Dr Rade Stanković,
potpukovnik, dipl. inž.
Vojnotehnička akademija VJ,
Beograd

MODEL ZA OCENU KARAKTERISTIKA SLUČAJNOG PROCESA PROMENE TEHNIČKOG STANJA ELEMENATA TRIBOMEHANIČKIH SISTEMA

UDC: 62-1.001.573:681.322.06

Rezime:

U radu je predložen model za ocenu karakteristika slučajnog procesa promene tehničkog stanja elemenata tribomehaničkih sistema u funkciji inherentnog kvaliteta i relevantnih faktora uslova eksploatacije. Opisan je programski paket kao softverska podrška modela i prikazan deo rezultata eksperimentisanja sa modelom.

Ključne reči: karakteristike slučajnog procesa, tribomehanički sistem, uslovi upotrebe, simulacija.

MODEL FOR ESTIMATING CHARACTERISTICS OF ACCIDENTAL PROCESSES OF TECHNICAL CONDITION CHANGING IN TRIBOLOGY SYSTEMS

Summary:

The model for estimating characteristics of accidental processes of technical condition changing in tribology systems is proposed in the function of built-in quality and relevant factors of service conditions. The program package as a software support of the model is described and a part of the results relating to the experiment with the model is shown.

Key words: characteristics of accidental process, tribology system, service conditions, simulation.

Formulacija problema

Tehničko stanje elemenata osnovnih sredstava za rad (mašina za proizvodnju, transportnih sredstava i sl.) ima značajan uticaj na nivo kvaliteta proizvoda i usluga. Zbog toga se ulažu veliki naponi za obezbeđenje potrebnih nivoa pokazatelja pouzdanosti tih sistema u celom životnom veku. U procesu eksploatacije problem pokušava da se reši što većom primenom preventivnog održavanja. Praktična primena brojnih modela, do sada poznatih strategija preventivnog održavanja, zahteva ispunjavanje mnogih uslova, među kojima su veoma zna-

čajne informacije o karakteristikama slučajnih procesa promene tehničkog stanja elemenata tribomehaničkih sistema: matematičkog očekivanja, disperzije i korelacione funkcije procesa, gustine raspodele parametara tehničkog stanja u izabranim trenucima vremena, gustine raspodele vremena rada do otkaza, itd. Ove informacije omogućuju, pored ostalog, i rešavanje fundamentalnih problema preventivnog održavanja — ocenu trenutnog stanja i prognozu raspoloživog resursa elemenata. Time se stvaraju realni uslovi za efikasno upravljanje procesima korišćenja (planiranja režima eksploatacije), održavanja (sprečava-

nja pojave otkaza, planiranja preventivnih aktivnosti, snabdevanja rezervnim delovima, itd.) i opravki, kao osnovnim funkcijama upravljanja stanjem tehničkih sistema.

Vrednosti strukturnih i regulacionih parametara tehničkog stanja najneposrednije su ugrožene na nivou površina elemenata tribomehaničkih sistema, odnosno najnižem nivou hijerarhijske strukture vozila. Na tom nivou generišu se i potoci otkaza, a to znači i potoci preventivnih intervencija i opravki. Zbog toga je značajno da se poznaju *karakteristike procesa promena parametara tehničkog stanja tih elemenata tribomehaničkih sistema, parova ili samostalnih elemenata*, na osnovu kojih bi se mogla ocenjivati trenutna stanja i prognozirati raspoloživi resursi, odnosno programirati upravljačke odluke.

Ocena trenutnog tehničkog stanja je proces definisanja vrednosti parametara tehničkog stanja $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ u proizvoljnom trenutku t . Ocenjivanje se obavlja radi utvrđivanja u kojoj meri se elementi tribomehaničkih sistema nalaze u radno sposobnom stanju, odnosno u kojoj fazi stanja »u radu«.

Prognoziranje je istraživački proces na osnovu čijeg se rezultata dobijaju podaci o budućem stanju prognoziranih objekata i definišu raspoloživi resursi elemenata tribomehaničkih sistema do proizvoljnog trenutka stanja »u radu«, ili moguće vreme rada do graničnog stanja.

Najpogodnije je da se ocenjivanje obavlja za svaki konkretni element. Međutim, brojni nerešeni problemi, bar za elemente transportnih sredstava, to znatno otežavaju ili onemogućuju. Osnovna ideja — da se promene tehničkog stanja elemenata transportnih sredstava u fazi eksploatacije prate pomoću odgovarajuće dijagnostičke podrške, za sada je, na žalost, ostvarljiva samo u malom broju slučajeva. Osnov-

ni razlozi su nedovoljna razvijenost dijagnostičke opreme koja omogućuje primenu savremenih metoda kao što su vibraciona, akustična i dr. i nepoznavanje probabilističkih zakona koji upravljaju promenama dijagnostičkih parametara i stohastičkih relacija između ovih parametara i verovatnoća pojave otkaza i sl. U ovom trenutku za većinu elemenata transportnih sredstava nije moguće otkrivanje oštećenja koja mogu uticati na vreme rada do graničnog stanja, odnosno nije moguća pouzdana ocena trenutnog i prognoza stanja u sledećem intervalu rada. U dogledno vreme se, realno, ne mogu očekivati značajniji pomaci u razvoju metoda i opreme, što znači da će problemi ocene i prognoze stanja elemenata i sklopova motornih vozila ostati nerešeni za duži period.

