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

MODEL OPTIMALNOG GRUPISANJA PERIODIČNOSTI PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA TEHNIČKIH SISTEMA

UDC: 658.58.001.575

Rezime:

U radu je definisana metodologija za primenu modela optimalnog grupisanja periodičnosti preventivnog održavanja elemenata tehničkih sistema. Simulacijom modela dobijen je optimalni interval preventivnog održavanja za grupu elemenata motornog vozila.

Ključne reči: model održavanja, grupa elemenata, optimalni interval, simulacija.

THE TECHNICAL SYSTEMS PREVENTIVE MAINTENANCE OPTIMAL GROUP INTERVAL MODEL

Summary:

In this paper, the implementation methodology of the technical systems elements preventive maintenance optimal group interval model has been defined. The preventive maintenance optimal interval of motor vehicle elements group was obtained by model simulation.

Key words: maintenance model, elements group, optimal interval, simulation.

Uvod

Za izbor optimalnih varijanti koncepcije sistema održavanja, tj. za određivanje periodičnosti, odnosno vremenskih intervala u kojima su postupci preventivnog održavanja najpovoljniji (optimalni), sa stanovišta kriterijuma minimalnih troškova ili maksimalne gotovosti tehničkog sistema, koriste se razni oblici i vrste modela održavanja [1].

Matematički modeli održavanja predstavljaju pojednostavljene prikaze procesa promene stanja i održavanja u obliku matematički izraženog odnosa određenih parametara tih procesa ili pokazatelja — kriterijuma sa aspekta troškova ili gotovosti. Pomoću mo-

dela održavanja tehničkog sistema određuje se nepoznati parametar odabrane koncepcije održavanja — na primer, periodičnost zamene elementa ako je u pitanju preventivno održavanje zamenom ili vremenski period (interval) nakon kojeg je potrebno izvršiti pregled, odnosno »proveru stanja« radi utvrđivanja stanja, ako je odabrana koncepcija POPS (preventivno održavanje prema stanju).

I pored velikih međusobnih razlika, modeli preventivnog održavanja tehničkih sistema imaju izvesna zajednička obeležja [1, 4]:

— počivaju na pokazateljima pouzdanosti, što znači da je za optimiza-

ciju procesa održavanja bitan preduslov poznavanje zakona pouzdanosti i matematičkih zakonitosti promene parametara stanja elemenata tehničkog sistema;

— prvenstveno obuhvataju konceptijska obeležja sistema održavanja, odnosno efekte primenjene koncepcije preventivnog održavanja. Retko se modelima obuhvataju i osobine sistema održavanja sa stanovišta organizacije i tehnologije održavanja, što umanjuje stvarne mogućnosti optimizacije;

— razvijeni su za »pojedine elemente«, tj. tehnički sistem se održava na nivou sastavnog elementa. Postavlja se problemsko pitanje: kako organizovati optimalni proces preventivnog održavanja za složeni tehnički sistem? Na primer, neborbeno terensko vozilo sastoji se od $(15 - 18) \cdot 1000$ sastavnih elemenata, od kojih $(7 - 9) \cdot 1000$ tokom korišćenja gubi početna svojstva, pri čemu $(3 - 4) \cdot 1000$ elemenata ima kraći vek upotrebe od vozila kao celine, i od čega je 200 — 400 elemenata kritično u pogledu pouzdanosti, tj. češće od ostalih elemenata zahteva postupke preventivnog održavanja, izazivajući troškove radne snage i materijala.

Rešenje problema mora se tražiti u izboru i kombinovanoj primeni najpovoljnijih matematičkih modela održavanja na nivou sastavnih elemenata tehničkog sistema, [4], a zatim se pristupa postupku optimalnog grupisanja sastavnih elemenata prema periodičnostima preventivnog održavanja, tj. primenjuje se model optimalnog grupisanja periodičnosti preventivnog održavanja (MODOGRUP).

Čak i kada bi se zanemarila stohastička zavisnost sastavnih elemenata sistema, ne može se prenebregnuti ekonomska zavisnost, izražena činje-

nicom da kombinovanje postupaka »pregleda stanja« za različite sastavne elemente sistema rezultira sniženjem troškova održavanja u poređenju sa izvođenjem istih pregleda stanja posebno za svaki element [2].

Kriterijumi grupisanja periodičnosti preventivnog održavanja

Grupisanjem periodičnosti postupaka preventivnog održavanja elemenata sistema remete se »lokalni« optimalni intervali, ali se smanjuju ukupni troškovi održavanja tehničkog sistema. Važno je istaći da se prilikom grupisanja elemenata ne smeju bitno narušiti »lokalne« optimalne periodičnosti održavanja elemenata.

