Dr Svetomir Minić,
potpukovnik, dipl. inž.
Odeljenje za naučno-
istraživačku delatnost GŠ VJ,
Beograd

Dr Jovan Todorović,
profesor, dipl. inž.
Mašinski fakultet, Beograd

MODEL PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA TEHNIČKIH SISTEMA PREMA STANJU SA KONTROLOM NIVOA POUZDANOSTI

UDC: 62-1.004:681.5.01.001.573

Rezime:

Metodologija za primenu modela preventivnog održavanja definisana je prema stanju sa kontrolom nivoa pouzdanosti. Kao izlazna operaciona karakteristika modela dobija se gornja granica regulacije nivoa pouzdanosti elemenata tehničkog sistema. Prikazani su rezultati simulacije modela na primeru preventivnog održavanja istotipskih elemenata motornog vozila.

Ključne reči: model održavanja, kontrola nivoa pouzdanosti, gornja granica regulacije, simulacija.

RELIABILITY LEVEL INSPECTION TECHNICAL SYSTEMS PREVENTIVE ON-CONDITION BASED MAINTENANCE MODEL

Summary:

The implementation methodology of the reliability level inspection preventive on-condition based maintenance model has been defined. Top regulation border of the technical system elements reliability level, as the model output operational characteristic, is determined. Simulation results of the identical vehicles elements preventive maintenance example have been presented.

Key words: maintenance model, reliability level inspection, top regulation border, simulation.

Uvod

Za analizu i optimizaciju sistema održavanja u Inženjerstvu održavanja tehničkih sistema koriste se razni oblici i vrste matematičkih modela koji se nazivaju modeli održavanja. Svi modeli održavanja počivaju na pokazateljima pouzdanosti, što znači da je bitan preduslov za analizu i optimizaciju sistema održavanja poznavanje zakona pouzdanosti tehničkih sistema koji se održavaju [1].

Model preventivnog održavanja prema stanju sa kontrolom nivoa pouzdanosti — model POPS_{knp} (Reliabi-

lity Level Inspection Preventive On-Condition Based Maintenance Model) zasniva se na karakteristikama pouzdanosti elemenata tehničkog sistema, na osnovu kojih se donose odluke o aktivnostima održavanja. Kod ovog modela kriterijum stanja sastavnih elemenata sistema jeste dozvoljeni nivo pouzdanosti (R_d) koji se izražava pokazateljem pouzdanosti — intenzitetom otkaza $\lambda(t)$.

U ovom radu razrađen je model POPS_{knp} [3] u kojem se, kao dijagnostički parametar stanja, koristi potok otkaza $\omega(t)$, na osnovu kojeg se u procesu održavanja kontroliše nivo

pouzdanosti sastavnih elemenata sistema. U slučaju kada se prilikom kontrole nivoa pouzdanosti ustanovi da se stvarni nivo pouzdanosti (R_s) nalazi u dozvoljenim granicama odstupanja, nastavlja se proces korišćenja sistema. Međutim, ako se ustanovi da je stvarni nivo pouzdanosti manji od dozvoljenog ($R_s < R_d$), obavlja se analiza uzroka odstupanja i preduzimaju mere za povećanje nivoa pouzdanosti, odnosno preduzimaju se potrebne aktivnosti održavanja.

Za simulaciju matematičkog modela $POPS_{knp}$, odnosno za njegovo brzo i precizno rešavanje razvijen je softver za elektronski računar [6], kojim se aproksimativno prikazuje proces operativne kontrole nivoa pouzdanosti elemenata sistema. Kao izlazna operaciona karakteristika simuliranog modela dobija se, u grafičkom i analitičkom obliku, tzv. »gornja granica regulacije« (GGR) nivoa pouzdanosti, koja predstavlja relevantnu informaciju u procesu donošenja odluke korisnika za pravovremeno i efikasno sprovođenje aktivnosti održavanja.

Postavke i definicije

Metodologija modela $POPS_{knp}$ svodi se na princip da se istotipski elementi sistema koriste bez ograničenja resursa za održavanje, uz izvršenje neophodnih postupaka korektivnog održavanja, sve dok je stvarni nivo pouzdanosti veći od dozvoljenog ($R_s > R_d$), što je grafički prikazano na slici 1 [6].