Isto tako, problemi prognoze veličine trošenja u fazama konstrukcije i eksploatacije do sada nisu rešeni. I pored brojnih i opsežnih istraživanja [1, 4, 11], nisu definisani univerzalni i za primenu jednostavni analitički modeli. U postojećim matematičkim modelima, potrebno je, pored ostalog, poznavanje mnogih neophodnih veličina — faktora trošenja, opterećenja, brzina klizanja, stanja površina i sl. (što se vidi iz izraza 1), čije je, najčešće eksperimentalno određivanje veoma složeno, povezano sa brojnim teškoćama i zahteva odgovarajuće banke podataka [4, 6, 10]. Uopšte, u teoriji prognoziranja tehničkog stanja elemenata u fazi projektovanja, opštepriznate strategije nema, jer svaki metod ima svoje prednosti i nedostatke [18].

Kao što je poznato, trošenje materijala površina mašinskih elemenata u toku eksploatacije (pojam triboloških istrošenja različitih mašinskih elemenata ne podrazumeva samo posledice neposrednog međusobnog kontakta površina u relativnom kretanju već i kontakte tih površina sa sredinom — vazduhom, agresivnim gasovima ili drugim čvrstim kontaminantima, kao i sa

fluidima u strujanju — mazivom, gorivom i sl. [12]), kao dominantan uzrok promena njihovog tehničkog stanja, izuzetno je složen proces na koji deluju vrlo različiti mehanički, fizički i hemijski činioci. Njihova se dejstva, po pravilu, međusobno superponiraju i isprepliću. Zavisno od konstruktivnih karakteristika elemenata, a posebno od njihovih specifičnih radnih uslova, menja se intenzitet i vrsta trošenja njihovih površina. Tako, pri određenim uslovima rada, određena vrsta trošenja može biti dominantna [1, 3, 4, 6, 9, 12]. U funkcionalnom smislu zavisnost između brzina trošenja (γ) i uticajnih faktora mogla bi se predstaviti u obliku relacije [8]:

$$\gamma = f(v, p, \tau_{ok}, W, W_a, \varepsilon; x, y, z, f, a, \alpha, h, s, \tau_{kp}, c, A_N; A_r, R, \rho, H_B; k) \quad (1)$$

gde je:

- v — relativna brzina,
- p — pritisak na kontaktnim površinama,
- τ_{ok} — temperatura okoline,
- W — vlažnost okoline,
- W_a — prisutnost abrazivnih čestica,
- ε — zazor,
- x, y, z — tekuće koordinate (dimenzije),
- f — koeficijent trenja,
- a — stvarna površina kontakta,
- α — temperaturna provodljivost,
- h — debljina uljnog filma,
- s — površina emitovanja toplote,
- τ_{kp} — temperatura kontaktnih površina,
- c — toplotni kapacitet,
- A_N — nominalna površina kontakta,
- A_r — visina mikroneravnina,
- ρ — ugao nagiba neravnina,
- H_B — tvrdoća,
- k — koeficijenti profesionalne kvalifikovanosti.

Proizilazi da postoje značajni problemi u procesu ocene karakteristika slučajnih procesa promene tehničkog stanja, kako u fazama projektovanja i konstrukcije, tako i u fazi eksploatacije, pre svega zbog činjenice da su za to nužne dublje predstave o procesima funkcionisanja i promene tehničkog stanja elemenata.

U ovom radu, učinjen je pokušaj traženja mogućnosti ocene navedenih karakteristika slučajnih procesa simulacijom promena parametara tehničkog stanja elemenata u funkciji ugrađenih performansi elemenata i uticajnih faktora uslova eksploatacije.

Opšta zakonitost promene tehničkog stanja elementa

Najčešće se u literaturi aproksimacija slučajnog procesa kontinualne promene tehničkog stanja elementa formuliše izrazom [14]:

$$U(t) = m_0 + \eta(t) + \varepsilon(t) \quad (2)$$

gde je:

- m_0 — početna vrednost parametra,
- $\eta(t)$ — slučajni determinisani proces,
- $\varepsilon(t)$ — fluktuacioni parametar.

Član izraza $\eta(t)$ predstavlja zakonitost promene procesa degradacije stanja. S obzirom na to da procesi imaju određenu funkcionalnu zavisnost od vremena i da je njihov slučajni karakter uslovljen slučajnim parametrima koji ne zavise od vremena, u literaturi se sreću pod nazivom determinisani slučajni [15] ili poluslučajni procesi [14].

Fluktuacija parametara $\varepsilon(t)$ uslovljena je procesima koji se sporo menjaju. I ovaj parametar može da sadrži determinisanu funkciju i stacionarnu slučajnu funkciju [15]. Zbog toga realizacija procesa promene stanja često odstupa od linearnog i može i-

mati monoton ili nemonoton karakter. Ova svojstva slučajnog procesa utiču na parametre zakona raspodele $f(t)$ i na ocenu verovatnoće bezotkaznog rada elementa $R(t)$.

