MODEL PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA »PO VREMENU« NA BAZI KRITERIJUMA MAKSIMALNE GOTOVOSTI TEHNIČKOG SISTEMA

U radu je definisana metodologija za primenu modela preventivnog održavanja »po vremenu« na bazi kriterijuma maksimalne gotovosti tehničkog sistema. Kao izlazna operaciona karakteristika modela dobija se optimalni interval održavanja, koji predstavlja relevantnu informaciju u procesu donošenja odluke korisnika za pravovremeno sprovođenje postupaka preventivnog održavanja i obezbeđuje maksimalnu gotovost tehničkog sistema. Prikazani su rezultati simulacije modela na primeru preventivnog održavanja sastavnih elemenata motornog vozila.

Uvod

Optimizacija sistema održavanja tehničkih sistema može da se obavlja na različite načine. Jedna od mogućnosti jeste da se za to koriste modeli ili uporošćene sheme procesa ili sistema održavanja, koje se opisuju različitim oblicima matematičkih modela. Na taj način optimizira se model pojednostavljene sheme procesa, a ne fizička suština održavanja, kao stohastičkog procesa [1].

Modeli održavanja počivaju na pokazateljima pouzdanosti, što znači da je bitan preduslov za analizu i optimizaciju procesa održavanja poznavanje zakona pouzdanosti tehničkih sistema na kojima se sprovode postupci održavanja.

Kriterijumi optimizacije, tj. kriterijumi na osnovu kojih se, rešavanjem matematičkog modela, dobija najbolje rešenje za odlučivanje kada treba obaviti postupke preventivnog održavanja, definišu se, prvenstveno, sa stanovišta minimalnih troškova i sličnih ekonomskih pokazatelja ili, pak, sa stanovišta maksimalne gotovosti tehničkog sistema.

Za održavanje vojne tehnike, na primer, za motorna vozila kao složene, mobilne, popravljive i stohastičke sisteme, bitan kriterijum optimizacije je nivo gotovosti ili raspoloživosti. Modeli

održavanja koji se danas koriste u inženjerstvu održavanja tehničkih sistema pružaju mogućnosti za ovaj vid optimizacije u sasvim pojednostavljenim prilazima.

U ovom radu razrađen je tzv. model Bednjaka [3], koji se zasniva na strategiji upravljanja pouzdanošću tehničkog sistema u uslovima korišćenja, na bazi kriterijuma maksimalne gotovosti.

Kod ovog modela definišu se moguća stanja tehničkog sistema, pa se određuje izraz za gotovost, čijim se rešavanjem određuje optimalni interval preventivnog održavanja koji obezbeđuje maksimalnu gotovost sistema. Ako je srednje vreme preventivnog održavanja manje od srednjeg vremena korektivnog održavanja i ako funkcija intenziteta otkaza ima rastući karakter u vremenskoj bazi, tada postoji jedan optimalni vremenski interval za sprovođenje postupaka preventivnog održavanja, koji obezbeđuje maksimalnu gotovost sistema.

Za simulaciju matematičkog modela Bednjaka, odnosno za njegovo brzo i precizno rešavanje, razvijen je softver za elektronski računar [5], kojim se aproksimativno prikazuju osobine modeliranog procesa održavanja i, na taj način, zamenjuje realni eksperiment. Kao izlazna operaciona karakteristika simuliranog modela dobija se, u grafičkom

i analitičkom obliku, optimalni interval preventivnog održavanja tehničkog sistema.

Karakteristike preventivnog održavanja »po vremenu«

U modelima preventivnog održavanja »po vremenu« — u utvrđenim rokovima [1] (engleski: Hard Time Limit Maintenance) utvrđuju se fiksni rokovi za sprovođenje postupaka preventivnog održavanja na osnovu poznatih zakona pouzdanosti posmatranog elementa sistema, a izražavaju se u dimenzijama slučajno promenljive, preko koje se definiše i funkcija pouzdanosti (npr. u časovima rada, broju pređenih kilometara, itd.). Ovi rokovi se, ponekad, nazivaju i resursi (vremenski ili eksploatacioni), što znači da se radi o preventivnom održavanju u utvrđenim resursima

(u engleskom jeziku se za »utvrđeni resurs« koristi pojam »Hard Time Limit« [1]).

Dijagram na slici 1. [1, 3, 5] odgovara modelima preventivnog održavanja »po vremenu«, odnosno modelima preventivnih zamena elemenata ili drugih postupaka preventivnog održavanja.

