Dr Svetomir Minić,
potpukovnik, dipl. inž.
Odeljenje za naučno-istra-
živačku delatnost GŠ VJ,
Beograd
Dr Jovan Todorović,
profesor, dipl. inž.
Mašinski fakultet, Beograd

»DELAY-TIME« MODEL PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA TEHNIČKIH SISTEMA

UDC: 621.01-7:681.518.5

Rezime:

U radu se okvirno analizira relativno novi model preventivnog održavanja prema stanju, koji je u proteklim godinama privukao pažnju mnogih istraživača i inženjera koji se bave održavanjem tehničkih sistema. Delay-time model zasniva se na ideji »odlaganja« postupka održavanja, u zavisnosti od konstatovanog stanja tehničkog sistema, odnosno od tako procenjenog »vremena odlaganja otkaza« (delay-time). Kao rezultat simulacije definisanih modela na numeričkim primerima dobijeni su dijagrami međuzavisnosti relevantnih parametara, koji omogućavaju izbor najpovoljnijeg modela održavanja i optimalnog intervala »pregleda stanja« tehničkog sistema.

Ključne reči: »delay-time«, model održavanja, pregled stanja, optimalni interval, simulacija.

DELAY-TIME MODEL FOR PREVENTIVE MAINTENANCE

Summary:

The paper presents a brief comment on the »delay-time« model for preventive on condition maintenance of various technical systems, which has attracted significant attention of engineers dealing with maintenance. The »delay-time« model is based on the condition of a technical system stated during a scheduled checking i.e., on so estimated delay-time to failure. The diagrams of relevant parameters relation obtained by means of a simulation technique provide possibilities for the choice of the most favourable maintenance procedure and optimal intervals for »condition checking«.

Key words: Delay-time, maintenance model condition-checking, optimal interval, simulation.

Uvod

DELAY-TIME koncept preventivnog održavanja tehničkih sistema poslednjih je godina predmet analize mnogih stranih radova [1 do 5]. Suština modela [1] jeste ideja »odlaganja« postupaka održavanja u zavisnosti od izvršenog pregleda i konstatovanog stanja tehničkog sistema, odnosno od tako procenjenog karakteris-

tičnog parametra ovog modela — »vremena odlaganja otkaza« (delay time).

Kao i kod modela POPS — preventivnog održavanja prema stanju, »pregledi stanja« mogu biti ručni ili automatski, a u vremenskom smislu mogu se sprovoditi »diskretno« (»on-condition«) u određenim trenucima ili kao »kontinualno praćenje stanja« (»condition monitoring«) elemenata

sistema. Bitno je napomenuti da sam postupak pregleda stanja ne sprečava pojavu otkaza već ukazuje na njega, pre pojave »funktionalnog otkaza« sistema koji predstavlja stanje sistema u kome on ne može da izvršava svoju funkciju, tj. ne radi [6].

Matematički model ima zadatak da odredi optimalni vremenski interval »pregleda stanja« sistema sa stanovišta smanjenja broja otkaza i troškova održavanja. Promenljiva T , koja označava interval »pregleda stanja«, uspostavlja međuzavisnost sa drugim promenljivim koje su posledica vremenskog intervala T , a to su očekivano vreme zastoja sistema i očekivani troškovi radne snage po jedinici vremena.

DELAY-TIME koncepcija preventivnog održavanja

Radi rešavanja problema preventivnog održavanja tehničkog sistema, DELAY-TIME koncepcija preventivnog održavanja uvodi novu veličinu — vreme odlaganja otkaza, (delay-time), koje predstavlja vreme koje protekne od trenutka kada je otkaz prvi put mogao biti otkriven do trenutka kada otklanjanje otkaza više nije moguće odlagati zbog neprihvatljivih posledica. Suština ove koncepcije preventivnog održavanja jeste da se preduzimanje postupaka održavanja, tj. otklanjanje otkaza može sprovesti u bilo kom trenutku vremenskog perioda h .

Za rešavanje zadatog problema pokazalo se mogućim dobijanje funkcije gustine verovatnoće vremena odlaganja otkaza $f(h)$, koja omogućava konstrukciju modela očekivane veze između intervala pregleda stanja (T) i posledičnih promenljivih — očekivano vreme zastoja i očekivani troškovi radne snage po jedinici vremena.