Na slici 1 prikazani su primeri promene procesa degradacije stanja

Sl. 1 — Modeli otkaza za različite tipove procesa degradacije tehničkog stanja

elemenata pri različitim stepenima uticaja fluktuacije [15].

Prvi slučaj (sl. 1a) prikazuje tzv. lepezasti slučajni proces, kada funkcija raspodele vremena rada do $U(t) = U_{\max}$ nije normalna. U drugom slučaju se model degradacije opisuje Gausovim procesom sa normalnom funkcijom raspodele vremena rada do otkaza, (sl. 1b), a u trećem (sl. 1c) neprekidnim procesom Markova s monotonim realizacijama. Ovaj model može se primeniti u slučaju akumulacije oštećenja usled zamora različitih elemenata mehaničkih sistema. Na slici 1d prikazan je model promene stanja opisan neprekidnim procesom Markova sa nemonotonim realizacijama, koje bi mogle premašiti dopuštena stanja i posle određenog vremena vratiti u područje dozvoljenih stanja.

Opšti slučaj formiranja otkaza, kada na proces kontinualne promene stanja istovremeno deluje više faktora, prikazan je na slici 2 [6]. Određe-

Sl. 2 — Opšta šema formiranja otkaza

PROCESI (prema karakteristici γ)		$v(t) = \frac{dU}{dt}$	$U(t)$	Primeri
STACIONARNI	konstantni			Trošenje $U = kt$
	pseudo - stacionarni			Trošenje u promenljivim režimima
MONOTONI	rastući			Trošenje nečistih površina trenja $U = kt^n, n > 1$ $U = A(e^{kt} - 1)$
	opadajući			Trošenje u periodu razrade $U = kt^n, n < 1$ $U = A(1 - e^{-kt})$
SA EKSTREMIMA	s maksimumom			Korozija, savijanje, vitoperenje $\gamma = ate^{-bt}$
	s minimumom			Trošenje, korozija
SA ZAKAŠNJENJEM				Krti lom, oštećenje usled zamora
NAIZMENIČNI (alternativni)				Promena mehaničkih karakteristika

Sl. 3 — Matematička očekivanja i intenzitet nekih funkcija promene tehničkih stanja

no rasipanje vrednosti parametra stanja postoji već na početku upotrebe. Funkcija gustine raspodele početnih vrednosti $f(a)$ karakteriše odstupanja parametra koja su nastala u procesu proizvodnje. U procesu upotrebe parametar U se menja većom ili manjom brzinom, što zavisi od intenziteta delovanja uticajnih faktora, odnosno intenziteta degradacije stanja γ_i .

U opštem slučaju, proces promene stanja može početi sa određenim vremenom zakašnjenja T , koje je, takođe, slučajna veličina i zavisi od karaktera degradacije stanja. To je vreme akumulacije oštećenja čije se manifestacije ne uočavaju, kao što je slučaj zamora materijala. I $U_{\max}$ u mnogim slučajevima nije determinisana već slučajna veličina.

Očito je da se zakonitost promene mora utvrditi za svaki tip elementa, uz uzimanje u obzir svih relevantnih faktora, kao što su karakteristike materijala, tehnologija obrade, radni procesi, uslovi upotrebe, itd. Na slici 3 data su matematička očekivanja nekih funkcija promene stanja prema karakteristikama promene intenziteta degradacije stanja [6].

Model

Tehničko stanje elemenata tribomehaničkog sistema u svakom trenutku t opisano je varijablama u_i koje su elementi prostora stanja $U(t) = \{u_1(t), u_2(t), \dots, u_i(t), \dots, u_k(t)\}$. Delovanjem uticajnih faktora $q_1, q_2 \dots$ (opterećenje, temperatura, brzina...) iz oblasti definicija $R(q_1), R(q_2) \dots$ (vrednosti uticajnih faktora između minimalnih i maksimalnih veličina) u procesu upotrebe, u trenutku t , tehničko stanje $(u_1, u_2, \dots, u_n) \in U_1$ menja se u stanje $(u'_1, u'_2, \dots, u'_n) \in U_2$, posle vremena rada Δt . Veličina promene zavisi od ug-

rađene otpornosti r i veličine opterećenja q :

$$\Delta u = \delta(r, q) \quad (3)$$

gde je:

