

# Triboelementu ar nodilumizturīgiem pārklājumiem kvalitātes novērtēšana un drošuma prognozēšana

Margarita Urbaha, Riga Technical University

**Kopsavilkums.** Darbā ir piedāvāti dažādi atsevišķi triboelementu ar nodilumizturīgiem pārklājumiem kvalitātes novērtēšanas un drošuma prognozēšanas uzdevuma risinājumi. Atteices pakāpeniskā nodiluma rezultātā veidošanās modeļi ļauj veikt triboelementa ar vien- un daudzslāņu jonu-plazmas pārklājumu drošuma novērtēšanu. Piedāvātie modeļi ir konstruēti ievērojot paša pārklājuma un triboelementa pamatmateriāla kvalitātes nehomogenitāti. Mainīgie ir arī pārklājuma biežums un dilšanas ātrums.

**Atslēgas vārdi:** nodilumizturīgie pārklājumi, triboelementi, pārklājumu kvalitātes novērtēšana, pārklājumu drošuma prognozēšana.

## IEVADS

Dīzeļmotoru un gāzturbīnu spēka iekārtu, kā arī dažādu funkcionālo uzdevumu hidrospeka iekārtu drošums lielā mērā ir atkarīgs no berzes pāru (triboelementu), kuri veic automātisko regulēšanas ierīču jutīgo elementu, sūkņu izspiešanas elementu, sekojošo hidropievadu sadales elementu un citu atbildīgu mezglu funkcijas, bezatteices darba.

Jēdziens drošums nozīmē objekta īpašības saglabāt laikā visu parametru, kuri raksturo spēju veikt nepieciešamās funkcijas dotajos režimos un pielietošanas apstākļos, tehniskās apkāpes, uzglabāšanas un transportēšanas laikā, vērības noteiktajās robežās [1,2,3]. Viena veida izstrādājumu darbības traucējumus pieskaita nejaušam notikumam – atteicei. Lielākā daļa spēka iekārtu atteicu, ieskaitot hidroagregātu iziešanu no ierindas, notiek dēļ regulējošo un sadales iekārtu, kā arī plunžeru, virzuļu, plāksņu pāru sūkņu un hidromotoru bojājumu dēļ. Visas precīzijas pāru detaļu atteices un sagrūšanas notiek pēc viena no ekspluatācijas rādītājiem (nodiluma, korozijas u.c.), un parasti sākas no detaļas virsmas. Visas detaļu ekspluatācijas īpatnības un to rādītāji ir cieši saistīti ar virsmas slāņu geometriskiem un fizikāli mehāniskajiem raksturojumiem [4].

## I. LĒMUMU PIENĒMŠANAS TEORIJA, NOVĒRTĒJOT TRIBOELEMENTU AR NODILUMIZTURĪGIEM PĀRKLĀJUMIEM KVALITĀTI

Lēmumu par triboelementa ar nodilumizturīgu pārklājumu derīgumu tālākajai ekspluatācijai var pieņemt, piemēram, uz informatīvo parametru, kurus reģistrē, kontrolējot detaļu ar vienu no nesagraujošās kontroles metožu (ultraskaņas vai akustiskās emisijas (AE)) palīdzību, analīzes pamata[5,6].

Pie tam jāatzīmē, ka lēmuma pieņemšanas process par triboelementu pārklājumu kvalitāti nav vienkārša darbība, kas aprobežojas ar dažādu diagnosticēšanas parametru salīdzināšanu. Bez zināšanām par materiāla strukturālo izmaiņu fiziku un defektu rašanās avotiem, to izplatīšanas

mehāniku, ir nepieciešams pilnībā izmantot matemātiskās statistikas un varbūtības teorijas likumus.

Kontroles uzdevumu risināšanas informatīvo parametru vērtību nosaka to atšķirības pakāpe bezdefektu (etalona) un defektīvajā izstrādājumā. Slēdziens par triboelementu pārklājuma kvalitāti ir ticamāks, ja ir lielāka etalona un defektīvā izstrādājuma informatīvo parametru signālu vērtību atšķirība. Dēļ kontroles objektu fizikālo raksturojumu (materiāla struktūras, defektu rakstura, to orientācijas utt.) statistiskās izkliedes, kā arī aparatūras paštrokšņiem ražošanas apstākļos, kuros notiek kontrole, ir iespējamas nejaušas parametra signāla izmaiņas, kuras nav saistītas ar defekta esamību. Tādēļ defektu atrašanās uzdevumam, tas ir, dažādu signālu, kuri tiek reģistrēti kontroles procesā un etalona parauga signālā, parametru atšķirības nozīmīguma noteikšanai ir varbūtības raksturs. Lēmumu pieņemšanas statistikas teorija ļauj izvēlēties optimālo stratēģiju, interpretējot diagnostiskās kontroles rezultātus [7].