Kao što se vidi sa slike 1, postupci preventivnog održavanja sprovode se posle određenog perioda rada t_i kojem odgovara neki nivo pouzdanosti sistema R_i . Važno je da se uoči da će neki elementi sistema otkazati i pre ovog vremena (kriva k), što znači da se pri opredeljenju za preventivne zamene po modelima ovog tipa moraju obezbediti svi potrebni uslovi i za korektivno održavanje.

Opredeljenje u odnosu na izbor modela preventivnog održavanja »po vremenu«, za primenu na određenog

Sl. 1 — Model preventivnog održavanja »po vremenu« parametra stanja

$R(t)$ — pouzdanost, t — vreme rada i sistema, t_i — interval preventivnog održavanja »po vremenu«, $X(t)$ — parametar stanja, X_n — nominalna vrednost, X_g — granična vrednost parametra stanja, k — kriva promene (»Hard Time Limit«):

sastavnom elementu sistema, sprovodi se na osnovu karaktera intenziteta otkaza (λ). Naime, ako je intenzitet otkaza elementa u vremenskoj bazi rastuća funkcija treba primeniti preventivno održavanje. To znači da preventivne zamene treba da se sprovode tek kada je element »odradio« veći deo svog veka, dakle, kada je verovatnoća pojave njegovog otkaza u narednom trenutku relativno visoka [1].

Model preventivnog održavanja »po vremenu« na bazi kriterijuma maksimalne gotovosti

Model preventivnog održavanja »po vremenu« na bazi kriterijuma maksimalne gotovosti [3] (model MAXGOT) razmatra situaciju kada sistem radi slučajno vreme τ , pri čemu je funkcija raspodele tog vremena $F(\tau)$. Ako se dogodi otkaz u intervalu $(0, \tau)$, vrši se korektivno održavanje. Ako je vreme rada sistema $t \geq \tau$, sistem se posle vremena t šalje na preventivno održavanje. Postoji verovatnoća P da će se sistem posle preventivnog održavanja vratiti u ispravno stanje i verovatnoća $1-P$ da će sistem morati na korektivno održavanje. Tada će u bilo kojem trenutku t , proces $x(t)$ opisati sledeća moguća stanja sistema:

$$x(t) = \begin{cases} E_0 & \text{— sistem ispravan, ali ne radi,} \\ E_1 & \text{— sistem ispravan i radi,} \\ E_2 & \text{— sistem na preventivnom održavanju,} \\ E_3 & \text{— sistem na korektivnom održavanju.} \end{cases}$$

Gotovost će biti:

$$G = \frac{\bar{t}_0 + \bar{t}_1}{\bar{t}_0 + \bar{t}_1 + \bar{t}_2 + \bar{t}_3} \quad (1)$$

gde je:

$\bar{t}_0$ = srednje vreme boravka sistema u ispravnom stanju,

$\bar{t}_1$ = srednje vreme boravka sistema u stanju rada,

$\bar{t}_2$ = srednje vreme trajanja preventivnog održavanja

$\bar{t}_3$ = srednje vreme trajanja korektivnog održavanja.

Pri ovoj strategiji upravljanja održavanjem najveći značaj predstavlja optimizacija parametra τ , koji karakteriše prelaz sistema iz stanja rada u stanje preventivnog održavanja, jer je periodičnost preventivnog održavanja u funkciji pouzdanosti sistema.

Ako je $\bar{t}_3 < \bar{t}_2$, gotovost sistema dostiže maksimum pri odsustvu preventivnog održavanja. U slučaju kada je $\bar{t}_3 > \bar{t}_2$, postoji *optimalni interval preventivnog održavanja »po vremenu«* (τ_0) koji obezbeđuje maksimalnu vrednost gotovosti sistema. Određivanjem optimalnog intervala preventivnog održavanja omogućava se postavljanje optimalnog upravljanja preventivnim održavanjem »po vremenu« na bazi maksimalne gotovosti sistema.

Mogućnosti modela MAXGOT mogu biti proširene uvođenjem *dijagnostike* stanja sistema, pa se onda ovaj model svrstava u modele preventivnog održavanja prema stanju, na osnovu kriterijuma klasifikacije modela [3, 7]. Tada se dijagnostika, kao element modela, može razmatrati kao samostalno stanje u kojem se sistem podvrgava »proveri stanja« ili, pak, kao spajanje dijagnostike sa održavanjem.