δ — funkcija prelaza kojom se definiše transformacija stanja elemenata tribomehaničkog sistema iz prethodnog u sledeće stanje za jedan ciklus rada. Ona karakteriše nivo rezistencije elemenata i uslove opterećenja. Prirast oštećenja na malom intervalu vremena Δt zavisi od stepena oštećenja u prethodnom periodu rada, odnosno u posmatranom trenutku t i od opterećenja koje deluje na tom intervalu,

r — nivo rezistencije elemenata tribomehaničkog sistema, definisan je inherentnim kvalitetom. Predstavlja rezervu čvrstoće elemenata posle vremena rada t , gde se pod čvrstoćom u širem smislu podrazumeva otpornost na zamor, trošenje, koroziju, itd.,

q — opterećenja, pod kojima se podrazumevaju sva delovanja koja se javljaju kao rezultanta unutrašnjih i spoljašnjih uticaja u procesu upotrebe (delovanje sila, toplote, vibracija, parametara sredine, tehnoloških procesa, itd.). Na primer, za elemente motora SUS varijabla q zavisi od opterećenja (P), intenziteta promene opterećenja (W_p), ugaone brzine (w) i ubrzanja kolenastog vratila (j), temperature (T_v) i intenziteta promene (W_v), tečnosti za hlađenje, temperature (T_u) i intenziteta promene (W_u) ulja za podmazivanje motora [13]:

$$q = f(P, W_p, w, j, T_v, W_{T_v}, T_u, W_{T_u}) \quad (4)$$

Posle svakog delovanja opterećenja q , za vreme Δt vrši se slaganje trajektorija oštećenja koje slede jedna iza druge. Na taj način se delova-

njem trajektorija opterećenja q_i , kao ulaznih varijabli, menjaju trajektorije stanja u_i i trajektorije izlaznih varijabli y_i .

Sve promenljive tehničkog stanja imaju svoje dozvoljene oblasti definicije $R(u_1), R(u_2), \dots, R(u_n)$ koje su elementi prostora dozvoljenih stanja U . Kada trajektorije relevantnih parametara stanja $u_i(t)$ preseku graničnu površinu U_d , prostora dopuštenih stanja U , nastaje otkaz.

Interakcije opterećenja, akumuliranog istrošenja, intenziteta trošenja i određenih parametara uzrokuju različite realizacije procesa gubitka radne sposobnosti tribomehaničkih sistema. U tom smislu mogu se izdvojiti tri karakteristična slučaja procesa gubitka radne sposobnosti tarućeg para [16]:

- bez posledica,
- s posledicama prvog reda,
- s posledicama drugog reda.

Proces degradacije stanja tribomehaničkog sistema *bez posledica* je proces sa nezavisnim priraštajem $U(\Delta t) = U(t + \Delta t) - U(t)$, brzina trošenja $\gamma = du/dt$ je stacionarni proces i korelaciona funkcija $K_u(t_1, t_2)$ zavisi samo od razlike $(t_2 - t_1)$. Funkcija prelaza δ zavisi samo od veličine opterećenja q :

$$\delta(t) = f[q(t)] \quad (5)$$

Izlazni parametri $y(t)$ zavise od opterećenja, istrošenja i vremena:

$$y(t) = g[q(t), U(t), t] \quad (6)$$

Neophodno je primetiti da proces gubitka radne sposobnosti u periodu razrade i katastrofalnog razaranja površinskih slojeva ne može biti opisan pomoću izraza (5), zato što intenzitet trošenja u tom periodu zavisi i od veličine akumuliranog istrošenja tarućih površina.

U slučaju procesa gubitka radne sposobnosti tribomehaničkog sistema *s posledicama prvog reda* intenzitet

trošenja zavisi od delovanja opterećenja q i veličine akumulirane istrošenosti $U(t)$ do razmatranog momenta t :

$$\begin{aligned} \delta &= I(t) = f[q(t), U(t), t] \\ y(t) &= g[q(t), U(t), t] \end{aligned} \quad (7)$$

Variranje intenziteta trošenja u vremenu pri konstantnom opterećenju može nastati usled:

— razlike fizičko-mehaničkih svojstava materijala po dubini površinskog sloja delova tribološkog sistema, uslovljenih tehnologijom izrade i promenama karakteristika ovih površina u procesu rada;

— starenja ulja za podmazivanje i pogoršanja njegovih mazivih svojstava, izmene toplotnog režima rada spregnutih delova, a u nekim slučajevima i promena oblika trošenja površina;

— povećanje koncentracije abrazivnih čestica i produkata trošenja u ulju tokom upotrebe.

Ukoliko se karakter opterećenja q^* menja i zbog akumuliranog istrošenja površina delova tribološkog sistema, odnosno zbog povećanja zazora, transformacije makrogeometrije površina trenja i sl., izraz (7) se može prikazati u obliku:

$$\begin{aligned} \delta &= f[q^*(t), U(t), t] \\ y(t) &= g[q^*(t), U(t), t] \end{aligned} \quad (8)$$

gde je:

$$q^*(t) = \varphi[q(t), U(t), t].$$

Proces gubitka radne sposobnosti tribomehaničkog sistema *s posledicama drugog reda* karakteriše se promenama opterećenja u obliku posebnog prelaznog perioda sa trošenjem tarućih površina. U prelaznom periodu $[t_0, t_1]$ intenzitet trošenja razlikuje se od vrednosti koju je imao sa prethodnim nivoom opterećenja Q_{i-1} i od vrednosti koja odgovara novom nivou opterećenja q_i :

$$\delta = \begin{cases} f(q_i, q_{i-1}, \dots, q_{i-n}, t), & t_0 \leq t \leq t \\ f(q_i, t), & t > t_1 \end{cases} \quad (9)$$

Pojava prelaznih perioda može se objasniti sledećim uzrocima:

— »eksploatacionim nasleđem« materijala koji se deformisao u procesu trenja površina delova;

— promenom dijagrama specifičnih pritisaka u zoni kontakta delova pri prelazu s jednog nivoa opterećenja na drugi i, povezano s tim, »drugoj razradi« tarućih površina;

— postepenim obnavljanjem analogije između veličina opterećenja i raspodele maziva na tarućim površinama.