Izstrādājumu AE kontroles gadījumā aparatūra reģistrē dažas signālu  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  informatīvā parametra vērtības. Apzīmēsim ar  $X$  vektora  $x$  iespējamo komponentu vērtību kopumu. Kopā  $X$  var noteikt funkcijas  $W(x/H_0)$  un  $W(x/H_1)$ , kas apraksta attiecīgi kontrolējamās partijas bezdefektu un defektīvo izstrādājumu vērtības  $x$  sadalījuma nosacītās varbūtības (vai varbūtību biežumu). Šie likumi tiek noteikti teorētiski vai eksperimentāli, kontrolējot divas pietiekami lielas izstrādājumu partijas, katra no kurām sastāv no attiecīgi bezdefektu un defektīviem izstrādājumiem. Uz kontroles procesā reģistrētā kopuma  $x$  pamata var pieņemt divas hipotēzes:

- 1) hipotēze  $H_0$  – kopums  $x$  ir iegūts no izlases, kura atbilst sadales likumam  $W(x/H_0)$ , un attiecīgi, kontrolējamajam izstrādājumam nepiemīt defekti;
- 2) hipotēze  $H_1$  – kopums  $x$  ir iegūts no izlases, kura atbilst sadales likumam  $W(x/H_1)$ , un kontrolējamajam izstrādājumam piemīt defekti.

Atbilstoši defektu atklāšanas uzdevumam, kopa  $X$  jāsadala apakškopās  $X_0$  un  $X_1$ . Izstrādājums tiek bloķēts, ja  $x$  nokļūst apgalā  $X_1$ , un tiek atzīts par derīgu, ja  $x$  pieder  $X_0$ . Tādējādi, lēmuma pieņemšanas kārtula par kontrolējamā objekta kvalitāti (brāķēšanas kārtula) izpaužas kā robežas noteikšana starp kopām  $X_0$  un  $X_1$ . Kopas  $X$  sadalīšana kopās  $X_0$  un  $X_1$  tiek veikta saskaņā ar dažādām lēmumu pieņemšanas kārtulām (kritērijiem). Viena vai cita kritērija izmantošanu nosaka apriorās informācijas esamība par kontrolējamiem izstrādājumiem.

Vispārējā gadījumā bloķēšanas kārtulu izteiksim kā attiecību:

$$\lambda(x) = W(x | H_1) / W(x | H_0) \underset{H_1}{\overset{H_0}{>}} \lambda_0, \quad (1)$$

kur  $\lambda(x)$  – universāls raksturlielums, kas apraksta defekta esamības varbūtību un kuru sauc par ticamības attiecību;  $\lambda_0$  – tā kritiskā vērtība, kuru nosaka izmantojamais lēmuma pieņemšanas kritērijs. Ticamības attiecība satur visu pieejamo informāciju par defekta klātbūtni, kura parādās diagnostisko mērījumu rezultātā.

Zinot  $\lambda(x)$ , var atrast defekta klātbūtnes vai neesamības varbūtību. Pie  $\lambda(x) > \lambda_0$  tiek pieņemts lēmums (hipotēze)  $H_1$  par izstrādājuma brāķēšanu, pie  $\lambda(x) < \lambda_0$  – hipotēze  $H_0$  par tā derīgumu.

Lemjot par izstrādājuma defektivitāti, ir iespējamas divu veidu kļūdas. Pirmā veida kļūda (pārbrāķēšana) – derīga izstrādājuma brāķēšana, tas ir, hipotēzes  $H_1$  pieņemšana, kad pareiza ir hipotēze  $H_0$ . Otrā veida kļūda (neizbrāķēšana) – tiek atzīti par derīgiem izstrādājumi, kuriem ir nepieļaujams defekts, tas ir, hipotēzes  $H_0$  pieņemšana, kad pareiza ir hipotēze  $H_1$ .

Pirmā ( $P_p$ ) un otrā ( $P_n$ ) veida kļūdu varbūtība ir viens no pamatrādītājiem, kas raksturo nesagraujošās kontroles ticamību un, attiecīgi, izmantojamās kontroles metodes efektivitāti. Kļūdu varbūtības vērtības tiek noteiktas pēc formulām:

$$P_p = \int_{x_1}^{\infty} W(x | H_0) dx; \quad P_n = \int_{-\infty}^{x_0} W(x | H_1) dx. \quad (2)$$

Lai izvairītos no grūtībām, kuras ir saistītas ar vairākkārtīgu integrāļu aprēķināšanu formulās (2), izmantosim to, ka ticamības attiecība  $\lambda(x)$ , kas ir atkarīga no gadījuma argumenta  $x$ , ir gadījuma vērtība, kuras sadalījuma likumu nosaka sadalījuma likums  $x$ . Tā kā pēdējās sadalījuma likums ir atkarīgs no pieņemtās hipotēzes, var noteikt divas funkcijas.