U ovom slučaju, ako je vreme rada sistema $t \geq \tau$, posle vremena t sistem se šalje na dijagnostiku, a zatim na održavanje, gde se obavljaju propisani postupci preventivnog održavanja. Ako je pri dijagnostici utvrđen otkaz ili neispravnost sastavnih elemenata sistema, sistem se šalje na korektivno održavanje.

Uvođenjem dijagnostike, u proizvoljnom trenutku vremena t , proces

$x(t)$ opisuje sledeća stanja sistema (slika 2) [3]:

Sl. 2 — Stanja sistema modela MAXGOT

$$x(t) = \begin{cases} E_0 & \text{— sistem ispravan, ali ne radi,} \\ E_1 & \text{— sistem ispravan i radi,} \\ E_2 & \text{— sistem na dijagnostikovanju,} \\ E_3 & \text{— sistem na preventivnom održavanju,} \\ E_4 & \text{— sistem na korektivnom održavanju,} \\ \lambda_{ij} & \text{— gustina verovatnoće prelaza sistema iz stanja u stanje.} \end{cases}$$

Za ocenu efektivnosti modela MAXGOT treba naći gotovost sistema (G) [3]:

$$G = \frac{\bar{t}_0 + \bar{t}_1}{\bar{t}_0 + \bar{t}_1 + \bar{t}_2 + \bar{t}_3 + \bar{t}_4} \quad (2)$$

gde je:

$\bar{t}_0$ = srednje vreme boravka sistema u ispravnom stanju,

$\bar{t}_1$ = srednje vreme boravka sistema u stanju rada,

$\bar{t}_2$ = srednje vreme dijagnostike,

$\bar{t}_3$ = srednje vreme trajanja preventivnog održavanja,

$\bar{t}_4$ = srednje vreme trajanja korektivnog održavanja.

Opis modela MAXGOT

Kod modela MAXGOT, kao što je rečeno, ako se u intervalu $(0, \tau)$ rada sistema dogodi otkaz, vrši se korektivno održavanje. Ako je vreme rada $t > \tau$, sistem se šalje na preventivno održavanje.

Zadatak ovog modela je optimizacija vremena τ posle kojeg se sistem šalje na preventivno održavanje. Za rešenje ovog zadatka koristi se jednačina za gotovost u funkciji od τ [3]:

$$G(\tau) = \frac{\int_0^\tau R(t) dt}{\int_0^\tau R(t) dt + \bar{t}_2 + (\bar{t}_3 - \bar{t}_2) [1 - R(\tau)]} \quad (3)$$

gde su: $R(t)$ i $R(\tau)$ pouzdanosti u funkciji vremena t i τ . Ako se reši jednačina:

$$\frac{dG(\tau)}{d\tau} = 0 \quad (4)$$

dobija se:

$$\frac{\bar{t}_2}{\bar{t}_3 - \bar{t}_2} = \lambda(\tau) \int_0^\tau R(t) dt - [1 - R(\tau)] \quad (5)$$

gde je:

$\lambda(\tau)$ — intenzitet otkaza u funkciji vremena τ ,

$\bar{t}_2$ — srednje vreme trajanja preventivnog održavanja,

$\bar{t}_3$ — srednje vreme trajanja korektivnog održavanja.

U slučaju kada je $\bar{t}_3 > \bar{t}_2$ i kada je intenzitet otkaza $\lambda(\tau)$ monotonno rastuća funkcija vremena, jednačina (5) ima jedinstveno rešenje koje predstavlja optimalni interval preventivnog održavanja »po vremenu« (τ_0), pri čemu gotovost dostiže svoju maksimalnu vrednost datu jednačinom:

$$G_{\max} = \frac{1}{1 + (\bar{t}_3 - \bar{t}_2) \lambda(\tau_0)} \quad (6)$$

Ukoliko se dogodi da jednačina (5) ima više rešenja, optimalni interval preventivnog održavanja »po vremenu« (τ_0) jeste ono rešenje koje ima najmanju vrednost.

U slučaju kada je $\bar{t}_3 < \bar{t}_2$ maksimalna vrednost gotovosti dobija se iz izraza:

$$G_{\max} = \frac{\bar{t}}{\bar{t} + \bar{t}_3} \quad (7)$$

što znači da tada ne treba vršiti preventivno održavanje. Veličina $\bar{t}$ predstavlja srednje vreme do otkaza.

Model MAXGOT može se primeniti kod tehničkih sistema ako postoje podaci o srednjem vremenu trajanja preventivnog održavanja ($\bar{t}_2$), srednjem vremenu trajanja korektivnog održavanja ($\bar{t}_3$), kao i podaci o vremenima rada do otkaza sistema.

