MODEL PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA TEHNIČKIH SISTEMA »PO VREMENU« NA BAZI KRITERIJUMA MINIMALNIH TROŠKOVA

Dr Svetomir Minić,
potpukovnik, dipl. inž.

U radu je definisana metodologija za primenu modela preventivnog održavanja tehničkih sistema »po vremenu« na bazi kriterijuma minimalnih troškova. Kao izlazna operaciona karakteristika simuliranog modela dobija se optimalni interval preventivnog održavanja koji predstavlja relevantnu informaciju u procesu donošenja odluke korisnika za pravovremeno sprovođenje postupaka preventivnog održavanja, uz minimalne ukupne troškove održavanja. Prikazani su rezultati simulacije modela na primeru preventivnog održavanja sastavnih elemenata motornog vozila.

Uvod

Za optimizaciju sistema održavanja, u teoriji i inženjerstvu održavanja tehničkih sistema, koriste se modeli ili uprošćene šeme procesa održavanja koje se opisuju različitim oblicima matematičkih modela, a nazivaju se *modeli održavanja* [10]. Optimizaciju fizičke suštine procesa održavanja, kao stohastičkog procesa, u načelu je teško matematički iskazati, pa se postupak optimizacije svodi na optimizaciju definisanog matematičkog modela kojim se aproksimativno prikazuju osobine modeliranog procesa održavanja i, na taj način, zamenjuje realni eksperiment.

Modeli preventivnog održavanja zasnivaju se na pokazateljima pouzdanosti tehničkog sistema i kriterijumima optimizacije, na osnovu kojih se bira »optimalno« rešenje za odlučivanje o trenutku u kojem treba sprovesti postupke preventivnog održavanja, kako bi se sprečila ili odložila pojava stanja sistema »u otkazu«. Izbor »optimuma« u ovom smislu definiše se, prvenstveno, sa stanovišta minimalnih troškova održavanja ili maksimalne gotovosti tehničkog sistema, kao mate-

matički ekstrem odgovarajuće kriterijumske funkcije, ili kao kompromisno rešenje (»Trade of«) za postavljene kriterijume i ograničenja, [10].

Razrađena je metodologija za primenu modela preventivnog održavanja »po vremenu« na bazi kriterijuma minimalnih troškova — model MINTRO [7]. Model ima zadatak da odredi optimalni interval za sprovođenje postupaka preventivnog održavanja koji daje minimum ukupnih troškova održavanja, uz ostvarenje zahtevane pouzdanosti održavanog tehničkog sistema. Ako funkcija intenziteta otkaza posmatranog sastavnog elementa sistema ima rastući karakter u vremenskoj bazi, i ako su troškovi korektivnog održavanja veći od troškova preventivnog održavanja, ispunjeni su uslovi za primenu ovog modela održavanja.

Za simulaciju modela MINTRO razvijen je programski paket DMPOPS [7]. Kao izlazna operaciona karakteristika simuliranog modela dobija se, u grafičkom i analitičkom obliku, optimalni interval preventivnog održavanja elemenata tehničkog sistema, koji je egzaktno definisan minimalnom vrednošću funkcije ukupnih troškova održavanja [6].

Karakteristike modela preventivnog održavanja »po vremenu«

U modelima preventivnog održavanja »po vremenu«, određuju se fiksni rokovi za sprovođenje postupaka preventivnog održavanja na osnovu poznatih zakona pouzdanosti posmatranog sistema, a izražavaju se u dimenzijama slučajno promenljive, preko koje se definiše i funkcija pouzdanosti (npr. u časovima rada, broju pređenih kilometara, itd.) [10]. Ovi rokovi ponekad se nazivaju i resursi (vremenski ili eksploatacioni), što znači da

Sl. 1 — Model preventivnog održavanja »po vremenu« (Hard Time Limit)

$R(t)$ — Pouzdanost, R_z — zahtevani nivo pouzdanosti, t — vreme rada sistema, t_p — interval preventivnog održavanja »po vremenu«, $x(t)$ — parametar stanja, x_n — nominalna vrednost, x_g — granična vrednost parametra stanja.

se radi o preventivnom održavanju prema »utvrđenim resursima« (»Hard Time Limit«).