$W(\lambda(x) | H_0)$  un  $W(\lambda(x) | H_1)$  – sadalījuma varbūtības  $\lambda(x)$  nosacītais blīvums attiecīgi hipotēzes  $H_0$  vai  $H_1$  pareizības gadījumā. Tādejādi, pāriesim no  $n$ -dimensiju sadalījumiem  $x$  uz viendimensijas sadalījumu  $\lambda(x)$ . Pārklājumu defektu noteikšanas uzdevums risina jautājumu, kuram no diviem pieminētajiem sadalījuma likumiem atbilst ticamības attiecība, kura ir aprēķināta pēc izmēģinājumu rezultātiem, pie tam kontroles kļūdu varbūtību aprēķina pēc formulām:

$$P_p = \int_{\lambda_0}^{\infty} W(\lambda(x) | H_0) d\lambda; \quad P_n = \int_{-\infty}^{\lambda_0} W(\lambda(x) | H_1) d\lambda. \quad (3)$$

Apskatīsim, pēc mūsu domām, vispiemērotākā lēmuma pieņemšanas kritērija izmantošanas nosacījumus, kā arī sliekšņa vērtību, kuras atbilst šim kritērijam, aprēķināšanas metodiku.

Neimaņa – Pīrsona kritērijs tiek izmantots, ja trūkst dati par defektu esamības apriorām varbūtībām kontrolējamās

izstrādājumos, kā arī zaudējumu izmaksās nepareizo lēmumu gadījumā. Saskaņā ar šo kritēriju tiek izvēlētas tādas brāķēšanas kārtulas, kuras nodrošina minimālu otrā veida kļūdu  $P_n$  (neizbrāķēšana) varbūtības iespēju pie nosacījuma, ka pirmā veida kļūdas  $P_p$  (pārbrāķēšanas) varbūtība nepārsniedz noteikto vērtību  $P_p^*$ . Citiem vārdiem sakot, ar noteikto varbūtību tiek pieļauta «viltus trauksme» veida kļūda, tas ir, iespējama bezdefektu izstrādājuma brāķēšana.

Sliekšņa vērtība  $\lambda_0$  brāķēšanas likumā pēc Neimaņa – Pīrsona kritērija ir atkarīga no vērtības  $P_p^*$  un tiek aprēķināta pēc vienādojuma:

$$\int_{\lambda_0}^{\infty} W(\lambda(x) | H_0) d\lambda = P_p^*, \quad (4)$$

pie tam otrā veida kontroles kļūdas varbūtību aprēķina pēc formulas (3) pie  $\lambda_0 = \lambda_0(P_p^*)$ .

Lai pie fiksēta diskriminācijas  $D$  līmeņa reģistrējamo akustisko signālu līmenis ir  $\Delta k$ . Jāpieņem lēmums par triboelementa pārklājumu defektivitāti. Pie tam ir zināms, ka varbūtības sadalījuma blīvums  $\Delta k$  bezdefektu izstrādājumiem tiek pakļauts vienusējā normāla sadalījuma likumam ar vidējo  $\Delta k_0$  un dispersiju  $S_0^2$ , bet defektīvu izstrādājumu gadījumā vienusējā normāla sadalījuma likumam ar vidējo  $\Delta k_1$  un dispersiju  $S_1^2$ .

Lēmuma pieņemšana par izstrādājuma derīgumu nozīmē pārbaudi, vai hipotēzes  $H_0$  vērtība  $\Delta k$  ir iegūta no sadalījuma

$$W(\Delta k | H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S} \exp\left(-\frac{[\Delta k - \Delta k_0]^2}{2S^2}\right), \quad \Delta k > 0,$$

un kontrolējamajam izstrādājumam nepiemīt defekti, pret alternatīvu par to, ka  $\Delta k$  ir iegūts no sadalījuma

$$W(\Delta k | H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S} \exp\left(-\frac{[\Delta k - \Delta k_1]^2}{2S^2}\right), \quad \Delta k > 0,$$

un, attiecīgi, kontrolējama izstrādājums ir defektīvs. Pie tam tiek pieņemta hipotēze  $H_1$  par izstrādājuma defektivitāti, ja reģistrētajam signālu līmenim  $\Delta k$  atbilst nevienādība:

$$\lambda(\Delta k) = W(\Delta k | H_1) / W(\Delta k | H_0) \geq \lambda_0. \quad (5)$$

Pārbrāķēšanas varbūtība ir saistīta ar reģistrējamo signālu sliekšņa vērtību  $\Delta k$  ar attiecību:

$$P_p = \int_{\Delta k_0}^{\infty} W(\Delta k | H_0) d\Delta k = 1 - \Phi\left(-\frac{\Delta k_0 - \Delta k_0}{S}\right),$$

kurā

$$\Phi(\Delta k) = \left(1/\sqrt{2\pi}\right) \int_{-\infty}^{\Delta k} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$$

- kļūdu integrālis.

Ja tiek noteikta vērtība  $P_p$ , tad no (5) atrodam defektācijas sliekšni

$$\Delta k_0 = \overline{\Delta k_0} + \delta S_0, \quad (6)$$

kur  $\delta$  – vienpusējais tolerances koeficients, kurš ir atkarīgs no mērījumu daudzuma, notikuma  $\Delta k < \Delta k_0$  pieņemtā nozīmības līmeņa  $q$  un  $\Delta k$  trāpījuma dotajā diapazonā ticamības varbūtības;  $S_0$  – selektīvā vidējā kvadrātiskā novirze;  $\overline{\Delta k_0}$  – selektīvā vidējā parametra vērtība.