Optimizacija grupisanja može se izvršiti na osnovu [6]:

— tehničko-ekonomskog kriterijuma, koji polazi od toga da su ukupni troškovi održavanja grupe elemenata bitno manji od ukupnih troškova održavanja pri izdvojenim postupcima održavanja individualnih elemenata;

— kriterijuma grupisanja prema »centralnoj operaciji« ili grupi operacija postupaka održavanja;

— kriterijuma »prirodnog« grupisanja.

U praksi često postoje ograničenja, kao što je, na primer, zahtevani nivo pouzdanosti elemenata sistema, bezbednost rada ili neki drugi tehnički kriterijum, pa se u tim situacijama grupisanje periodičnosti održavanja može primeniti samo ako su zadovoljena data ograničenja.

Osnovni kriterijum jeste da se grupisanje periodičnosti postupaka preventivnog održavanja sistema izvodi za one elemente koji imaju bliske vrednosti periodičnosti. Bliskost ovih intervala uglavnom zavisi od mogućnosti i nastojanja konstruktora i proizvođača da za određene grupe elemenata otkloni velike razlike između srednjih vremena pojave stanja »u otkazu« (slika 1) [6].

Sl. 1 — Raspodela resursa grupe sastavnih elemenata sistema

Pravovremeni model

Najčešće proučavani model preventivnog održavanja je periodični (sekvencijalni) model koji tretira preventivno održavanje svakog pojedinačnog elementa ili grupe istotipskih sastavnih elemenata sistema [5]. Međutim, potrebno je organizovati optimalni proces održavanja za složeni tehnički sistem koji se sastoji od više hiljada sastavnih elemenata.

Činjenica je da se kombinacijom postupaka preventivnog održavanja za grupu sastavnih elemenata mogu postići niži troškovi nego pri njihovom izvršenju pojedinačno i nezavisno za svaki element. Zbog toga se teži da se model periodičnog preventivnog održavanja proširi na više sastavnih elemenata »stohastički i ekonomski zavisnih«. Odmah se može zaključiti da je periodični model održavanja optimalan za primenu na složenim sistemima samo ako se svi elementi posmatraju kao stohastički i ekonomski zavisni, a intenzitet pojave otkaza sastavnih elemenata je rastućeg karaktera.

Radi izvođenja opštih zaključaka, potrebnih za određivanje izlaznih ka-

rakteristika periodičnog modela koncepcije preventivnog održavanja, biće razmotren samo slučaj kada su ta dva elementa sistema ekonomski zavisna i jedan ima konstantnu, a drugi rastuću brzinu pojave neispravnosti [5]. Označimo te elemente sa »0« i »1«. Pretpostavlja se da element »0« ima rastuću brzinu pojave neispravnosti, a element »1« konstantnu. Neka su, pored toga, troškovi zamene elementa »0« pre pojave neispravnosti (znači preventivno) manji (C_0^0) nego troškovi zamene posle pojave neispravnosti (C_0^∞); slično, vreme potrebno za zamenu elementa »0« pre pojave neispravnosti (T_0^0) manje je od vremena potrebnog za zamenu posle neispravnosti (T_0^∞).

Obeležavanjem troškova zamene elementa »1« pojedinačno (po pojavi neispravnosti) i zamenu oba elementa zajedno (preventivno za element »0« ili po pojavi neispravnosti za oba elementa) sa C_1^1 i C_{01} , a sa T_1^1 i T_{01} odgovarajuća vremena potrebna za zamenу, mogu se dati kriterijumi izraženi nejednačinama:

$$C_{01} < C_0^0 + C_1^1 \quad (1)$$

$$T_{01} < T_0^0 + T_1^1 \quad (2)$$

koje daju mogućnosti uštede u radu i materijalu pri preduzimanju postupka održavanja. U stvari, ovim nejednačinama se omogućava nalaženje najpovoljnijeg rešenja u slučaju ako se pojavi slučajna neispravnost elementa »1«, a element »0« nije postigao svoj vek trajanja, tj. može se naći odgovor da li u tom slučaju treba promeniti i element »0« bez obzira na to što nije izdržao određeni vek trajanja, kao i druge moguće situacije. U stvari, omogućava se optimizacija procesa obnavljanja takvog sistema po jednom od usvojenih kriterijuma.