Dijagram prikazan na slici 1 odgovara modelima preventivnog održavanja »po vremenu«, odnosno modelima preventivnih zamena elemenata* ili drugih postupaka preventivnog održavanja tehničkog sistema [9, 10]. Postupci preventivnog održavanja sprovode se posle određenog perioda rada t_p , kojem odgovara zahtevani nivo pouzdanosti sistema R_z . Važno je uočiti da će neki elementi otkazati i pre ovog vremena (kriva k). To znači da se, pri opredeljenju za preventivne zamene po modelima ovog tipa, moraju obezbediti svi potrebni uslovi i za korektivno održavanje.

Vrste preventivnih zamena elemenata

U zavisnosti od zahtevanog nivoa pouzdanosti i troškova održavanja tehničkog sistema primenjuju se određene strategije (vrste) zamene sastavnih elemenata sistema [13]. Na izbor strategije zamene utiču, pored željenog nivoa pouzdanosti, i konstruktivne karakteristike sistema, uslovi korišćenja, zakon raspodele funkcije gustine stanja u otkazu, ukupan broj otkaza u određenom vremenu, i dr.

Karakteristične vrste preventivnih zamena elemenata su [11, 13]: zamena posle određenog vremena rada i blok-zamena.

Ako se neki sastavni element sistema preventivno zameni kada »akumulira« t_p časova rada tako da se, posle pojave otkaza koji rezultira u neplaniranoj zameni, sledeća zamena obavlja posle t_p časova rada (sl. 2), radi

* Pod elementom se podrazumeva: podsistem, agregat, uređaj, sklop, podsklop i sastavni deo tehničkog sistema.

se o tzv. zameni posle određenog vremena rada [11].

Sl. 2 — Šema zamene elementa posle određenog vremena rada

Ako se preventivna zamena sastavnog elementa sistema vrši tačno posle t_p časova rada, bez obzira na to da li je obavljena neplanirana zamena zbog otkaza tog elementa između dve planirane zamene (sl. 3) radi se o tzv. blok-zameni [11].

Sl. 3 — Šema blok-zamene elementa

Opis modela MINTRO

Model MINTRO zasniva optimizaciju procesa održavanja na kriterijumu minimalnih troškova održavanja. Osnovu modela čini neposredno upoređenje troškova preventivnog i korektivnog održavanja. U slučaju kada su troškovi korektivnog održavanja (C_k) veći od troškova preventivnog održavanja (C_p), tj. $C_k > C_p$, i kada se radi o sastavnim elementima sistema čiji je intenzitet otkaza (λ) u vremenskoj bazi rastuća funkcija, postoji jedan optimalni interval preventivnog održavanja po vremenu (t_{po}), koji daje minimum ukupnih troškova održavanja, uz ostvarenje zahtevane pouzdanosti sistema. Model preventivnog održavanja »po vremenu«, koji uzima u obzir ove

pretpostavke, zasniva se na formuli za tzv. ukupne jednačine troškova održavanja (C_T), [8, 11, 12]:

$$C_T = C_k \cdot \lambda_{ktp} + C_p \cdot \lambda_{ptp} \quad (1)$$

gde je:

λ_{ktp} — intenzitet otkaza u slučaju korektivnog održavanja,

λ_{ptp} — intenzitet preventivnog održavanja.

Optimalno rešenje za vrednost intervala preventivnog održavanja »po vremenu« (t_{po}) (koji minimizira troškove po jedinici vremena [5]) dobija se preko prvog izvoda po t_p , odnosno ako je C_T minimalno:

$$\frac{dC_T}{dt_p} = 0 \quad (2)$$

Troškovi preventivnog održavanja (C_p) dobijaju se iz izraza:

$$C_p = C_{prd} + C_{prs} \quad (3)$$

gde je:

C_{prd} — troškovi rezervnih delova,

C_{prs} — troškovi radne snage u slučaju preventivnog održavanja.