Koeficienta  $\delta$  vērtība var tikt aprēķināta pēc formulas:

$$\delta = Z_q \left(1 + \frac{Z_p}{\sqrt{2m}} + \frac{5Z_p^2 + 10}{12m}\right), \quad (7)$$

kur  $m$  – mērījumu daudzums;  $Z_p$  un  $Z_q$  – normālā sadalījuma kvantiles attiecīgi varbūtībām  $p$  un  $q$ .

Tādejādi, ja pie AE aparatūras fiksēta diskriminācijas līmeņa triboelementa ar pārklājumu nesagraujošās kontroles procesā ir reģistrēts signāls ar līmeni  $\Delta k \geq \Delta k_0$ , tad nevienādība (5) ir patiesa un izstrādājums tiek brāķēts, pretējā gadījumā izstrādājums tiek atzīts par derīgu. Varbūtība atzīt brāķētu izstrādājumu par derīgu šai gadījumā ir:

$$P_n = \int_0^{\Delta k_0} W(\Delta k | H_1) d\Delta k = \Phi\left(\delta - \frac{\Delta k_1 - \Delta k_0}{S_0}\right) + \Phi\left(\frac{\Delta k_1}{S_0}\right) - 1. \quad (8)$$

Brāķēšanas līmenis, kā liecina izteiksme (6), ir atkarīgs no AE aparatūras diskriminācijas līmeņa, pie kura veic kontroli. Diskriminācijas līmenis ir jāizvēlas tā, lai nenostādes līmenis būtu minimāls. Par cik  $\Phi(\alpha)$  ir monotoni pieaugoša funkcija, tad  $P_n$  minimizācijai ir nepieciešams, lai starpība  $\Delta k^* = \Delta k_1 - \Delta k_0$  būtu maksimāla. Ekstrēmumu  $\Delta k^*$  atradīsim no nosacījuma  $d\Delta k^* / dD = 0$ , kurš ir ekvivalents vienādojumam

$$\overline{d\Delta k_1 / dD} = \overline{d\Delta k_0 / dD},$$

pie tam  $\Delta k^*$  ir maksimums, par cik šai gadījumā  $d^2\Delta k^* / d^2D < 0$ .

Apskatītā brāķēšanas līmeņa noteikšanas metodika un ar to saistītā riska vērtības izvēlē var tikt pielietota triboelementu pārklājumu kontrolei kā ar AE metodi, tā arī ar citām nesagraujošās kontroles metodēm.

## II. MAŠĪNBŪVES IZSTRĀDĀJUMU NODILUMA ATTEIČU MODEĻI

Lai sistēma kopumā un tās elementi atrastos darba spējīgā stāvoklī, to darba raksturojumiem jāatrodas noteiktās pieļaujamajās robežās, kuras nosaka iekārtas funkcionālais uzdevums [3]. Tā, atstarpei savienojumā, kura palielinās darba gaitā triboelementu nodilšanas dēļ, jāatrodas robežās, kuras nodrošina bezsitienu kustību un nepieciešamo kinemātisko precizitāti. Atstarpe, kuru noteic ar lineārā nodiluma lielumu, tiek izteikta kā nedilstošā funkcija. Kad šī funkcija sasniedz robežlielumu, notiek atteice.

Apzīmēsim darba raksturojuma vērtību (nodilumu), kas atbilst berzes ceļam  $L$ , ar  $h(L)$ .  $h(L)$  izmaiņas laikā (vai attiecībā pret berzes ceļu), ko sauc par realizācijām, nosaka kā ārējie slodzes – ātruma faktori, tā arī fizisko procesu, kuri norisinās uz berzes virsmas, gaita.

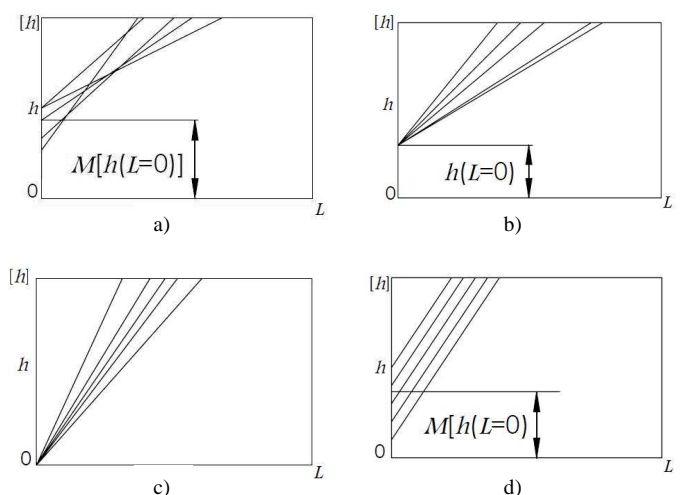
Bez tam,  $h(L)$  realizācijas veids ir atkarīgs no izejas apstākļiem, piemēram, no darba virsmas izgatavošanas kvalitātes. Vienkāršākie pieņēmumi par  $h(L)$  izmaiņām ir tādi, ka tām piemīt lineārs raksturs:

$$h(L) = h(L=0) + I_h L.$$

Vispārējā gadījumā, saglabājot pieņēmumu par atsevišķas realizācijas lineāro raksturu, vērtības  $h(L=0)$  un  $I_h L$  ir gadījuma skaitļi. Šai gadījumā bezatteiču darba laiku vai berzes ceļa garumu līdz robežnodiluma  $[h]$  sasniegšanai nosaka formula:

$$L = \frac{[h] - h(L=0)}{I_h}$$

Darbā [3] ir apskatīti daži mašīnu detaļu vispārējie atteiču, kuras izraisa nodilums, modeļi.