U ovom modelu kao pokazatelj pouzdanosti koristi se $\omega(t)$ — parametar toka otkaza (vremenski trenuci pojave otkaza formiraju 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 :

$$\omega(t) = M \cdot r(t) \quad (1)$$

gde je:

M — matematičko očekivanje,
 $r(t)$ — broj otkaza.

Sl. 1 — Model $POPS$ sa kontrolom nivoa pouzdanosti $R(t)$ elemenata tehničkog sistema

R_s — stvarni nivo pouzdanosti, R_d — dozvoljeni nivo pouzdanosti, t_k — periodičnost kontrole nivoa pouzdanosti, x_g — granična vrednost parametra stanja, x_n — nominalna vrednost parametra stanja

Teorijska postavka modela $POPS_{knp}$ zasniva se na Poasonovoj raspodeli slučajno promenljive veličine [5]:

$$p = \frac{r^n}{n!} e^{-r} \quad (2)$$

Kod Poasonove raspodele (2) 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 .

Posebnu pažnju kod modela $POPS_{knp}$ zahteva izbor dozvoljenog nivoa pouzdanosti (R_d) koji se utvrđuje za svaki sastavni element sistema, uz analizu troškova održavanja [3].

Za početak primene modela moguće je određivanje dozvoljenog nivoa pouzdanosti (R_d) za istotipske sastavne elemente sistema na osnovu empirijskih pokazatelja za prethodnih 3 do 5 godina korišćenja sistema [3]. Takođe, preporučuje se primena periodične kontrole nivoa po-

uzdanosti istotipskih elemenata određenog skupa sistema, npr. kvartalno, godišnje, i sl. [3].

Opis modela POPS_{knp}

Polazni parametri za ovaj model su [3]:

- n_s — stvarni broj otkaza istotipskih elemenata sistema za praćeni period korišćenja,
- t_{sr} — srednje vreme »u radu« elementa,
- N — broj posmatranih sistema,
- a — broj istotipskih elemenata u sistemu čiji se nivo pouzdanosti kontroliše.

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

Gornja granica regulacije nivoa pouzdanosti zasniva se na Poasonovom zakonu raspodele i određuje se sa usvojenom verovatnoćom (p_z) i gornjom granicom otkaza (n_{max}) [3]:

$$p_z = \sum_{n=0}^{n=GGR} \frac{(\omega_s \cdot N \cdot t_{sr} \cdot a)^n}{n!} \exp(-\omega_s \cdot N \cdot t_{sr} \cdot a) \quad (3)$$

gde je:

ω_s — planirani parametar toka (kretanja) otkaza (dozvoljeni nivo pouzdanosti), koji se za početak primene modela POPS_{knp} određuje na osnovu iskustva, odnosno ispitivanjem sistema u prethodnom vremenskom periodu korišćenja (3 do 5 godina) [3],

p_z — zadati nivo verovatnoće gornje granice broja otkaza.

Uvrštavanjem vrednosti polaznih parametara u jednačinu (3) 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 osnovu kojeg se donose odluke. Ako se konstatuje da je $n_s < GGR$, produžava se primena modela POPS_{knp}, odnosno nastavlja se korišćenje sistema do sledeće kontrole nivoa pouzdanosti. Ako je $n_s > GGR$, preduzimaju se mere za povećanje nivoa pouzdanosti elemenata (menja se periodičnost kontrole, ispituje se uzrok otkaza, menjaju se uslovi korišćenja, i sl.) i proverava ekonomska pogodnost tih mera. Ako preduzete mere daju nepovoljan rezultat, razmatra se konstrukcijski nedostatak elementa. U slučaju da se ne usvoji povećanje nivoa pouzdanosti elemenata, prelazi se na primenu modela preventivnog održavanja »po vremenu« ili korektivno održavanje.

Model POPS_{knp} realizuje se na osnovu obrade statističkih podataka o pouzdanosti elemenata sistema tokom

Sl. 2 — Algoritam modela POPS_{knp}

celog perioda korišćenja, primenom elektronskog računara, a postupak je prikazan algoritamski na slici 2 [6].