Troškovi korektivnog održavanja (C_k) određuju se iz izraza:

$$C_k = C_{krd} + C_{krs} + C_{kPOS} \quad (4)$$

gde je:

C_{krd} — troškovi rezervnih delova,

C_{krs} — troškovi radne snage,

C_{kPOS} — troškovi POSLEDICA u slučaju korektivnog održavanja.

U modelu MINTRO zamena posle određenog vremena rada (sl. 2) nekog sastavnog elementa sistema obavlja se posle t_p časova rada, a u slučaju otkaza tog sastavnog elementa u intervalu 0 do t_p , vrši se korektivno održavanje

(korektivna zamena), pa će se sledeća preventivna zamena obaviti posle t_p časova rada od trenutka otkaza. Pri ovakvom prilazu preventivnom održavanju, izraz za intenzitet otkaza, u slučaju korektivnog održavanja (λ_{ktp}), ima oblik [8, 11, 12]:

$$\lambda_{ktp} = \frac{1 - R(t_p)}{\int_0^{t_p} R(\tau) d\tau} \quad (5)$$

dok je izraz za intenzitet preventivnog održavanja (λ_{ptp}):

$$\lambda_{ptp} = \frac{R(t_p)}{\int_0^{t_p} R(\tau) d\tau} \quad (6)$$

Ako se u modelu MINTRO primenjuje blok-zamena (sl. 3) nekog sastavnog elementa sistema, preventivna zamena obavlja se posle fiksnog intervala (t_p), bez obzira na to da li je obavljeno korektivno održavanje (korektivna zamena) zbog otkaza tog sastavnog elementa na intervalu između dve planirane preventivne zamene. Pri blok-zameni elementa izraz za intenzitet otkaza, u slučaju korektivnog održavanja λ_{ktp} ima oblik [8, 11, 12]:

$$\lambda_{ktp} = \frac{t_p - \int_0^{t_p} R(\tau) d\tau}{\int_0^{t_p} R(\tau) d\tau} \quad (7)$$

dok je intenzitet preventivnog održavanja (λ_{ptp}):

$$\lambda_{ptp} = \frac{1}{t_p} \quad (8)$$

Zamenom izraza (5) i (6) odnosno (7) i (8) u jednačini (1) dobija se odgovarajuća formula za ukupne jedinične troškove održavanja (C_T). Uspešnost rešavanja jednačine (1), odnosno (2), zavisi od matematičke složenosti funkcije raspodele vremena do otkaza.

U većini slučajeva optimalni interval preventivnog održavanja po vremenu (t_{poi}) ne može se naći analitičkim putem, pa se koriste grafičke i numeričke metode.

Kod modela blok-zamene elementa, posle određivanja optimalnih vrednosti (t_{poi}) za pojedine sastavne elemente sistema, potrebno je modifikovati vrednosti t_{poi} tako da budu celi umnošci [5, 11]. To je potrebno uraditi iz praktičnih razloga, da bi se zastoja sistema zbog izvršenja jedne preventivne zamene iskoristio i za sprovođenje nekih drugih postupaka preventivnog održavanja. U toj situaciji smanjuje se broj zastoja sistema zbog izvođenja postupaka preventivnog održavanja. Posle usvajanja optimalnih vrednosti intervala preventivnog održavanja po vremenu (t_{poi}), treba proveriti da li je ostvarena zahtevana vrednost pouzdanosti (R_z) za dati sistem na kome se vrši preventivno održavanje pojedinih sastavnih elemenata. Ukoliko R_z nije ostvarena, neophodno je izvršiti ponovnu modifikaciju optimalnih vrednosti vremenskih intervala (t_{poi}).

Razvoj algoritma za primenu modela MINTRO

Model MINTRO primenjuje se kroz sledeće korake (prikazane algoritamski na slici 4):

1. Prikupiti podatke o vremenima rada do otkaza sastavnih elemenata sistema, za koje se primenjuje model MINTRO.

2. Utvrditi kojem zakonu raspodele pripadaju vremena rada do otkaza sastavnih elemenata sistema.

3. Proveriti da li iz usvojenog zakona raspodele proizilazi rastući intenzitet otkaza u funkciji vremena rada.

4. Usvojiti vrstu zamene koja će se primenjivati za date sastavne elemente. Ako se usvoji zamena *posle određenog vremena rada*, može se dogo-

ditu da u slučaju većeg broja otkaza sastavnih elemenata bude veliki broj zastoja u radu sistema, zbog preklapanja intervala preventivnog održavanja za takve sastavne elemente. *Blok-zamena* obezbeđuje manji broj zastoja u radu sistema i omogućava izbegavanje poklapanja intervala preventivnog održavanja.