1. att. Lineārā nodiluma atkarības no berzes ceļa grafiki [3].

1.attēlā ir parādīti nodiluma izmaiņas gadījuma procesa matemātiskās gaidīšanas  $M[h(L)]$  un dispersijas  $D[h(L)]$  vērtības, kā arī dots berzes mezgla bezatteiču darba pie

determinētās robežas – robežnodiluma  $[h]$  esamības, varbūtības novērtējums.

Grafikiem, atspoguļotiem 1.attēlā atbilst sekojošas norādīto raksturlielumu vērtības:

$$a) \quad M[h(L)] = M[h(L=0)] + M(I_h)L;$$

$$D[h(L)] = D[h(L=0)] + D(I_h)L^2;$$

$$F(L) = \Phi \left\{ \frac{M[h(L=0)] + M(I_h)L - [h]}{\sqrt{D[h(L=0)] + D(I_h)L^2}} \right\};$$

$$b) \quad M[h(L)] = h(L=0) + M(I_h)L;$$

$$D[h(L)] = D(I_h)L^2;$$

$$F(L) = \Phi \left\{ \frac{(L=0) + M(I_h)L - [h]}{D(I_h)L^2} \right\};$$

$$c) \quad M[h(L)] = M(I_h)L; \quad D[h(L)] = D(I_h)L^2;$$

$$F(L) = \Phi \left\{ \frac{M(I_h)L}{D(I_h)L^2} \right\};$$

$$d) \quad M[h(L)] = M[h(L=0)] + I_hL;$$

$$D[h(L)] = D[h(L=0)];$$

$$F(L) = \Phi \left\{ \frac{M[h(L=0)] + I_hL - [h]}{\sqrt{D[h(L=0)]}} \right\}$$

$F(L)$  1.attēlā ir varbūtība, ka berzes ceļa, kurš ir vienāds ar  $L$ , laikā, nodiluma realizācija nešķērsos robežu  $[h]$ ;  $\Phi(n)$  – Laplasa funkcija, kuru nosaka vienādojums [1,2,3]:

$$\Phi(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^n \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt.$$

Laplasa funkcija ir tabulēta, kas ļauj samērā vienkārši noteikt kustīgā savienojuma bezatzeiču darba varbūtību.

Apskatīsim dažādus atsevišķus triboelementu ar nodilumizturīgiem pārklājumiem [8,9], ņemot vērā pārklājumu fizikāli mehāniskās īpašības un to ekspluatācijas īpatnības, parametriskā drošuma prognozēšanas uzdevumu risinājumus.

### III. TRIBOELEMENTU AR NODILUMIZTURĪGIEM PĀRKLĀJUMIEM PARAMETRISKĀ DROŠUMA PROGNOZĒŠANA

#### 1. modelis

Pieņemsim, ka pārklājuma kvalitāte nav homogēna, bet pārklājuma dilšanas ātrums  $U_n$  - gadījuma lielums ar sadalīšanās blīvumu  $f(U_n)$ , pārējie modeļa parametri netiek variēti.

Lai noteiktu monotoni mainīga laikā nodiluma parametra  $n(t)$  iziešanas aiz noteiktām robežām  $[R_1, R_2]$  varbūtības blīvumu, tika iegūta sekojoša sakarība:

$$q(t) = -\frac{d}{dt} \int_{R_1}^{R_2} f_1(n/t) dn, \quad (9)$$

kur  $f_1(n/t)$  - parametra  $n$  sadalījuma blīvums laika momentā  $t$ .

Acīmredzami, ka pie pastāvīga dilšanas ātruma iegūsim:

$$f_1(n/t) = f(n/t) \frac{1}{t}.$$

Pārklājuma pilnīgas nodilšanas varbūtības blīvums ir vienāds ar:

$$q(t') = -\frac{d}{dt'} \int_0^a f(n/t) dn = -\frac{d}{dt'} \int_0^{a/t'} f(v_n) dv_n =$$

$$= \frac{a}{(t')^2} f\left(\frac{a}{t'}\right), \quad (10)$$

kur  $a$  – pārklājuma biezums. Laiks  $t'$  nosaka triboelementa pārklājuma pilnīga nodiluma momentu.

Triboelementam ar vienslāņa homogēna pārklājumu vienādojums (2) nosaka pakāpeniskās atteices dēļ pārklājuma nodiluma varbūtības blīvumu. Gadījumam ar daudzslāņu pārklājumu rezultāts (2) ir starprezultāts, kurš ir nepieciešams berzes elementa pilna nodiluma novērtēšanai.