Ocena slučajnih funkcija promene tehničkog stanja obavlja se njihovim nepotpunim karakteristikama: matematičkim očekivanjem $M_u(t)$, disperzijom $D_u(t)$ i korelacionom funkcijom $K_u(t_1, t_2)$.

$$M_u(t) = M[U(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} u f(u, t) du \quad (10)$$

$$D_u(t) = M[u(t) - M_u(t)]^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [u(t) - M_u(t)]^2 f(u, t) du \quad (11)$$

$$K_u(t_1, t_2) = \{[u(t_1) - M_u(t_1)] \cdot [u(t_2) - M_u(t_2)]\} \quad (12)$$

gde je:

$f(u, t_1) = f[u(t)]$ — jednodimenzionalni zakon raspodele za fiksiranu vrednost argumenata t , kako je prikazano na slici 2.

Transportna sredstva u svom eksploatacijskom veku rade u određenim periodima vremena u bitno različitim uslovima α_i , što se može izraziti na sledeći način:

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n = \sum_{i=1}^n \alpha_i (\%) \quad (13)$$

S obzirom na to da vrednosti faktora uslova upotrebe bitno utiču na karakteristike funkcije prelaza, traje-

ktorije stanja elemenata zavisice od dužine intervala rada vozila u uslovima α_i .

Raspodela ukupnog resursa U »utrošenog« u intervalima sa različitim uslovima rada, može se prikazati na sledeći način:

$$\frac{\alpha_1 U_g}{100} + \frac{\alpha_2 U_g}{100} + \dots + \frac{\alpha_n U_g}{100} = U_g \quad (14)$$

Zamenom resursa U_g ukupnim vremenom rada ili brojem aktiviranja sistema dobija se:

$$\frac{\alpha_1 t_s}{100} + \frac{\alpha_2 t_s}{100} + \dots + \frac{\alpha_n t_s}{100} = t_u \quad (15)$$

gde je:

t_u — ukupno vreme rada (ukupan pređeni put) do otkaza.

Iz izraza (13 — 15) proizilazi da se matematičko očekivanje graničnog istrošenja može izračunati pomoću izraza:

$$U_g = U_0 + \gamma_1 t_1 + \gamma_2 t_2 + \dots + \gamma_n t_n = U_0 + \sum_{i=1}^n \gamma_i t_i \quad (16)$$

gde je:

γ_i — matematička očekivanja intenziteta trošenja u i -tim uslovima,

t_i — vreme rada u i -tim uslovima.

Trajektorija stanja može, prema izrazu (16), menjati trend rasta u širim granicama, što može da rezultira velikim razlikama u vremenu rada elemenata do otkaza.

Iz navedenih razmatranja proizilazi da se proces realizacije modela sastoji od sledećih koraka:

1. Definisanje karakteristika procesa gubitka radne sposobnosti (bez posledica, sa posledicama prvog reda, sa posledicama drugog reda). Određivanje

funkcije prelaza stanja za definisane oblasti promena relevantnih faktora uslova upotrebe modeliranjem procesa, eksperimentisanjem na specijalnim uređajima, istraživanjima u realnim uslovima upotrebe i sl. Nužni preduslovi za pouzdano definisanje funkcije prelaza stanja jesu poznavanje relevantnih faktora opterećenja i zakonitosti njihove promene. Zbog toga se najpre mora izvršiti:

— istraživanje uslova upotrebe i definisanje relevantnih faktora opterećenja tribomehaničkog sistema ili sprega koji se razmatraju;

— istraživanje spektara promene faktora uslova upotrebe, određivanje zakona njihove promene korišćenjem najpogodnije od poznatih metoda za diskretizaciju slučajnih procesa promene opterećenja (kao što su metoda jednakih vremenskih intervala, maksimuma, ekstremuma, raspona, punih ciklusa, itd.) i njihovo prikazivanje na pogodan način, kao što su tabele ili funkcije raspodele parametara opterećenja $f(q)$.

2. Definisanje granične vrednosti stanja tribomehaničkog sistema.

3. Simulacija realizacije trajektorija stanja korišćenjem funkcije prelaza i rezultata istraživanja opterećenja u realnim uslovima.

4. Analiza slučajnih procesa što, najčešće, podrazumeva:

— izbor tipa slučajnog procesa:

— ispitivanje mogućnosti opisivanja poluslučajnim procesom tipa $u(t) = u_0 + \gamma \cdot t$, $u(t) = u_0 e^{\gamma t}$ i sl.;

— određivanje karakteristika slučajnih procesa $M[U(t)]$ i $K(t_1, t_2)$;

— ispitivanje stacionarnosti i ergodičnosti slučajnih procesa;

— određivanje karakteristika jednodimenzionalnih zakona raspodele $f(U, t_i)$ za fiksirane vrednosti argumenta t_i i vremena rada do graničnog stanja $f(t, U_g)$.