Otkaz sistema može se javiti kao »funktionalni«, tj. kada sistem više ne može da izvršava svoju misiju, ali se može otkriti kao tehnička neispravnost,

prilikom redovnog »pregleda stanja«. U oba slučaja mogu se postaviti sledeća pitanja:

1. Koliko ranije je otkaz mogao biti prvi put otkriven, bilo pregledom stanja, bilo od strane rukovaoca sistema?

(How Long Ago=**HLA**)

2. Ako postupci održavanja, tj. popravka nije sprovedena, koliko dugo može biti odlagana?

(How Much Longer=**HML**)

Na osnovu navedenog, vreme odlaganja otkaza (h) iznosi:

$$h = \mathbf{HML} + \mathbf{HLA}.$$

Na ovaj način može se, posmatrajući dovoljan broj otkaza, dobiti prethodna raspodela za $f(h)$. Pri tome se pretpostavlja da su otkazi međusobno nezavisni, a ukoliko se ustanovi da postoji međusobna zavisnost između otkaza koji karakterišu rad posmatranog sistema, neophodno je modifikovati osnovni model prema prirodi ove međuzavisnosti. U praktičnim primerima ovog rada prihvaćena je pretpostavka nezavisnosti otkaza.

Osnovni DELAY-TIME model

Najjednostavniji slučaj sprovođenja preventivnog održavanja tehničkog sistema putem »pregleda stanja« može se opisati sledećim *pretpostavkama* [1]:

a) *Pregled stanja se preduzima svakih T -jedinica vremena, košta I -novčanih jedinica i zahteva d -jedinica vremena za njegovo sprovođenje, gde je $d \ll T$.*

b) *Pregledi stanja su idealni i svaki prisutni otkaz sistema biće otkriven.*

c) *Otkazi uočeni pri pregledu stanja biće otklonjeni u vremenskom periodu predviđenom za pregled stanja.*

d) *Početni trenutak, za koji se može usvojiti da je trenutak prve pojave*

otkaza elementa sistema, ravnomerno je raspoređen tokom vremena od poslednjeg »pregleda stanja« i nezavisan je od h . Otkazi se javljaju po stopi k u jedinici vremena.

e) Poznata je funkcija gustine verovatnoće vremena odlaganja otkaza $f(h)$.

Pretpostavka c) zahteva da sve popravke koje slede posle »pregleda stanja« mogu da se završe u fiksnom periodu d , nezavisno od broja popravki. To je realna pretpostavka ukoliko se raspolaže sa dovoljno radne snage da se popravke izvode simultano.

Pretpostavka d) omogućava procenu očekivanog broja pojava otkaza u periodu T , tj. kT . Ova pretpostavka zanemaruje zastoje sistema zbog »funktionalnih otkaza«, tokom kojih se ne pojavljuje nijedan drugi otkaz, jer sistem ne izvršava zadatak, tj. ne radi. Međutim, ako je ovo vreme zastoja malo u poređenju sa vremenom T , tada će i greška biti mala.

Pretpostavlja se da otkaz koji se javlja u periodu $(0, T)$ ima vreme odlaganja otkaza u intervalu $(h, h+dh)$ i verovatnoću pojave ovog događaja $f(h)dh$. Ovaj otkaz će se pojaviti kao »funktionalni« u periodu $(0, T-h)$ (slika 1), a u ostalim slučajevima biće uočen prilikom redovnog pregleda stanja.

Verovatnoća pojave otkaza pre vremena $(T-h)$ je $(T-h)/T$. Dakle, verovatnoća da će se otkaz pojaviti kao »funktionalni« i da će imati vreme odlaganja otkaza u intervalu $(h, h+dh)$ je:

$(T-h)/T f(h)dh$.

Sl. 1 — DELAY-TIME proces održavanja

T -interval pregleda stanja, h -vreme odlaganja otkaza (delay-time)

Sumirajući za sve moguće vrednosti h , dobijamo da je verovatnoća da se otkaz pojavi kao »funktionalni otkaz« $b(T)$:

$$b(T) = \int_{h=0}^T \left(\frac{T-h}{T} \right) \cdot f(h) dh \quad (1)$$

Ukoliko je prosečno vreme zastoja sistema potrebno za otklanjanje »funktionalnog otkaza« d_b , tada je očekivano vreme zastoja po jedinici vremena rada pri primeni redovnih pregleda stanja svakih T jedinica vremena obeleženo sa $D(T)$:

$$D(T) = \frac{1}{(T+d)} [k \cdot T \cdot d_b \cdot b(T) + d] \quad (2)$$

gde je:

k — »stopa nastanka« (»arrival rate«) otkaza u jedinici vremena.