Optimalni model održavanja ovakva dva elementa sistema (slika 2) može biti karakterisan sa dva parametra,

Sl. 2 — Zavisnost intenziteta otkaza $\lambda(t)$ dva elementa tehničkog sistema

recimo » t_0 « i » T «, odnosno sa » t « kao promenljivim intervalom zamene elementa »0«, koji ispunjavaju sledeće uslove:

— kada je $t < t_0$ treba zameniti element »0« samo ako je došlo do njegove neispravnosti,

— kad je $t_0 \leq t \leq T$, treba zameniti i element »0« ako kod elementa »1« dođe do neispravnosti u tim uslovima,

— kad je $t = T$, zameniti element »0« bez obzira na to da li je ili nije neispravan.

Element »1« zamenjuje se u bilo kom od navedenih slučajeva odmah pošto kod njega dođe do stanja »u otkazu«.

Optimalne vrednosti t_0 i T mogu se odrediti za konkretan slučaj u zavisnosti od kriterijumske funkcije, koja se traži i definiše, za uslove u kojima treba odrediti optimalan model preventivnog održavanja.

Ako se uzmu kao kriterijum — troškovi po jedinici vremena ispravnog rada sistema kao funkcija ovih dvaju parametara, onda se minimiziranjem troškova određuju optimalne vrednosti ovih parametara.

Za navedenu strukturu (opis ili sastav) modela održavanja (t_0, T) troškovi po jedinici vremena za više intervala preventivnog održavanja mogu se izračunati kao zbir:

a) — amortizacionih troškova koji nastaju kao posledica da sistem ne radi zbog potrebe preventivnog održavanja na predmetnom podsklopu,

b) — troškova koji nastaju kao posledica zamene samo elementa »1« zbog očekivanog broja neispravnosti ako je $0 \leq t \leq t_0$,

c) — troškova zamene elementa »0« i »1« zbog verovatnoće pojave neispravnosti elementa »1« u intervalu $t_0 \leq t < T$,

d) — troškova zamene samo elementa »0« zbog verovatnoće pojave neispravnosti elementa »0« u intervalu $0 \leq t < T$,

e) — troškova nepotrebne zamene samo elementa »0« zbog verovatnoće da element »0« neće biti neispravan u intervalu $0 \leq t < T$, a deo »1« neće biti neispravan u intervalu $t_0 \leq t < T$.

Ako se ovaj zbir mogućih troškova podeli sa dužinom ciklusa (T_L), dobiće se troškovi održavanja po jedinici vremena.

Ovakva teoretska postavka može se direktno proširiti na model održavanja za podsklop (sklop) sastavljen od »M+1« stohastički neispravnih elemenata, pri čemu deo »0« ima rastuću, a »M« elemenata su sa konstantnom brzinom pojave neispravnosti. Takav model može se okarakterisati parametrom »T« i parametrima M , odnosno t_i ($i = 1, 2, \dots, M$), od kojih svaki ima analognu interpretaciju datu za parametar » t_0 « opisanog kod modela za dva stohastički neispravna elementa jednog sistema.

Model GERTCBAHA za optimalno grupisanje sastavnih elemenata sistema prema njihovim periodičnostima

Opis modela

Razmotriće se preventivno održavanje sistema koji se sastoji od nekoliko stohastički nezavisnih elemenata. Cilj je da se odredi periodičnost izvođenja postupaka preventivnog održavanja za svaki element sistema.

Troškovi radne snage i materijala za istovremene opravke grupe elemenata bitno su manji od istog utroška pri izdvojenom održavanju individualnih elemenata. To sugeriše grupisanje elemenata u toku izvođenja postupaka održavanja. Pretpostavimo, na primer, da se tehnički sistem sastoji od dva elementa i da se bira optimalni period preventivnog održavanja za svaki element koji se razmatra odvojeno. Označimo ove periode sa T_1 i T_2 , $T_1 \neq T_2$. Neka su C_1 i C_2 troškovi opravke tih elemenata. Ako su trenuci za preventivno održavanje kombinovani za oba elementa, tada će troškovi biti jednaki nekoj vrednosti x koja dovodi do sledeće nejednačine:

$$\max(C_1, C_2) < x < C_1 + C_2 \quad (3)$$

Bilo bi, verovatno, najcelishodnije razmotriti sistem dva elementa kao

jednu jedinicu i uvesti zajednički period T , $T \neq T_1$; $T \neq T_2$, za periodično održavanje kada bi se oba elementa mogla zajedno preventivno održavati. Sva pravila koja propisuju preventivno održavanje složenih tehničkih sistema predviđaju grupisanje sastavnih elemenata za sprovođenje postupaka održavanja. Kao posledica toga, biće formulisan matematički model za složeni sistem u kojem je razvijena ideja optimalnog grupisanja prema njihovim periodima preventivnog održavanja.