Paket programa

Radi realizacije eksperimenata s opisanim modelom urađeni su računski programi koji omogućuju istraživanja slučajnih procesa promene stanja u funkciji ugrađene rezistencije, relevantnih parametara uslova upotrebe i vremena rada.

Posle unošenja ulaznih varijabli, odnosno osnovnih karakteristika funkcija raspodele relevantnih faktora uslova upotrebe, $f(q_1), f(q_2), \dots, f(q_n)$ na slučajan način biraju se vrednosti parametara $q_1, q_2, \dots, q_n$ i računaju vrednosti funkcije prelaza $\delta_i = f(q_1, q_2, \dots, q_n)$, odnosno vrednosti tehničkog stanja posle slaganja i -te trajektorije prelaza stanja.

Dobijeni podaci omogućuju detaljnu analizu procesa promene stanja za različite uslove rada i određivanje karakteristika kao što su $f(\delta), f(u, t), f(t, U_g), K_u(t_1, t_2)$, itd., nužnih za razumevanje statističke prirode procesa degradacije stanja, ocenu uticaja pojedinih faktora, itd. Posle svakog ciklusa od N realizacija δ_i , računaju se srednje vrednosti parametara stanja $\bar{x}_i(t)$ i standardna odstupanja $\bar{s}_i(t)$. Time je omogućena analiza osnovnih karakteristika slučajnih procesa promene stanja sa relativno malim uzorcima posle svake realizacije funkcije prelaza i bitno skraćanje vremena simulacije procesa do graničnog stanja elemenata.

U sledećem koraku proračunava se korelaciona funkcija $K_i(t_1, t_2)$ za izabrane argumente t_1, t_2 :

$$K(t_1, t_2) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [u_i(t_1) - m_u(t_1)] [u_i(t_2) - m_u(t_2)],$$

a zatim se vrši izbor tipa slučajnog procesa na osnovu realizacija trajektorija do izabranog trenutka. Tip funkcije prilagođava se stvarnoj varijaciji dobijenih slučajnih procesa metodom najmanjih kvadrata. Nepoznati

parametri funkcija regresije određuju se iz i uslova $\sum_i (U_i - U_i^*)^2 \rightarrow \min$, gde je $U_i^* = f(a, a_1, \dots, a_n)$ aproksimacija vrednosti iz uzorka teoretskom funkcijom. U slučaju linearne funkcije tipa $u(t) = u_0 + \gamma \cdot t$ koja se često može koristiti za rešavanje razmatranih problema, koeficijenti u_0 i γ određuju se iz uslova $\sum_i (u_i - u_0 - \gamma \cdot t_i)^2 \rightarrow \min$, odnosno izraza:

$$u_0 = \frac{\sum t_i \cdot \sum u_i^2 - \sum u_i \cdot t_i \cdot \sum u_i}{N \cdot \sum u_i^2 - (\sum u_i)^2},$$

$$\gamma = \frac{\sum u_i t_i - \sum u_i \sum t_i}{N \sum u_i^2 - (\sum u_i)^2}$$

Koeficijent korelacije r , kao mera jačine linearne veze između promenljivih i standardna greška regresije S , kao mera rasturanja eksperimentalnih podataka oko regresione linije, računaju se prema izrazima:

$$r = \pm \frac{\sum (u_i - \bar{x})(t_i - \bar{x}_t)}{\sqrt{\sum (u_i - \bar{x}_u)^2 \sum (t_i - \bar{x}_t)^2}},$$

$$S_u = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (u_i - u_r)^2}$$

Program omogućuje regresionu analizu podataka samo u slučaju linearne veze, odnosno funkcije regresije tipa $u(t) = u_0 + \gamma \cdot t$. Veliki broj funkcija drugog tipa može se svesti na linearnu formu tipa $u(t) = u_0' + \gamma' \cdot t$ gde je $u_0' = \log u_0, \gamma' = \log \gamma$. U slučajevima kada linearna veza ne vredi, tip funkcije regresije može se odrediti korišćenjem specijalnih paketa programa, koji omogućuju i nelinearnu regresionu analizu. Takvi programi arhiviraju potrebne podatke u posebnim datotekama. Regresiona analiza obavlja se posle svakog ciklusa koje karakterišu uslovi rada $R(q_i)$.

S obzirom na to da je funkcija raspodele vremena rada do graničnog stanja $f(t, U_g)$ za elemente triboloških sistema najčešće Gausova [4, 14], pomoću matematičkog očekivanja $M(t)$ i

disperzije $D(t)$ slučajnog procesa mogu se odrediti i karakteristike normalne raspodele proračunom vremena rada sistema do presecanja ovih funkcija površine graničnog stanja U . U tom smislu treba najpre odrediti funkcije regresije matematičkog očekivanja $M(t)$ i disperzije $D(t)$:

$$M_u(t) = M(t, a_1, \dots, a_n),$$

$$D_u(t) = D_u(t, a_1, \dots, a_n),$$

a zatim vremena u kojima ove funkcije presecaju površinu prostora graničnog stanja U_g iz jednačina $M(t) = U_g$ i $D(t) = U_g$.