Razvoj algoritama za primenu modela MAXGOT

Algoritam za primenu modela MAXGOT prikazan je na slici 3.

Za primenu modela MAXGOT potrebno je realizovati sledeće korake:

— prikupiti podatke o vremenima rada do otkaza sastavnih elemenata sistema;

— utvrditi kojem zakonu raspodele pripadaju vremena rada do otkaza tih sastavnih elemenata sistema;

— proveriti da li iz usvojenog zakona raspodele proizilazi rastući intenzitet otkaza (λ) u funkciji vremena rada;

— napisati izraz za funkciju intenziteta otkaza sistema $\lambda(\tau)$;

— napisati izraz za funkciju pouzdanosti sistema $R(t)$, tj. $R(\tau)$;

Sl. 3 — Algoritam modela MAXGOT

— obezbediti podatak o srednjem vremenu trajanja korektivnog održavanja sistema ($\bar{t}_3$);

— obezbediti podatak o srednjem vremenu trajanja preventivnog održavanja sistema ($\bar{t}_2$);

— proveriti da li je srednje vreme trajanja korektivnog održavanja sistema ($\bar{t}_3$) veće od srednjeg vremena trajanja preventivnog održavanja ($\bar{t}_2$);

— zameniti izraze za $\lambda(\tau)$ i $R(t)$ tj. $R(\tau)$, kao i vrednosti za t_2 i t_3 , u jednačinu (5);

— rešiti jednačinu (5) po vremenu τ . Rešenje τ_0 predstavlja optimalni interval preventivnog održavanja »po vremenu« koji obezbeđuje postizanje maksimalne gotovosti sistema. Ukoliko jednačina (5) ima više rešenja, optimalni interval preventivnog održavanja »po vremenu« (τ_0) jeste ono rešenje koje ima najmanju vrednost;

— korišćenjem jednačine (6) izračunati vrednost maksimalne gotovosti ($G_{\max}$) koja se dobija za optimalni interval preventivnog održavanja »po vremenu« (τ_0) na bazi kriterijuma maksimalne gotovosti.

Simulacija modela MAXGOT primenom elektronskog računara

Na osnovu algoritma za primenu modela MAXGOT razvijen je, u Quick Basic-u, segment programskog paketa »DMPOPS« [5] koji omogućava simulaciju modela MAXGOT primenom elektronskog računara.

Za simulaciju modela MAXGOT neophodno je unapred definisati ulazne parametre koji se odnose na karakteristike pouzdanosti i srednja vremena održavanja elemenata sistema, a rezultati simulacije se dobijaju u obliku dijagramskog prikaza funkcije gotovosti, čija ekstremna vrednost definiše optimalni interval preventivnog održavanja.

Bitnu specifičnost motornih vozila, koja se koriste u vojnim sistemima, predstavlja veoma mali intenzitet korišćenja, što utiče na vrstu i karakter

otkaza. Kao posledica otkaza koji potiču od tzv. »starenja«, korozije i drugih sličnih procesa slabljenja materijala, pouzdanost sastavnih elemenata vozila tokom vremena bitno opada, pa samim tim i gotovost vozila. Pojava »starenja« je naročito izražena kod nemetalnih elemenata, kao što su semerinci, gumeni zaptivači u ulju, gumene cevi, remeni i dr., čiji intenzitet otkaza ima rastući karakter u vremenskoj bazi, tj. to su elementi koji relativno brzo doživljavaju period tzv. »pozni otkaza«, pa im se mora posvetiti posebna pažnja u definisanju periodičnosti preventivnog održavanja.

Osnovna ideja za primenu modela MAXGOT na pojedine grupe nemetalnih elemenata vozila jeste težnja za optimizacijom njihovog resursa rada do preventivne zamene, uz obezbeđenje maksimalne gotovosti motornog vozila.

Koristeći podatke iz jednog informacionog sistema o radu i održavanju motornih vozila, nakon unesene vremenske slike stanja za grupu gumenih zaptivača u ulju, pomoću programskog paketa »DMPOPS« [5], određeni su statistički pokazatelji slučajno promenljive veličine, kao i karakteristike pouzdanosti za slučaj Weibullove raspodele.

Srednje vreme korektivnog održavanja = ?	15
Srednje vreme preventivnog održavanja = ?	5
Parametri funkcije nepouzdanosti (-) = ?	
Parametar oblika β =	4
Parametar razmere η =	2500
Podaci u redu (D/N)?	