5. Za svaki sastavni element napisati izraz za intenzitet otkaza u slučaju korektivnog održavanja (λ_{ktp}):

— korišćenjem jednačine (5) u slučaju zamene posle određenog vremena rada,

— korišćenjem jednačine (7) u slučaju blok-zamene.

6. Za svaki sastavni element napisati izraz za intenzitet preventivnog održavanja (λ_{ptp}):

— korišćenjem jednačine (6) u slučaju zamene posle određenog vremena rada,

— korišćenjem jednačine (8) u slučaju blok-zamene.

7. Korišćenjem jednačine (3) izračunati troškove preventivnog održavanja (C_p) za svaki sastavni element.

8. Korišćenjem jednačine (4) izračunati troškove korektivnog održavanja (C_k) za svaki sastavni element.

9. Proveriti da li su troškovi korektivnog održavanja (C_k) znatno veći od troškova preventivnog održavanja (C_p) tj. $C_k \gg C_p$.

10. zameniti dobijene izraze za λ_{ktp} , λ_{ptp} , C_p i C_k u jednačini (1), čime se dobija formula za ukupne jedinične troškove održavanja (C_T) za svaki sastavni element u funkciji od intervala preventivne zamene (t_p).

11. Izračunati optimalnu vrednost intervala preventivnog održavanja po vremenu (t_{po}) za svaki sastavni element, koja odgovara minimalnim ukupnim jediničnim troškovima održavanja (C_T) za taj sastavni element. To se postiže analitičkim rešavanjem jednačine (2) po t_p . Ako rešenje nije moguće kori-

Sl. 4 — Algoritam modela MINTRO

ste se numeričke metode, uz primenu elektronskog računara, kombinovano sa grafičkim predstavljanjem funkcije $C_T(t_p)$.

12. Ako je odabrana *blok-zamena*, posle dobijanja optimalnih vrednosti intervala preventivne zamene t_{poi} za sastavne elemente, treba ih modifikovati tako da budu celi umnošci jedni drugih, odnosno treba odrediti interval zamene za grupu elemenata.

13. Posle usvajanja optimalnih vrednosti t_{poi} , treba proveriti da li je ostvarena zahtevana vrednost pouzdanosti za celinu sistema kod kojeg se vrši preventivna zamena sastavnih elemenata (ukoliko takav zahtev postoji).

Simulacija modela MINTRO primenom računara

Na osnovu razvijenog algoritma za primenu modela MINTRO izrađen je, u okviru programskog paketa DMPOPS (7), potprogram za simulaciju modela MINTRO i to posebno za zamenu posle određenog vremena rada (MINTRO-1) i za blok-zamenu (MINTRO-2).

Za simulaciju modela MINTRO — zamenu posle određenog vremena rada (MINTRO-1), neophodno je uneti u računar odgovarajuće podatke, koji su definisani na slikama 5, 6 i 7 [7].

Broj posmatranih sistema (-) = 30

Ukupno vreme rada sistema (h) = 2000

Parametri funkcije nepouzdanosti :

- Parametar oblika $\beta = 4$
- Parametar razmere $\eta = 2000$

Sl. 5 — Zadavanje ulaznih parametara za simulaciju modela MINTRO-1 primenom elektronskog računara

Od tačnosti ulaznih podataka zavisi praktična vrednost dobijenih rezultata simulacije modela, pa je neophodno raspolagati datotekom podataka

o radu i održavanju tehničkog sistema. Programski paket DMPOPS omogućava unošenje podataka o troškovima preventivnog održavanja u određenom intervalu (sl. 7), čime se obezbeđuje sa-