Ovakva ekstrapolacija moguća je samo u slučajevima u kojima se oblasti definicije ulaznih promenljivih parametara uslova rada $R(q_1), R(q_2) \dots$ ne menjaju, odnosno u slučajevima stacionarnih serija kod kojih se dinamičke karakteristike ne menjaju u vremenu. Ovakvi slučajevi su u praksi mogući kada se vozila koriste u približno jednakim uslovima.

Česti su slučajevi korišćenja vozila u mešovitim uslovima sa kraćim ili dužim intervalima koji se karakterišu različitim oblastima definicije ulaznih parametara. Zbog toga računski program omogućuje eksperimentisanje sa modelom u kojem se menjaju intervali korišćenja vozila u različitim uslovima.

Primeri

Osnovni ograničavajući faktor primene razmatranog modela jeste nepoznavanje funkcije prelaza (intenziteta trošenja) u funkciji relevantnih faktora — ugrađenog kvaliteta i uslova rada. U literaturi [13, 16, 17] je pokazano da se ovaj problem može rešiti istraživanjima u laboratorijskim i eksploatacionim uslovima. Na primer, u [13] su prikazani modeli intenziteta trošenja elemenata tribomehaničkog sistema: ležaj — rukavac radilice, klip-

ni prstenovi — cilindar, a u [16, 17] elemenata tribomehaničkog sistema obloga kočione papuče — doboš i disk kočnice — pločice. U ovom radu se, kao primer, koristi funkcija prelaza tribomehaničkog sistema obloge papu-

Kao što se vidi, osnovni eksploatacioni uticajni faktori za dati ugrađeni kvalitet obloga jesu brzine vozila na početku (v_1) i na kraju kočenja (v_2), masa vozila (m) i temperatura elemenata tribomehaničkog sistema (τ).

Sl. 4 — Tribomehanički model:

OM — osnovni materijal, PS — površinski sloj, O_1 — istrošenost obloga, O_2 — pad koeficijenta trenja i rada kočenja, O_3 — oštećenje doboša, O_4 — zamašćenost obloga, O_5 — veliki zazor između tarućeg para, E_1 — obloga papuče, E_2 — doboš, p — srednji pritisak, v — brzina klizanja, τ — temperatura tarućih površina, A_k — rad kočenja

ča — doboš, koja je dobijena na osnovu rezultata istraživanja u [16, 17]. Ovaj tribomehanički model prikazan je na slici 4, a njegov strukturni model na slici 5.

$$\gamma = f(v_1, v_2, m, \tau) = 1,1372 \cdot 10^{-9} v_1^{-0,00555} v_2^{0,000229} m^{-0,00189}$$

$(-29,16 + 6,675v_1 - 2,963v_2 + 5,122m)^{2,63}$
Deo rezultata eksperimentisanja sa opisanim modelom prikazan je na slikama 6 do 8.

Na slici 6 prikazan je deo rezultata istraživanja uticaja varijacionog intervala faktora uslova rada na karakteristike procesa promene tehni-

čkog stanja elemenata tribomehaničkog sistema. Domene ulaznih varijabli $R(v_1)$, $R(v_2)$ i $R(m)$ definisane su zakonom Vejbulove raspodele. U prvom

Sl. 5 — Strukturalni model

Sl. 6 — Karakteristike procesa promene tehničkog stanja za teške i lake uslove upotrebe

slučaju razmatran je uticaj maksimalnog rasipanja relevantnih faktora, ($v=1,0$; $\beta_{v1}=1,0$; $\Theta_{v1}=12\text{ms}^{-1}$; $\beta_{v2}=1,0$; $\Theta_{v2}=3,5\text{ms}^{-1}$; $\beta_m=1,0$; $\Theta_m=8t$), a u drugom vrlo malog varijacionog intervala uticajnih faktora: $v=0,27$; $\beta_{v1}=4,18$; $\Theta_{v1}=13,19\text{ms}^{-1}$; $\beta_{v2}=4,18$; $\Theta_{v2}=3,85\text{ms}^{-1}$; $\beta_m=4,18$; $\Theta_m=8,79t$.

Kao što se vidi, slučajni proces promene tehničkog stanja može se opisati funkcijom tipa $u(t)=u_0+\gamma \cdot t$ u oba slučaja: ($M[U(t)]=0,002+3,3232 \cdot 10^{-4}t, \text{mm}$ u prvom i, $M[U(t)]=1,15384 \cdot 10^{-4}t, \text{mm}$ u drugom slučaju). Varijacioni interval relevantnih uticajnih faktora ima vrlo veliki uticaj na vek trajanja razmatranih elemenata, kao i na stepen rasipanja parametara stanja u trenucima t . U prikazanom primeru, matematičko očekivanje vremena ra-

todom ekstrapolacije ili metodom imitacionog modeliranja.