Sakarā ar to, ka pamatmateriāla dilšanas ātrums šai uzdevumā ir pastāvīgs, pakāpeniskās atteices nodiluma  $q(t)$  dēļ sadalījuma blīvums atbilst pārklājuma pilna nodiluma  $q(t')$  varbūtības blīvumam, ņemot vērā laika argumenta nobīdi

$$t' = t - \gamma,$$

kur  $\gamma = \frac{R-a}{v_m}$ . Šeit  $R = [n(t)]$  – robežnodilums;  $U_m$  – detaļas pamatmateriāla dilšanas ātrums.

No tā izriet:

$$q(t) = \frac{d}{dt'} \int_0^{a/(t-\gamma)} f(v_n) dv_n =$$

$$= \frac{a}{(t-\gamma)^2} f\left(\frac{a}{t-\gamma}\right), \quad t > \gamma. \quad (11)$$

Tad triboelementa ar pārklājumu bezatteiču darba varbūtība laika posmā  $T$  būs vienāda ar:

$$P(T) = 1 - \int_0^T q(t) dt. \quad (12)$$

Pie normāla pārklājuma dilšanas ātruma sadalījuma likuma  $f(v_n)$  bezatteiču darba varbūtību nosaka attiecība:

$$P(T) = 0.5 + \Phi \left( \frac{\frac{a}{t-\gamma} - m(v_n)}{\sigma(v_n)} \right), \quad (13)$$

kur  $m(v_n)$  - dilšanas ātruma matemātiskais gaidāmais;  $\sigma(v_n)$  - dilšanas ātruma vidējā kvadrātiskā novirze.

### 2.modelis

Pieņemsim, ka pārklājuma kvalitāte nav homogēna, bet tā biežums ir gadījuma lielums ar sadalījuma likumu  $\mu(a)$ , pārējie modeļa parametri nemainās.

Laiks  $t'$ , tāpat kā iepriekšējā modelī, nosaka pārklājuma pilnīgas nodilšanas momentu. Acīmredzami, ka šo laiku nosaka sakarība  $t' = \frac{1}{v_n} a$ .

Tad pārklājuma pilnīga nodiluma varbūtības blīvums būs vienāds ar  $q(t') = \mu(v_n t') v_n$ .

Ņemot vērā, ka  $t' = \frac{-R + v_m t}{v_m - v_n}$  un  $\frac{dt'}{dt} = \frac{v_m}{v_m - v_n}$ ,

atrodam triboelementa pakāpeniskās atteices dēļ pārklājuma nodiluma varbūtības blīvumu:

$$q(t) = \frac{v_n v_m}{v_m - v_n} \mu \left[ v_n \left( \frac{v_m t - R}{v_m - v_n} \right) \right] \quad (14)$$

Un bezatteiču darba varbūtību laika posmā  $T$

$$P(T) = 1 - \frac{v_n v_m}{v_m - v_n} \int_0^T \mu \left[ v_n \left( \frac{v_m t - R}{v_m - v_n} \right) \right] dt =$$

$$= 1 - \int_{\frac{-v_n}{v_m - v_n} R}^{\frac{v_n - (v_m T - R)}{v_m - v_n}} \mu(v_n) dv_n \quad (15)$$

Apskatot atsevišķu gadījumu, kur pārklājuma biežuma sadalījums pakļaujas normālajam likumam, iegūsim:

$$P(t) = 1 + \Phi \left( \frac{-\frac{v_n}{v_m - v_n} R - m(a)}{\sigma(a)} \right) - \Phi \left( \frac{\frac{v_n}{v_m - v_n} (v_m T - R) - m(a)}{\sigma(a)} \right), \quad (16)$$

kur  $m(a)$  и  $\sigma(a)$  - attiecīgi pārklājuma biežuma matemātiskais gaidāmais un tā vidējā kvadrātiskā novirze.

### 3.modelis

Pieņemsim, ka pārklājuma kvalitāte nav homogēna, bet pārklājuma dilšanas ātrums un tā biežums – gadījuma lielumi, kuru sadalīšanās likumi ir  $f(v_n)$  un  $\mu(a)$ .

Šai gadījumā sadalījums  $t'$  jāapskata kā divu nejaušu argumentu funkcijas sadalījumu. Notikuma  $t' < T'$  varbūtība tādām gadījumam ir vienāda ar

$$P(t' < T') = Q(T') = \iint_D f(v_n) \mu(a) da,$$

kur apgabalu  $D$  nosaka funkcija  $v_n = a/T$  un nosacījums  $t' < T'$ .