Matematički model Gertcbaha

U literaturi [2] razrađen je »model optimalnog grupisanja sastavnih elemenata prema njihovim periodičnostima preventivnog održavanja« (MODOGUP), koji se odnosi na multikomponentni sistem i koji zadovoljava izraz (5).

Neka se sistem sastoji od n sastavnih elemenata označenih sa $i = 1, \dots, n$. Ako sastavni element i ima period provere stanja t_i , ukupni prosečni troškovi po jedinici vremena za ceo sistem $W(\{t_i\})$ dati su jednačinom [2]:

$$W(\{t_i\}) = f\Sigma(\{t_i\}) + \sum_{i \in I_0} \psi_i(t_i)/t_i \quad (4)$$

gde je:

$W(\{t_i\})$ — minimalni troškovi održavanja,

t_i — periodičnost provere stanja sastavnog elementa,

$f\Sigma(\{t_i\})$ — ukupni dodatni troškovi zbog preventivnih opravki podsistema različitih rangova,

I_0 — skup sastavnih elemenata $i = (i_1, \dots, i_n)$,

$\psi_i(t_i)$ — prosečni troškovi za sastavni element i , uključujući troškove POPS i korektivnog održavanja za interval rada $(0, t_i)$.

Cilj modela je određivanje vrednosti za »grupnu« periodičnost »provera stanja« elemenata (t_i) koja odgovara minimalnim troškovima $W(\{t_i\})$.

Model MODOGRUP

Ako bi se postupci preventivnog održavanja sprovodili strogo prema definisanim optimalnim intervalima za pojedinačne sastavne elemente sistema nastali bi veliki troškovi zbog čestih zastoja sistema, smanjila bi se operativna gotovost, nastali bi problemi u organizaciji održavanja, i sl. Zbog toga, pristupa se određivanju optimalnog intervala za sprovođenje postupaka preventivnog održavanja za grupu elemenata. Pri tome se grupisanje periodičnosti održavanja izvodi za one elemente koji imaju bliske vremenske intervale održavanja, uz uslov da se bitnije ne naruše.

Model MODOGRUP predstavlja metod za optimizaciju procesa održavanja, koji se zasniva na kriterijumu da su ukupni troškovi održavanja za grupu sastavnih elemenata sistema manji od sume parcijalnih troškova održavanja za pojedinačne elemente, čiji matematički izraz glasi [2, 4]:

$$C_{t_{\min}} < \sum_{i=1}^n C_i \quad (5)$$

gde je:

$C_{t_{\min}}$ — ukupni optimalni troškovi održavanja za grupu elemenata i izabranu periodičnost (t_g),

$\sum_{i=1}^n C_i$ — ukupni troškovi održavanja prema »lokalnim« intervalima preventivnog održavanja,
 n — broj elemenata u grupi

Ovaj model je grafički interpretiran na slici 3 [4]. Kao što se vidi na

Sli. 3 — Model optimalnog grupisanja periodičnosti sprovođenja postupaka preventivnog održavanja sastavnih elemenata sistema (MODOGRUP)

slici, modelom se određuje optimalni interval za sprovođenje postupaka održavanja za grupu elemenata (t_g), koji zadovoljava uslov (5), odnosno koji daje minimalne ukupne troškove održavanja za grupu posmatranih elemenata sistema.

Simulacija modela MODOGRUP primenom računara

Radi simulacije modela MODOGRUP razvijen je potprogram u okviru programskog paketa DMPOPS [4]. Za simulaciju modela neophodno je zadati ukupni broj elemenata sistema za koje se određuje optimalni interval održavanja (u ovom primeru simulacije izabrano je 5 sastavnih elemenata motornog vozila), kao što je prikazano na slikama 4 do 8.

Element 1

Ukupno vreme rada elemenata (h)=?	2000
Parametri funkcije nepouzdanosti (-)=?	
Parametar oblika β =	4
Parametar razmere η =	2000
Podaci u redu (D/N) ?	

Sl. 4 — Zadavanje ulaznih parametara za simulaciju modela MODOGRUP primenom elektronskog računara (element 1)

Element 2

Ukupno vreme rada elemenata (h)=?	2000
Parametri funkcije nepouzdanosti (-)=?	
Parametar oblika β =	3.75
Parametar razmere η =	1750
Podaci u redu (D/N) ?	

