN primenom elektronskog raču-

Zadaj vreme prve dijagnostičke provere

6000

Zadaj vreme druge dijagnostičke provere

1200

Zadaj granič. vrednost dijagn. parametra

55

Sl. 12 — Zadavanje ulaznih parametara za simulaciju modela EKTRAN primenom elektronskog računara

nara i grafički interpretiran (što je prikazano na slici 13) [13]. Sa prikazane slike uočavaju se izlazne operacione ka-

Sl. 13 — Rezultati simulacije modela EKTRAN — izlazne operacione karakteristike modela: t_1 = vreme »prve provere stanja«, x_d = dozvoljena vrednost parametra stanja, Δx = »signalizaciona tolerancija« parametra stanja

rakteristike modela EKTRAN: vreme prve provere stanja $t_1 = 24 \cdot 10^3$ km, dozvoljena vrednost parametra stanja $X_d = 51,2^\circ$ i signalizaciona tolerancija parametra stanja $\Delta X = 3,7^\circ$.

Zaključak

Izborom koncepcije POPS, koja predstavlja jedan od najperspektivnijih i najekonomičnijih metoda upravljanja procesima promene stanja i održavanja sistema i primenom razvijenog matematičkog modela koji se temelji na ovoj koncepciji, ostvaruju se značajni efekti u pogledu obezbeđenja zahtevanog nivoa pouzdanosti i gotovosti sistema, istovremeno smanjujući troškove održavanja.

Matematički model POPS sa proverom parametara stanja uspostavlja direktne odnose između pouzdanosti i zakonitosti promene parametra stanja posmatranog elementa. Izlazne operacione karakteristike modela (vremenski trenutak prve provere stanja, dozvoljena vrednost parametra stanja signalizaciona tolerancija parametra i vremenski trenutak druge provere stanja) definišu dinamiku provere stanja, i u zavisnosti od rezultata provere elementa preduzimaju se odgovarajući postupci POPS pri čemu se obezbeđuje zahtevani nivo pouzdanosti i postiže maksimalna iskorišćenost resursa rada elementa. Praćenjem promene odabranog dijagnostičkog parametra može se nadzirati promena strukturnog parametra elementa, bez rasklapanja, što predstavlja osnovnu ideju, međutim, do njene realizacije nužno je rešiti problem retrospekcije, dijagnostike i prognoziranja. Rezultatima simulacije modela EKTRAN, na datom primeru primene, dokazana je veza između periodičnosti provere stanja i signalizacione tolerancije parametra stanja, pri obezbeđenju željenog nivoa pouzdanosti elementa. Primena ovog modela ograničena je isključivo na elemente sa kontinualnom promenom parametra stanja u funkciji vremena rada.

Prikazana metodologija modela EKTRAN može se primeniti za razne parametre stanja u procesu POPS sistema.

Osnovni preduslov za simulaciju modela EKTRAN jeste postojanje informacionog sistema koji obezbeđuje sve potrebne podatke o radu i održavanju sistema.

Literatura:

- [1] Baldin, A.: ODRŽAVANJE PO STANJU — II DEO, IIS — prolećni seminari: Savremene koncepcije održavanja, Dubrovnik, 1989.
- [2] Baldin, A., Furianetto, L.: ODRŽAVANJE PO STANJU, OMO, Beograd, 1980.
- [3] Baldin, A., Furianetto, L., Roversi, A. i dr.: PRIRUČNIK ZA ODRŽAVANJE INDUSTRIJSKIH POSTROJENJA, OMO, Beograd 1979.
- [4] Gertsbakh, I. B.: MODELS OF PREVENTIVE MAINTENANCE, North — Holland publishing company, Amsterdam — New York — Oxford, 1977.
- [5] Govoruščenko, N. J.: TEHNIČESKAJA EKSPLOATACIJA AVTOMOBILEJ, Viššaja škola, Harkov, 1984.
- [6] Knežević, J.: PRILOG FORMIRANJU MODELA PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA MAŠINSKIH SISTEMA PREMA TEHNIČKOM STANJU, OMO, Beograd, br. 5, 1983.
- [7] Knežević, J.: »DIJAGNOSTIKA« KAO ELEMENT MODELA PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA MAŠINSKIH SISTEMA PREMA TEHNIČKOM STANJU, OMO, Beograd, br. 7, 1983.
- [8] Kodžopeljić, J.: PRILOG PROUČAVANJU POLITIKE PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA MOTORNIM VOZILA ZA POTREBE OPŠTENARODNE ODBRANE, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1981.
- [9] Lazović, M.: PRILOG DEFINIRANJU STRATEGIJE ODRŽAVANJA PREMA STANJU SLOŽENIH MAŠINSKIH SISTEMA, Doktorska disertacija, Visoke vojnotehničke škole KoV JNA, Zagreb, 1989.
- [10] Minić, S.: ISTRAŽIVANJE MODELA PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA PREMA STANJU I NJIHOVA PRIMENA NA MOTORNIM VOZILIMA, Magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 1988.
- [11] Minić, S., Todorović, J.: MODEL »EKRAK ZA VEZU PERIODIČNOSTI PROVERE STANJA SASTAVNOG ELEMENTA MOTORNOG VOZILA SA SIGNALIZACIONOM TOLERANCIJOM PARAMETRA STANJA, Naučno-tehnički pregled, Beograd, br. 4, 1990.
- [12] Minić, S., Todorović, J.: SISTEMSKE PRILOG IZBORU KONCEPCIJE I MODELA PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA PREMA STANJU, MOTORNIM VOZILA, Vojnotehnički glasnik, Beograd, br. 3, 1993.
- [13] Minić, S.: DINAMIČKI MODEL PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA PREMA STANJU MOTORNIM VOZILA, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1993.
- [14] Smirnov, N. N., Ickovič, A. A.: OBSLUŽIVANIE I REMONT AVIACIONNOJ TEHNIKI PO SOSTOJANIJU, Transport, Moskva, 1980.
- [15] Smit, K.: WHY CONDITION MONITORING? — CONDITION MONITORING AS PART OF A MAINTENANCE CONCEPT FOR COMPLEX EQUIPMENT, XIII th Conference YUMO '86, Beograd, 1986.
- [16] Spičkin, G. V., Tretjakov, A. M.: PRAKTIKUM PO DIAGNOSTIROVANIJU AVTOMOBILEJ, Viššaja škola, Moskva, 1986.
- [17] Stanković, R.: IZBOR POLITIKE ODRŽAVANJA TMS, Vojnotehnički glasnik, Beograd, br. 4, 1985.
- [18] Todorović, J.: ISTRAŽIVANJE OSNOVNIH KARAKTERISTIKA POUZDANOSTI FRIKCIONIH OBLOGA KOČNICA U USLOVIMA EKSPLOATACIJE TEŠKIH MOTORNIM VOZILA U NAŠOJ ZEMLJI, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1972.
- [19] Todorović, J.: KOČENJE MOTORNIM VOZILA, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1988.
- [20] Todorović, J.: INŽENJERSTVO ODRŽAVANJA TEHNIČKIH SISTEMA — MAINTAINABILITY ENGINEERING, JUMV, Beograd, 1993.
- [21] Todorović, J.: ODRŽAVANJE TEHNIČKIH SISTEMA — NAUKA ILI VEŠTINA?, SYMOPIS '94, Kotor, 1994.