Troškovi korektivnog održavanja (din) :

- Troškovi rezervnih delova = 1000
- Troškovi rada = 500
- Troškovi zbog čekanja = 5000

Troškovi preventivnog održavanja (din) :

- Troškovi rezervnih delova = 1000
- Troškovi rada = 100

Sl. 6 — Zadavanje ulaznih parametara za simulaciju modela MINTRO-1

Zadati troškovi preventivnog održavanja (C_p) (din) = 1100

Troškovi $\times 10^3$ (din)

SA INTERVALOM POSMATRANJA

OD 1100 DO 3300 KORAK 1100

Sl. 7 — Zadavanje ulaznih parametara za simulaciju modela MINTRO-1

gledavanje uticaja ovih troškova na ukupne troškove održavanja, i na potrebno optimalno vreme za preventivno održavanje posmatranog sastavnog elementa sistema.

Model MINTRO simuliran je na praktičnom primeru preventivnog održavanja motornih vozila, gde je, kao slučajno promenljiva veličina, posmatrano vreme rada jednog elementa vozila. Na osnovu unetih podataka za broj posmatranih sistema, ukupno vreme rada sistema, parametre Vejbulove raspodele β i η (dobijaju se prethodnim korišćenjem programskog paketa DMPOPS) i troškove preventivnog i korektivnog održavanja, simulacijom se najpre dobijaju tabelarne vrednosti zavisnosti ukupnih troškova od vremena rada, za različite vrednosti troškova

preventivnog održavanja. Radi ilustracije, u tabeli 1 prikazani su rezultati simulacije za slučaj da troškovi preventivnog održavanja iznose 1100 novčanih jedinica.

Tabela 1

Redni broj	Vreme (h)	Troškovi (din/h)
1	100	11
10	190	5,79
20	290	3,8
30	390	2,84
40	490	2,28
50	590	1,93
60	690	1,71
70	790	1,56
80	890	1,48
90	990	1,45
100	1090	1,46
110	1190	1,52

$C_p = 1100$

Glavna interpretacija simulacije modela MINTRO-1 prikazana je na slici 8 [7]. Egzaktno je definisan optimalni interval sprovođenja postupaka preventivnog održavanja u funkciji od minimalnih ukupnih troškova održavanja. Sa dobijenih dijagrama za različite nivoe troškova preventivnog održavanja, uočljivo je da se ukupni troškovi održavanja, u zavisnosti od vremena rada sistema, do određenog vremena smanjuju, a zatim počinju da rastu, premda to nije izrazito za konkretni primer. Takođe, ukoliko se troškovi preventivnog održavanja povećavaju, povećaćće se i interval preventivnog održavanja koji odgovara minimalnim ukupnim troškovima održavanja. Ako su troškovi preventivnog održavanja 1100 novčanih jedinica, optimalni interval za ovu zamenu elementa je 1020 časova rada motornog vozila.

Analogno prethodnom modelu, radi simulacije modela MINTRO — blok-zamena (MINTRO-2) neophodno je uneti podatke o vrednostima ulaznih parametara modela, prikazane na slikama 5, 6 i 7.

Sl. 8 — Rezultati simulacije modela MINTRO-1 — izlazna operaciona karakteristika modela

t_{po} — optimalni interval zamene elementa posle određenog vremena rada na bazi kriterijuma minimalnih troškova

Kao i za prethodni model, kod modela MINTRO-2, dobijene rezultate simulacije moguće je interpretirati tabelarno i grafički.

U ovom primeru simulacije modela MINTRO-2 (slika 9) optimalni interval preventivnog održavanja posmatranog elementa sistema definisan je minimalnom vrednošću funkcije ukupnih troškova održavanja i iznosi 2010 časova rada motornog vozila za nivo troškova preventivnog održavanja 2200 novčanih jedinica [7].

Sl. 9 — Rezultati simulacije modela MINTRO-2 — izlazna operaciona karakteristika modela

t_{pc} — optimalni interval blok-zamene elementa na bazi kriterijuma minimalnih troškova

Zaključak

Kao izlaz simulacije modela preventivnog održavanja »po vremenu« na bazi kriterijuma minimalnih troškova, dobija se vrednost operacione karakteristike modela — optimalni interval preventivnog održavanja sastavnih elemenata tehničkog sistema, koji obezbeđuje minimalne ukupne troškove održavanja.