Ako su prosečni troškovi popravke funkcionalnog otkaza (C_b) i prosečni troškovi popravke otkaza otkrivenog prilikom pregleda stanja (C_i), tada će očekivani troškovi održavanja sistema po jedinici vremena za DELAY TIME model preventivnog održavanja putem »pregleda stanja« sa intervalom pregleda stanja (T) biti:

$$C(T) = \frac{1}{(T+d)} [k \cdot T \{ C_b \cdot b(T) + C_i [1 - b(T)] \} + I] \quad (3)$$

Jednačine (1), (2) i (3) predstavljaju osnovni DELAY TIME model održavanja koji se može modifikovati prema potrebama konkretnog slučaja.

DELAY-TIME modeli održavanja u slučajevima neispunjenih pretpostavki osnovnog modela

MODEL A: Nedovoljna radna snaga za održavanje sistema

Ukoliko nije ispunjena pretpostavka c), tj. radna snaga za održavanje

sistema nije dovoljna, javljaju se dopunski zastoji radi popravki koje ne mogu da se obavljaju simultano. Tada se mora modifikovati izraz za $D(T)$ -očekivano vreme zastoja po jedinici vremena rada pri redovnim pregledima stanja sa intervalom T . Ako je d_i očekivano vreme zastoja zbog ovih dodatnih zastoja, tada će ukupno vreme zastoja pri pregledu stanja biti:

$$d + k \cdot T \cdot d_i [1 - b(T)].$$

Uzimajući u obzir prethodni izraz, dobija se nova formula za očekivano vreme zastoja po jedinici vremena rada:

$$D(T) = \frac{1}{T + d + k \cdot T \cdot d_i [1 - b(T)]} \{k \cdot T \cdot d_b \cdot b(T) + d + k \cdot T \cdot d_i [1 - b(T)]\} =$$

$$= \frac{1}{T + d + k \cdot T \cdot d_i [1 - b(T)]} [k \cdot T \cdot \{d_b \cdot b(T) + d_i [1 - b(T)]\} + d] \quad (4)$$

gde je poželjno da bude $d_i < d_b$.

MODEL B: Pregled stanja sistema nije idealan

Pretpostavka b) da pregled stanja nije idealan, veoma je moguća i očekivana situacija u praksi realizacije procesa preventivnog održavanja sistema. Zbog toga se uvodi verovatnoća β da će pojedini otkaz biti otkriven prilikom pregleda stanja, odnosno odgovarajuća verovatnoća $1 - \beta$ da neće biti otkriven.

Radi definisanja novog izraza za $b(T)$ razmotriće se slučaj otkaza koji se prvi put pojavljuje posle vremena y od pregleda stanja u tački 0 (slika 2). Ovaj otkaz se može otkriti prilikom pregleda stanja u trenutku T , ako je $h > (T - y)$, ili u trenutku $2T$ ako je $h > (2T - y)$, ili $3T$ ako je $h > (3T - y)$, itd.

Prema tome, za otkaz koji se pojavljuje u trenutku y verovatnoća p će biti:

$$p \text{ (otkaz otkriven u trenutku } T) = p \text{ (da je otkriven)} \times p \text{ (nije se pojavio kao funkcionalni otkaz pre trenutka } T) = \beta R(T - y).$$

Sl. 2 — Moguća pojava otkaza sistema u intervalima »pregleda stanja«

gde je:

$$R(x) = \int_x^{\infty} f(h) dh.$$

Slično prethodnom izrazu za trenutak $2T$ biće:

$$p \text{ (otkaz otkriven u trenutku } 2T) = \beta \cdot (1 - \beta) \cdot R(2 \cdot T - y).$$

Opšti izraz za verovatnoću da će otkaz koji se javlja u trenutku y biti otkriven pri pregledu stanja u trenutku $n \cdot T$, glasi:

$$p \text{ (otkaz otkriven u trenutku } n \cdot T) = \beta \cdot (1 - \beta)^{n-1} \cdot R(n \cdot T - y), \quad n = 1, 2, \dots$$

Verovatnoća (p) da će otkaz u trenutku y biti otkriven pri pregledu stanja, data je formulom:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \beta \cdot (1 - \beta)^{n-1} \cdot R(n \cdot T - y).$$