Sl. 4 — Zadavanje ulaznih parametara za simulaciju modela MAXGOT primenom elektronskog računara

Za simulaciju modela MAXGOT neophodno je uneti u računar parametre prikazane na slici 4, čije su vrednosti za grupu gumenih zaptivača u ulju sledeće:

- $t_3=15$ [h] — srednje vreme korektivnog održavanja,
- $t_2=5$ [h] — srednje vreme preventivnog održavanja,
- $\beta=4$ — parametar oblika Weibullove raspodele,
- $\eta=2500$ — parametar razmere Weibullove raspodele slučajno promenljive veličine.

Na osnovu zadatih ulaznih parametara, kao rezultat simulacije modela dobijaju se izlazne informacije u obliku dijagramskog prikaza i u analitičkom obliku, kao što se vidi na slici 5.

Očigledno je da segment programskog paketa »DMPOPS« za simulaciju modela MAXGOT omogućava sagleda-

vanje karaktera promene gotovosti motornog vozila u funkciji slučajno promenljive veličine, kao i određivanje i prikazivanje optimalnog intervala preventivnog održavanja »po vremenu« za maksimalnu vrednost gotovosti motornog vozila. Kao što se vidi sa slike 5, za ovaj primer, za vrednost maksimalne gotovosti vozila $G_0=0,6985$ optimalna vrednost intervala preventivne zamene za grupu gumenih zaptivača u ulju je $\tau_0=T_p=1556$ [km].

Zaključak

Kao izlaz simulacije modela preventivnog održavanja »po vremenu« na bazi kriterijuma maksimalne gotovosti, dobija se optimalni interval preventivnog održavanja sastavnih elemenata koji obezbeđuje maksimalnu gotovost tehničkog sistema.

Automatizovanim generisanjem izlaznih informacija simuliranog modela,

Sl. 5 — Rezultati simulacije modela MAXGOT — izlazna operaciona karakteristika modela:

T_p — optimalni interval preventivne zamene grupe gumenih zaptivača u ulju, na bazi kriterijuma max. gotovosti motornog vozila (G_0)

licima — izvršiocima procesa održavanja stoje na raspolaganju kvantitativni pokazatelji za visok nivo procesa odlučivanja o dinamici sprovođenja preventivnih postupaka održavanja. Na taj način korisnik ima mogućnost da koriguje prethodno korišćene intervale preventivnog održavanja sistema.

Primena automatizovanog modela MAXGOT je pogodna u sistemima održavanja koji su podržani kvalitetnim informacionim sistemom, tj. koji raspolazu podacima o radu i održavanju teh-

ničkog sistema i omogućavaju određivanje karakteristika pouzdanosti.

Efekti primene modela MAXGOT ogledaju se u maksimiziranju iskorišćenosti resursa rada elemenata sistema, što rezultuje u obezbeđenju zahtevane pouzdanosti i gotovosti i sniženju troškova održavanja sistema.

Definisana metodologija primene modela MAXGOT ima opšti karakter, tj. model može biti apliciran na različite elemente i parametre stanja u procesu održavanja tehničkih sistema.

L i t e r a t u r a :

- [1] Todorović, J.: Inženjerstvo održavanja tehničkih sistema — MAINTAINABILITY ENGINEERING, JUMY, Beograd, 1993.
- [2] Arsenić, Z., Vasić, B.: Efektivnost tehničkih sistema — Rešavanje karakterističkih problema primenom računara, Mašinski fakultet, Beograd, 1991.
- [3] Bednjak, M. N.: Modelirovanie procesov tehničkog obsluživanja i remonta avtomobilej, Visšaja škola, Kiev, 1983.
- [4] Gertsbakh, I. B.: Models of preventive maintenance, North — Holland publishing company Amsterdam — New York — Oxford, 1977.
- [5] Minić, S.: Dinamički model preventivnog održavanja prema stanju motornih vozila, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1993.
- [6] Model preventivno-korektivnog održavanja na bazi reprezentativnih TMS — Elaborat po Projektu, Mašinski fakultet, Beograd, 1984.
- [7] Minić, S., Todorović, J.: Sistemski prilaz izboru koncepcije i modela preventivnog održavanja prema stanju, motornih vozila, Vojnotehnički glasnik, Beograd, br. 3, 1993.
- [8] Minić, S.: Dinamički model preventivnog održavanja motornih vozila prema stanju, XIV Naučno-stručn skup Nauka i motorna vozila, Mašinski fakultet, Beograd, 1993.