Simulacija modela MINTRO, primenom programskog paketa DMPOPS, omogućava analizu uticaja različitih odnosa troškova preventivnog i korektivnog održavanja na vrednost izlazne operacione karakteristike modela. Posmatrane varijante troškova preventivnog održavanja, uz nepromenjene troškove korektivnog održavanja, simulacijom daju odnose koji minimum ukupnih troškova pomeraju u zone du-

žih perioda rada sistema. Dakle, ukoliko se troškovi preventivnog održavanja povećavaju, povećaće se i interval preventivnog održavanja elemenata sistema, koji odgovara minimumu ukupnih troškova održavanja.

Očigledan je značaj primene modela MINTRO prema definisanoj metodologiji u ovom radu, što se prvenstveno ogleda u mogućnosti korisnika tehničkog sistema da koriguje do tada korišćene neoptimalne intervale preventivnog održavanja i, na taj način, smanji troškove održavanja.

Definisana metodologija primene modela MINTRO ima opšti karakter tj. model može biti apliciran na različite sastavne elemente u procesu održavanja bilo kojih tehničkih sistema, pod uslovom da su podržani kvalitetnim informacionim sistemom o radu i održavanju.

Literatura:

- [1] Arsenić, Z., Vasić, B.: EFEKTIVNOST TEHNIČKIH SISTEMA — REŠAVANJE KARAKTERISTIČNIH PROBLEMA PRIMENOM RACUNARA, Mašinski fakultet, Beograd, 1991.
- [2] Arsenić, Z., i dr.: INFORMACIONI SISTEMI U ODRŽAVANJU VOZILA — MONOGRAFIJA, JUMV, Beograd, 1994.
- [3] Barzilović, E. J.: MODEL TEHNIČESKOG OBLUŽIVANJA SLOŽENIH SISTEM, Visša-ja škola, Moskva, 1982.
- [4] Gertsbakh, I. B.: MODELS OF PREVENTIVE MAINTENANCE, North — Holland publishing company, Amsterdam — New York — Oxford, 1977.
- [5] Jorgenson, D. W., McCall, J. J., Radner, R.: OPTIMAL REPLACEMENT POLICY, North — Holland publishing company, Amsterdam — Oxford, 1974.
- [6] Kodžopeljić, J.: PRILOG PROUČAVANJU POLITIKE PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA MOTORNIM VOZILA ZA POTREBE OPŠTENARODNE ODBRANE, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1981.
- [7] Minić, S.: DINAMIČKI MODEL PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA PREMA STANJU MOTORNIM VOZILA, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1993.
- [8] MODEL PREVENTIVNO-KOREKTIVNOG ODRŽAVANJA NA BAZI REPREZENTATIVNIH TMS — Elaborat po Projektu, Mašinski fakultet, Beograd, 1984.
- [9] Smirnov, N. N., Ickovič, A. A.: OBLUŽIVANIE I REMONT AVIACIONNOJ TEHNIKI PO SOSTOJANIJU, Transport, Moskva, 1980.
- [10] Todorović, J.: INŽENJERSTVO ODRŽAVANJA TEHNIČKIH SISTEMA — MAINTAINABILITY ENGINEERING, JUMV, Beograd, 1993.
- [11] Vujanović, N.: TEORIJA POUZDANOSTI TEHNIČKIH SISTEMA, Vojnoizdavački i novinski centar, Beograd, 1987.
- [12] Vujanović, N.: ISTRAŽIVANJE METODA OCENE I ALOKACIJE POUZDANOSTI I POGODNOSTI ODRŽAVANJA NA PRIMERU SISTEMA NAORUŽANJA, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1983.
- [13] Vukadinović, S., Teodorović, D.: ELEMENTI TEORIJE POUZDANOSTI I TEORIJE OBNAV-LJANJA TEHNIČKIH SISTEMA, Privredni pregled, Beograd, 1979.