Za bilo koje moguće y koje je ravnomerno raspoređeno po intervalu T dobija se izraz za verovatnoću pojave »funkcionalnog otkaza« $b(T)$:

$$b(T) = 1 - \left\{ \int_{y=0}^T \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta}{T} (1 - \beta)^{n-1} \cdot R(n \cdot T - y) dy \right\}, \quad d \ll T \quad (5)$$

MODEL C: Početni trenutak pojave otkaza sistema nije ravnomerno raspoređen tokom vremena od poslednjeg pregleda stanja

Ako nije ispunjena pretpostavka d) i ako je y vreme od poslednjeg »idealnog pregleda stanja«, a $g(y)$ trenutna stopa mogućnosti pojave otkaza u trenutku y , tada očekivani broj otkaza u malom intervalu $(y, y+dy)$ iznosi $g(y)dy$. Dakle, očekivani broj pojava otkaza unutar intervala $(0, T)$ jeste:

$$K(T) = \int_0^T g(y)dy.$$

Da bi otkaz koji se pojavljuje u intervalu $(y, y+dy)$ bio »funktionalni otkaz«, on mora imati vreme odlaganja otkaza $h < T-y$. Prema tome, očekivani broj »funktionalnih otkaza« u intervalu $(y, y+dy)$ je:

$$g(y)dy \int_0^{T-y} f(h)dh = F(T-y) \cdot g(y) dy$$

gde je:

$$F(x) = \int_0^x f(h)dh.$$

Sada je očekivani broj »funktionalnih otkaza« $B(T)$ koji se javlja u intervalu $(0, T)$: $B(T) = \int_0^T F(T-y) \cdot g(y)dy$.

Očekivani broj popravki otkaza otkrivenih pri pregledu stanja u intervalu $(0, T)$ je $K(T) - B(T)$, pa je tada vreme zastoja sistema po jedinici vremena dato izrazom:

$$D(T) = \frac{1}{(T+d)} [d_b \cdot B(T) + d] \quad (6)$$

Matematički model troškova održavanja sistema po jedinici vremena sada ima oblik:

$$C(T) = \frac{1}{(T+d)} \{C_b \cdot B(T) + C_i \cdot [K(T) - B(T)] + I\} \quad (7)$$

Simulacija DELAY-TIME modela održavanja

Korišćenjem jednačina (1) do (8) dati su hipotetički primeri primene navedenih modela, a izlazni rezultati simulacije modela dobijeni su dijagramski i prikazani na slikama 3 i 4.

U navedenim numeričkim primerima, funkcija vremena zastoja sistema po jedinici vremena ima oblik:

$$D(T) = \frac{1}{(T+d)} [(\text{očekivani broj}$$

funktionalnih otkaza u jednom ciklusu $x \cdot d_b) + d]$,

gde je:

$d_b = 0,5 h$ — prosečno vreme zastoja sistema za otklanjanje »funktionalnog otkaza«,

$d = 0,35 h$ — vreme »pregleda stanja« i popravke sistema.

Simulacija osnovnog DELAY-TIME modela

Funkcija gustine verovatnoće vremena odlaganja otkaza $f(h)$ odabrana je kao negativna eksponencijalna raspodela, oblika:

$$f(h) = \alpha \cdot e^{-\alpha h}$$

gde je:

$\alpha = 0,05$ — konstanta,

$h = 20 h$ — prosečno vreme odlaganja otkaza (»average delay-time«).

Za prosečni očekivani broj pojava otkaza po času (»average fault frequency per hour«), uzeta je vrednost $k=0,1$.

Simulacija MODELA B

U modelu B brožčani podaci su isti kao za osnovni DELAY-TIME model, izuzev što verovatnoća da će pojedini otkaz biti otkriven prilikom pre-

gleda stanja (β) nije jednaka jedinici i ovde je $\beta=0,7$, odnosno verovatnoća da otkaz neće biti otkriven je $1-\beta=0,3$.