Primer primene modela $POPS_{knp}$

Pretpostavka je da bi model $POPS_{knp}$ koji se koristi u vazduhoplovstvu [3], mogao naći praktičnu primenu i na motornim vozilima za određene istotipske sastavne elemente sa približno konstantnim intenzitetom otkaza $\lambda(t)$.

Primena modela biće pokazana na realnom primeru.

Radi obezbeđenja i održanja zadatog nivoa pouzdanosti, za skup istotipskih kotrljajnih ležišta jednog sklopa motornog vozila, na osnovu podataka o njihovim otkazima, za prethodni jednogodišnji period korišćenja, primeniće se model $POPS_{knp}$.

Ulazni podaci za matematički model (3) su [6]:

$N=30$	— broj motornih vozila,
$a=2$	— broj istotipskih kotrljajnih ležišta u sklopu,
$n_s=3$	— stvarni broj otkaza kotrljajnih ležišta za prethodni jednogodišnji period korišćenja,
$t_{sr}=800 \text{ h}$	— srednje vreme »u radu« kotrljajnih ležišta,
$\omega=4,2 \cdot 10^{-5}$	— parametar toka kretanja otkaza kotrljajnih ležišta (dijagnostički parametar stanja), određen praćenjem trogodišnjeg perioda korišćenja skupa motornih vozila,
$p_z=0,975$	— zadati nivo verovatnoće gornje granice broja otkaza.

Uvrštavanjem polaznih podataka u jednačinu modela (3) i njenim rešavanjem, dobija se relevantna izlazna

operaciona karakteristika modela — gornja granica regulacije (GGR) nivoa pouzdanosti kotrljajnih ležišta:

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

$$= \sum_{n=0}^{n=GGR} \frac{(2)^n}{n!} e^{-2} = e^{-2} + \frac{2}{1!} e^{-2} +$$

$$+ \frac{2^2}{2!} e^{-2} + \frac{2^3}{3!} e^{-2} + \dots \quad (4)$$

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

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

$$GGR \approx 4,5.$$

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

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

koja predstavlja tzv. »signal modela«.

Kontrola nivoa pouzdanosti kotrljajnih ležišta ostvaruje se upoređivanjem dobijenih vrednosti n_s i GGR u nejednačini (5). U ovom primeru je $n_s < GGR$, što znači da kontrolisani nivo pouzdanosti zadovoljava, pa je »signal modela« da se nastavlja korišćenje sistema i primena modela $POPS_{knp}$, do sledeće kontrole nivoa pouzdanosti.

Simulacija modela $POPS_{knp}$ primenom elektronskog računara

Na osnovu razvijenog algoritma modela $POPS_{knp}$, u okviru programskog paketa »DMPOPS« [6] razvijen je, u Quick Basicu, segment za simulaciju

modela $POPS_{knp}$ primenom elektronskog računara.

Koristeći podatke o ulaznim parametrima modela $POPS_{knp}$, segment programskog paketa »DMPOPS« omogućava određivanje gornje granice regulacije nivoa pouzdanosti u funkciji od željenih veličina: broja istotipskih elemenata u sistemu, zadate pouzdanosti, stvarnog broja otkaza elemenata u sistemu za dati period korišćenja, srednjeg vremena rada, broja posmatranih sistema i vrednosti dijagnostičkog parametra, odnosno parametra toka kretanja otkaza (slika 3).

U primeru je izabrano određivanje gornje granice regulacije nivoa pouzdanosti u funkciji srednjeg vremena rada za razne vrednosti pouzdanosti (R) (slika 3) [6].

Sa intervalom posmatranja:

- 1 Broj istotipskih elemenata u sistemu
- 2 Pouzdanosti
- 3 Broj otkaza elemenata za dati period
- 4 Srednjeg vremena rada
- 5 Broj posmatranih sistema
- 6 Vrednost dijagnostičkog parametra

Enter

Sl. 3 — Simulacija modela $POPS_{knp}$ primenom elektronskog računara

Nakon toga, segment programskog paketa »DMPOPS« automatski zahteva od korisnika da definiše sve ulazne parametre modela prikazane na slici 4 [6].