No kurienes:

$$Q(T') = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(v_n) \mu(a) dv_n da.$$

Diferencējot šo funkciju, iegūsim sekojošu izteiksmi pārklājuma pilna nodiluma varbūtības blīvumam:

$$q(t') = \frac{1}{(t')^2} \int_0^{\infty} v_n \mu(a) f \left( \frac{a}{t'} \right) da. \quad (17)$$

Lai atrastu detaļas ar daudzslāņu pārklājumu atteices varbūtības blīvumu  $q(t)$  atzīmēsim, ka:

$$v_n = \frac{a}{t - \frac{R-a}{v_m}}.$$

Rezultātā pierakstam:

$$Q(T') = \int_0^{\infty} \int_{t - \frac{R-a}{v_m}}^{\infty} f(v_n) \mu(a) dv_n da. \quad (18)$$

Pakāpeniskās parametriskās atteices varbūtības blīvumu šim gadījumam attēlosim kā:

$$q(t) = \int_0^{\infty} \frac{a}{t - \frac{R-a}{v_m}} f \left( \frac{a}{t - \frac{R-a}{v_m}} \right) \mu(a) da, \quad t > \gamma. \quad (19)$$

Iegūtā izteiksme ļauj arī atrast triboelementa ar mainīga biežuma pārklājumu pie mainīga dilšanas ātruma bezatzeiņu darba varbūtību.

#### 4. modelis

Pieņemsim, ka nehomogēna ir kā pārklājuma kvalitāte, tā arī pamatmateriāla (pamatnes) kvalitāte, bet pārklājuma  $v_n$  un pamatmateriāla  $v_m$  dilšanas ātrumi ir gadījuma lielumi saskaņā ar attiecīgajiem sadalīšanas likumiem  $f(v_n)$  un  $\varphi(v_m)$ .

Pieņemsim, ka ir zināms pārklājuma pilnīga nodiluma varbūtības blīvums  $q(t')$ . Tad izstrādājumu ar nodilušu pārklājumu skaita pieaugums zināmā laika momentā  $t' = t_j$

būs vienāds ar  $dQ_j = q(t_j) dt'$ .

Pamatmateriāla dilšanas ātruma  $v_m$  variācijas dēļ šo izstrādājumu sadalījums notiek pēc likuma  $\varphi(v_m)$ . Tad varbūtības blīvuma  $q(t)$  diferenciālis būs vienāds ar

$$dq(t) = \frac{d}{dt} \left[ \int_0^{\frac{R-a}{t-t_j}} \varphi(v_m) dv_m \right] \frac{d}{dt'} \left[ \int_0^{\frac{a}{t'}} f(v_n) dv_n \right] dt' =$$

$$= \frac{R-a}{(t-t_j)^2} \varphi \left( \frac{R-a}{(t-t_j)} \right) \frac{a}{(t_j)^2} f \left( \frac{a}{t'} \right) dt' \text{ pie } t' = t_j.$$

Integrējot robežās  $t' \in [0, t']$ , iegūstam pakāpeniskās parametriskās atteices varbūtības blīvumu apskatāmajam gadījumam.

$$q(t) = \int_0^t \frac{R-a}{(t-t_j)^2} \varphi \left( \frac{R-a}{(t-t')} \right) \frac{a}{(t_j)^2} f \left( \frac{a}{t'} \right) dt'. \quad (20)$$

#### 5. modelis

Apskatīsim vispārēju gadījumu, kad pārklājuma dilšanas ātrums  $v_n$ , pārklājuma biežums  $a$  un pamatmateriāla dilšanas ātrums  $v_m$  ir gadījuma lielumi ar sadalījuma likumu  $f(v_n)$ ,  $\mu(a)$  un  $\varphi(v_m)$ .

Pieņemsim, ka gan pārklājuma kvalitāte gan arī pamatmateriāla (pamatnes) kvalitāte nav homogēna, pārklājuma  $v_n$  un pamatmateriāla  $v_m$  dilšanas ātrumi ir gadījuma lielumi ar attiecīgajiem sadalījuma likumiem  $f(v_n)$  un  $\varphi(v_m)$ . Laiks  $t_j$  nosaka šeit pārklājuma, kura sākuma biežums bija  $a_i$ , pilnīga nodiluma momentu.

Pārklājuma ar sākuma biežumu  $a_i$  pilnīga nodiluma varbūtības blīvumu noteiksim pēc formulas:

$$q_i(t_i) = \frac{a_i}{(t_i)^2} f \left( \frac{a_i}{t_i} \right).$$

Izstrādājumu ar pilnībā nodilušu pārklājumu, kura sākuma biežums bija  $a_i$ , skaita pieaugums zināmā laika momentā  $t_i = t_j$  būs vienāds ar

$$d[ dq(t_i) ] = \mu(a_i) da \frac{a_i}{(t_{ij})^2} f \left( \frac{a_i}{t_{ij}} \right) dt_i'.$$

Pamatmateriāla dilšanas ātruma variācijas rezultātā šie izstrādājumi tiek sadalīti pēc likuma  $\varphi(v_m)$ . Tad atteiņu varbūtības blīvuma otrās pakāpes diferenciālis izskatās tā:

$$d^2 q(t) = - \frac{d}{dt} \left[ \int_0^{\frac{R-a}{t-t_j}} \varphi(v_m) dv_m \right] d[ dq(t_{ij}') ]$$

$$= \frac{R-a_i}{(t-t_{ij}')^2} \varphi \left( \frac{R-a_i}{(t-t_{ij}')} \right) \mu(a_i) f \left( \frac{a_i}{t_{ij}'} \right) da dt_i'.$$

Integrējot pēc  $a$  robežās  $a \in [0, \infty]$  un pēc  $t'$ , kur  $t' \in [0, t]$ , iegūsim

$$q(t) = \int_0^t \int_0^{\frac{R-a_i}{t-t'}} \frac{R-a_i}{(t-t')^2} \frac{a_i}{(t_{ij}')^2} \varphi \left( \frac{R-a_i}{(t-t')} \right) \mu(a_i) f \left( \frac{a_i}{t_{ij}'} \right) da dt'. \quad (21)$$

Iegūtās analītiskās sakarības ļauj novērtēt triboelementu bezatzeiņu darba varbūtību, atrast optimālo pārklājuma biežuma vērtību un prognozēt berzes mezgla resursu.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.

#### LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Ebeling C. E. *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*, McGraw-Hill Companies, Inc., Boston, 1997, p 489.
- [2] Leemis L. *Reliability: Probabilistic Models and Statistical Methods*, Prentice-Hall, 1995, p 319.
- [3] Kececioglu D. *Reliability Engineering Handbook*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991, p 688.
- [4] Дальский А.М. *Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин*. М.: Машиностроение, 1975, 222с.
- [5] Dunegan H.L., Harris D.O., Tatro C.A. *Fracture analysis by use of acoustic emission*. - Eng.Fract.Mech. 1968, V.1, Nr.1, p.105-122
- [6] Горелик А.Л., Скрипкин В.А. *Методы распознавания*.-М.: Высшая школа, 2004.-261 с.
- [7] Hartbower C.E., Reuter W.G.Morais C.F. a.o. *Acoustic emission for the detection of weld and stress – corrosion cracking*. – In: Acoustic emission. ASTM STP 505. Baltimore, 1972, p.187-221.
- [8] Urbahs A., Savkovs K., Nesterovskis V., Urbaha M. Creation of ionic-plasma coverings for protection and restoration of details for gas-turbine engines. *World Journal of Engineering*, Vol.5 Supplement 2008, p 997.
- [9] TiAlN/VN superlattice structured PVD coatings: A new alternative in machining of aluminium alloys for aerospace and automotive component. P.Eh. Hovsepian et al. *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, Issues 1-2, 2006, p 265–272.

**Margarita Urbach**, born in Latvia, has graduated with a Master degree in 2006. Since 2006 she is studying for the doctoral degree at Riga Technical University Faculty of Transport and Mechanical Engineering. She is a researcher at the Institute of Transport Vehicles Technologies of the Riga Technical University. Her field of scientific interest includes: surface protection technologies, nanocomposite coatings, structural materials, transport systems and logistics.

#### Margarita Urbach. Quality assessment and forecasting the reliability of tribo-elements with wear-resistant coatings

Most failures of power units occur due to the malfunction of regulators and distributors as well as plunger pairs of pumps and hydraulic motors. Unserviceable condition of plunger pair products of the same type is classified as a random event, i.e. a failure. In most cases, failures and destruction of plunger pair products

occur due to wear and usually first appear on the surface of parts. All service properties of parts as well as their characteristics are closely interrelated with geometrical and physico-mechanical properties of surface layers.

The work offers a probabilistic approach to solving the problem of assessing the quality of tribo-elements with wear-resistant coatings on the basis of diagnostic parameters of the acoustic testing method. It considers a methodology for determining an objectionable level as well as the risk value related to its choice in the process of testing tribo-elements with coatings.

The work proposes different specific solutions to the problem of forecasting reliability of tribo-elements with wear-resistant coatings. In particular, it proposes mathematical models that provide the opportunity to estimate probability density for gradual failure of a tribo-element due to wear of the coating.

The obtained analytic dependences make it possible to evaluate the probability of failure-free operation of tribo-elements, define the optimal value of coating thickness and forecast the life of a friction unit.

**Маргарита Урбах. Оценка качества и прогнозирование надежности трибоэлементов с износостойкими покрытиями**

Большинство отказов силовых установок происходит вследствие неисправной работы регулирующих и распределительных устройств, а также плунжерных пар насосов и гидромоторов. Нарушение работоспособного состояния однотипных изделий плунжерных пар относят к случайному событию – отказу. Большинство отказов и разрушений изделий прецизионных пар происходят из-за их износа и начинаются, как правило, с поверхности деталей. Все эксплуатационные свойства деталей и их показатели тесно взаимосвязаны с геометрическими и физико-механическими характеристиками поверхностных слоев.

Предложен вероятностный подход к решению задачи оценки качества трибоэлементов с износостойкими покрытиями на основе диагностических параметров акустического метода контроля. Рассмотрена методика определения браковочного уровня и связанного с его выбором значения риска при контроле трибоэлементов с покрытиями.

В работе предложены различные частные решения задачи прогнозирования надежности трибоэлементов с износостойкими покрытиями. В частности, предложены математические модели, позволяющие оценивать плотность вероятности постепенного отказа трибоэлемента из-за износа покрытия.

Полученные аналитические зависимости позволяют оценить вероятность безотказной работы трибоэлементов, найти оптимальную величину толщины покрытия и прогнозировать ресурс узла трения.