Simulacija MODELA C

Takođe i u MODELU C isti su brožčani podaci kao za osnovni DELAY TIME model, izuzev što frekvencija pojave otkaza sistema nije ravnomerno raspoređena i zavisi od vremena od poslednjeg pregleda stanja (y). Frekvencija pojave otkaza $g(y)$, uzeta je kao:

$$g(y) = 0,1 - 0,06^{-0,1y} \quad (8)$$

Sl. 3 — Verovatnoća pojave »funktionalnog otkaza« sistema $b(T)$ u zavisnosti od dužine vremena između »pregleda stanja« (T) Y-model B, X-osnovni DELAY-TIME model Z-MODEL C

Sl. 4 — Očekivano vreme zastoja sistema $D(T)$ u zavisnosti od dužine vremena između »pregleda stanja« (T) Y-MODEL B, X-osnovni DELAY-TIME model, Z-MODEL C

Zaključak

Cilj tehnike DELAY-TIME analize jeste da odredi optimalni vremenski interval »pregleda stanja« sistema i to sa stanovišta smanjenja procenta »funktionalnih otkaza« u ukupnom broju otkaza sistema i smanjenja ukupnih troškova održavanja. Kao rezultat simulacije DELAY-TIME modela održavanja dobijaju se dijagrami odgovarajućih zavisnosti, sa kojih je moguće ustanoviti optimalni interval »pregleda stanja«. Prethodno je neophodno imati na raspolaganju funkciju gustine verovatnoće vremena odlaganja ot-

kaza $f(h)$ koja se koristi za konstrukciju odgovarajućeg modela relevantnih parametara. Podaci za ocenu ove funkcije dobijaju se u praksi putem ankete, tako što eksperti popunjavaju odgovarajuće upitnike sa vrednostima vremena odlaganja otkaza (delay-time) na osnovu kojih se crta histogram sa koga se dobija ocenjena vrednost $f(h)$.

Koristeći dijagrame na slikama 3 i 4, koji predstavljaju rezultat simulacije DELAY-TIME modela, moguće je odabrati najpovoljniju varijantu modela i optimalni interval »pregleda stanja« sistema (T), i to imajući u vidu optimalne vrednosti vremena zastoja sistema i verovatnoće pojave »funktionalnog otkaza« sistema. Optimalni interval »pregleda stanja« za sve modele u numeričkom primeru ima malu varijaciju i nalazi se u dijapazonu $T=23$ do 27 h.

Sa slike 3 vidi se da MODEL B (neidealni pregled stanja) pokazuje veći procenat »funktionalnih otkaza« sistema nego osnovni DELAY-TIME model, kao što se i očekivalo. Nasuprot ovom, MODEL C (neravnomerno ras-

poređen početni trenutak pojave otkaza) pokazuje manji procenat »funktionalnih otkaza« nego osnovni model. Takođe, slika 4 pokazuje da modeli sa najmanjim i najvećim brojem pojava »funktionalnih otkaza« imaju najmanji i najveći broj zastoja sistema, respektivno, kao što je i očekivano. To je zbog toga što se kasnije u ciklusu javlja veća frekvencija otkaza sistema.

U izrazu za $D(T)$ -očekivano vreme zastoja sistema po jedinici vremena pojavljuje se koeficijent k -»stopa nastanka« otkaza (»arrival rate«), koji je, takođe, potrebno oceniti. Ovaj koeficijent dobija se kao proizvod vrednosti prosečnog broja otkaza za posmatrano vreme rada sistema i prosečnog vremena zastoja sistema po otkazu koji se manifestuje kao »funktionalni otkaz«.

Na taj način obezbeđeni su svi neophodni ulazni podaci za DELAY-TIME model preventivnog održavanja koji, kao rezultat simulacije, daje odgovarajuće dijagrame, odnosno optimalni interval »pregleda stanja« sistema (T).

Literatura:

- [1] Christer, A. H., Waller, W. M.: Delay Time Models of Industrial Inspection Maintenance Problems, J. Operational Research Society, Vol. 35, Great Britain, 1984.
- [2] Christer, A. H., Waller, W. M.: Reducing Production Downtime Using Delay-Time Analysis, J. Operational Research Society, Vol. 35, Great Britain, 1984.
- [3] Christer, A. H., Wang, W., Baker, R. D.: Modelling Maintenance Practice of Production Plant Using the Delay-Time Concept, IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry, Vol. 6, Num. 1, Oxford University Press, 1995.
- [4] Kobbacy, K. A. H., Percy, D. F., Fawzi, B. B.: Sensitivity Analysis for Preventive-Maintenance Models, IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry Vol. 6, Num. 1, Oxford University Press, 1995.
- [5] Scarf, P. A., Bouamra, O.: On the Application of a Capital Replacement Model for a Mixed Fleet, IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry Vol. 6, Num. 1, Oxford University Press, 1995.
- [6] Todorović, J.: Inženjerstvo održavanja tehničkih sistema — Maintainability engineering, JUMV, Beograd, 1993.