Kao rezultat automatizovanog proračuna modela $POPS_{knp}$ dobijaju se tabelarne vrednosti GGR nivoa pouzdanosti elemenata za razne uticajne parametre prikazane na slici 3. Konkretno za ovaj primer izabrano je određivanje GGR nivoa pouzdanosti u funkciji srednjeg vremena rada, za razne vrednosti pouzdanosti (R). Radi ilus-

tracije, u tabeli 1 prikazane su neke vrednosti dobijene simulacijom modela.

Maksimalna vrednost srednjeg vremena rada (h): 1600

Interval pouzdanosti:

od: 0,925 do: 0,975 korak: 0,025

Konstantne vrednosti

Broj istotipskih elemenata: 2

Broj otkaza elemenata u sistemu: 3

Broj sistema: 30

Vrednosti dijagnostičkog parametra: 0,000042

Podaci u redu (D/N)

Sl. 4 — Zadavanje ulaznih parametara za simulaciju modela $POPS_{knp}$ primenom elektronskog računara

Tabela 1

Vrednosti GGR nivoa pouzdanosti kotrljajnih ležišta sklopa motornog vozila

Redni broj	Srednje vreme rada	Gornja granica regulacije
73	300	3
74	350	3
75	400	3
76	450	4
77	500	4
78	550	4
79	600	4
80	650	5
81	700	5
82	750	5
83	800	5
84	850	5

$$R = 0,975$$

Rezultati simulacije modela $POPS_{knp}$ prikazani su na slici 5 [6], gde je za zadatu vrednost pouzdanosti $R = 0,975$ i stvarni broj otkaza istotipskih elemenata motornog vozila $n_s = 3$ dobijena izlazna operaciona karakteris-

tika ovog modela, tj. $GGR=5$, što se u potpunosti poklapa sa navedenim hipotetičkim primerom, koji je rešen bez primene računara.

Sl. 5 — Rezultati simulacije modela $POPS_{knp}$ — izlazna operaciona karakteristika

Ista automatizovana procedura važi i za ostale podatke sa slike 4, odnosno za različite elemente motornog vozila na koje je moguće primeniti model.

Zaključak

Kao izlaz simulacije modela preventivnog održavanja prema stanju sa kontrolom nivoa pouzdanosti dobija se gornja granica regulacije nivoa pouzdanosti elemenata tehničkog sistema, koja predstavlja relevantnu informaciju u procesu donošenja odluke korisnika za pravovremeno i efikasno preduzimanje aktivnosti održavanja.

Primena automatizovanog modela $POPS_{knp}$ pogodna je u sistemima održavanja koji su podržani kvalitetnim informacionim sistemom, odnosno, koji raspolažu podacima o radu i održavanju tehničkog sistema i omogućavaju određivanje karakteristika pouzdanosti.

Efekti primene modela $POPS_{knp}$ ogledaju se u obezbeđenju zahtevane pouzdanosti sistema i sniženju troškova održavanja.

Definisana metodologija primene modela $POPS_{knp}$ ima opšti karakter, tj. model može biti apliciran na različite sastavne elemente u procesu održavanja tehničkih sistema.

Literatura:

- [1] Todorović, J.: Inženjerstvo održavanja tehničkih sistema — Maintainability Engineering, JUMV, Beograd, 1993.
- [2] Arsenić, Ž., Vasić, B.: Efektivnost tehničkih sistema — Rešavanje karakterističnih problema primenom računara, Mašinski fakultet, Beograd, 1991.
- [3] Smirnov, N. N., Ickovič, A. A.: Obsluživanje i remont aviacionnoj tehniki po sostojaniju, Transport, Moskva, 1980.
- [4] Gertsbakh, I. B.: Models of preventive maintenance, North-Holland publishing Company Amsterdam — New York — Oxford, 1977.
- [5] Todorović, J., Zelenović, D.: Efektivnost sistema u mašinstvu, Naučna knjiga, Beograd, 1981.
- [6] Minić, S.: Dinamički model preventivnog održavanja prema stanju motornih vozila, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1993.
- [7] Minić, S., Todorović, J.: Sistemski prilaz izboru koncepcije i modela preventivnog održavanja prema stanju motornih vozila, Vojnotehnički glasnik br. 3, 1993.
- [8] Minić, S.: Dinamički model preventivnog održavanja motornih vozila prema stanju, XIV Naučno-stručni skup Nauka i motorna vozila, Mašinski fakultet, Beograd, 1993.