Sl. 5 — Zadavanje ulaznih parametara za simulaciju modela MODOGRUP (element 2)

Element 3

Ukupno vreme rada elemenata (h)=?	2000
Parametri funkcije nepouzdanosti (-)=?	
Parametar oblika β =	3.5
Parametar razmere η =	1500
Podaci u redu (D/N) ?	

Sl. 6 — Zadavanje ulaznih parametara za simulaciju modela MODOGRUP (element 3)

Element 4

Ukupno vreme rada elemenata (h)=?	2000
Parametri funkcije nepouzdanosti (-)=?	
Parametar oblika β =	3.25
Parametar razmere η =	1400
Podaci u redu (D/N) ?	

Sl. 7 — Zadavanje ulaznih parametara za simulaciju modela MODOGRUP (element 4)

Element 5

Ukupno vreme rada elemenata (h)=?	2000
Parametri funkcije nepouzdanosti (-)=?	
Parametar oblika β =	3.1
Parametar razmere η =	1200
Podaci u redu (D/N) ?	

Sl. 8 — Zadavanje ulaznih parametara za simulaciju modela MODOGRUP (element 5)

Pored toga, neophodno je zadati troškove održavanja za svaki element pojedinačno. Radi pojednostavljenja prikaza simulacije, u ovom primeru su uzeti identični troškovi održavanja za svih pet elemenata [4].

Izlazna informacija modela MODOGRUP dobija se simulacijom posredstvom računara u obliku tabele i dijagrama. Dijagramski prikaz na slici 9 [7] predstavlja funkciju ukupnih troškova održavanja, u zavisnosti od vremena rada za svaki pojedinačni element i zbirno za grupu elemenata. Optimalni interval preventivnog održavanja za grupu elemenata motornog vozila definisan je minimalnom vrednoš-

Sl. 9 — Rezultati simulacije modela MODOGRUP — optimalni interval preventivnog održavanja za grupu elemenata motornog vozila (t_g)

ću funkcije ukupnih troškova održavanja i, u ovom slučaju, iznosi $t_g = 720 \text{ h}$. Takođe, na istoj slici prikazane su vrednosti i dijagrami kojima su definisani optimalni intervali održavanja za svaki pojedinačni element.

Pre usvajanja vrednosti optimalnog intervala održavanja za grupu elemenata treba proveriti da li je ostvarena zahtevana vrednost pouzdanosti za celinu posmatranog tehničkog sistema. Ukoliko zahtevana pouzdanost nije ostvarena, neophodno je izvršiti ponovnu modifikaciju optimalnog intervala održavanja (t_g).

Zaključak

Kao izlaz simulacije modela optimalnog grupisanja periodičnosti preventivnog održavanja tehničkih sistema (MODOGRUP), koji se zasniva na kriterijumu minimalnih troškova, dobija se izlazna karakteristika modela — optimalni interval preventivnog o-

državanja sastavnih elemenata sistema, koji obezbeđuje minimalne ukupne troškove održavanja.

Primenom modela MODOGRUP realizuje se optimalno grupisanje periodičnosti sprovođenja postupaka preventivnog održavanja, čime se znatno smanjuju troškovi održavanja, a povećava operativna gotovost tehničkog sistema.

Očigledan je značaj primene ovog modela prema definisanoj metodologiji, što se 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 MODOGRUP ima opšti karakter, tj. model može biti apliciran na različite sastavne elemente u procesu održavanja bilo kojih složenih tehničkih sistema, pod uslovom da su podržani kvalitetnim informacionim sistemom o radu i održavanju.

L i t e r a t u r a :

- [1] Todorović, J.: Inženjerstvo održavanja tehničkih sistema — Maintainability engineering, JUMV, Beograd, 1993.
- [2] Gertsbakh, I. B.: Models of preventive maintenance, North — Holland publishing company, Amsterdam — New York — Oxford, 1977.
- [3] Jorgenson, D. W., McCall, J. J., Radner, R.: »Optimal replacement policy«, North — Holland publishing company, Amsterdam — Oxford, 1974.
- [4] Minić, S.: Dinamički model preventivnog održavanja prema stanju motornih vozila, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1993.
- [5] Kodžopeljić, J.: Prilog proučavanju politike preventivnog održavanja motornih vozila za potrebe opštenarodne odbrane, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1981.
- [6] Minić, S.: Istraživanje modela preventivnog održavanja prema stanju i njihova primena na motornim vozilima, magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 1988.
- [7] Minić, S.: Model preventivnog održavanja tehničkih sistema na bazi kriterijuma minimalnih troškova, OMO broj 3, Beograd, 1995.