Drugi eksperiment realizovan je sa sledećom pretpostavkom: grupa vozila radi naizmenično u intervalima vremena koje karakterišu bitno različiti uslovi upotrebe, odnosno bitno različiti varijacioni intervali relevantnih uticajnih faktora. Rezultati su prikazani na slici 7. Kao što se vidi, matematičko očekivanje celog procesa ne može se opisati linearnom funkcijom tipa $u(t)=u_0+\gamma \cdot t$, jer se znatno razlikuju parametri funkcija u procesu stanja $f(U, t_i)$, a karakteristike funkcije raspodele vremena rada do otkaza $f(t, U_g)$ zavise od broja, trajanja i karakteristika intervala. U ovom slučaju prognoza vremena rada do otkaza je mnogo složenija.

Sl. 7 — Karakteristike procesa promene tehničkog stanja za kombinovane uslove rada sa velikim intervalima u istim uslovima

da do graničnog stanja za $v=1,0$ je duplo manje u odnosu na slučaj minimalnog varijacionog intervala uticajnih faktora ($v=0,27$). Prognoza stanja elemenata istog tipa, koji rade u istim uslovima, uspešno se može izvršiti me-

Treći eksperiment realizovan je sa pretpostavkama da vozila rade u mešovitim uslovima sa vrlo kratkim intervalima koji se izmenjuju na slučajan način do graničnog stanja elemenata tribomehaničkog sistema. Deo

rezultata prikazan je na slici 8. Pored ostalog, uočavaju se relativno velika standardna odstupanja funkcija $f(U, t_i)$ i $f(t, U_g)$. To uzrokuje znatne teškoće

pri prognozi tehničkog stanja, izboru intervala za periodičnu preventivnu zamenu elemenata, periodičnosti kontrole tehničkog stanja i sl.

Sl. 8 — Karakteristike procesa promene tehničkog stanja za kombinovane uslove rada sa malim intervalima u istim uslovima

Zaključak

Prezentirani model jedan je od mogućih pristupa za ocenu karakteristika slučajnog procesa promene tehničkog stanja elemenata tribomehaničkih sistema u funkciji relevantnih parametara inherentne pouzdanosti i uslova upotrebe. Pod uslovom da su is-

punjeni osnovni zahtevi (eksperimentalno određivanje funkcije prelaza, istraživanje karakteristika uslova rada vozila i sl.), model omogućuje definisanje svih karakteristika slučajnog procesa, što pruža realnu osnovu za upravljanje tehničkim stanjem elemenata u procesu eksploatacije.

Literatura:

- [1] Garkunov, D. N.: Tribotekhnika, Mašinstroenie, Moskva, 1989.
- [2] Alekseev, N. M. i drugi: Spravočnik po tribotekhnike, Mašinstroenie, Moskva, 1989.
- [3] Tanasijević, S.: Osnovi tribologije mašinskih elemenata, Naučna knjiga, Beograd, 1989.
- [4] Krageljski, S.: Osnovi rasčeta na trenje i iznos, Mašinstroenie, Moskva, 1977.
- [5] Miltenović, V.: Prilog razvoju metoda prognoziranja pouzdanosti mašinskih sistema, disertacija, Mašinski fakultet, Niš, 1982.
- [6] Pronikov, A. S.: Nadežnost mašina, Mašinstroenie, Moskva, 1978.
- [7] Rac, A.: Prognoziranje veličine habanja, Tribologija u industriji, br. 4, 1987.
- [8] Tanasijević, S.: Tribologija u konstruisanju, Tribologija u industriji, br. 1, 1990.
- [9] Callacott, R. A.: Mechanical fault diagnosis and Condition monitoring, Chapman and Hall, London, 1997.
- [10] Rac, A.: Uzroci i manifestacije oštećenja kliznih ležišta motora SUS, Zbornik radova Motori i motorna vozila, Kragujevac, 1983.
- [11] Jeremić, B.: Osvrt na tribološka istraživanja u SAD, Tribologija u industriji, br. 4, 1988.
- [12] Verčon, J.: Vrste trošenja i oštećenja površina mašinskih elemenata i dejstvo maziva na njihovo smanjenje, Goriva i maziva 19(5-6)80.
- [13] Kanarčuk, V. E.: Dugovečnost i iznos dvigatelja pri dinamičkim režimima rabota, Naukova dumka, Kiev, 1978.
- [14] Družinin, G. V.: Nadežnost avtomatizirovanih proizvodstvenih sistem, Energoatomizdat, Moskva, 1986.
- [15] Belčić, B. I. i dr.: Nadežnost i efektivnost v tehniku, tom pet, Mašinstroenie, Moskva, 1988.
- [16] Todorović, J.: Istraživanje osnovnih karakteristika pouzdanosti frikcionih obloga kočnica u uslovima eksploatacije teških motornih vozila u našoj zemlji, disertacija, Beograd, 1972.
- [17] Todorović, J.: Kočenje motornih vozila, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1988.
- [18] Lukinski, V. S. i dr.: Dugovečnost detalei šasiji avtomobila, Mašinstroenie, Lenjingrad, 1984.