

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Transporta un mašīnzinību fakultāte

Aviācijas institūts

**Andrejs KUZNECOVS**

Aviācijas transporta doktora programmas doktorants  
(dokt. apliecības Nr. 013RMD002)

**SAREŽĢĪTU SISTĒMU DROŠĪBAS  
NODROŠINĀŠANA UN OPTIMIZĀCIJA**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs:  
Dr. habil. sc. ing., profesors  
Jurijs PARAMONOVS

**Rīga 2006**

UDK 629.735.017.1.02:519.2

Kuzņecovs A. Sarežģītu sistēmu drošības nodrošināšana un optimizācija. Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU, 2006. – 19 lpp.

ISBN

**PROMOCIJAS DARBS  
IZVIRZĪTS RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ  
INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiks publiski aizstāvēts 2006. g. „29.” augustā Rīgas Tehniskās universitātes Aviācijas institūtā, Lomonosova ielā 1, B korpusa 407. auditorijā.

RECENZENTI:

Aviācijas institūta profesors, Dr. habil. sc. ing. Vitālijs Pavelko,  
Rīgas Tehniskā Universitāte.

Transporta tehnoloģiju institūta profesors, Dr. habil. sc. ing. Jurijs Martinovs,  
Rīgas Tehniskā Universitāte.

Rīgas zinātniski eksperimentālā centra „Aviatest LNK” izpilddirektors,  
Dr. sc. ing. Aleksandrs Sorokins.

**APSTIPRINĀJUMS**

Es apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Andrejs Kuzņecovs .....

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur 4 nodaļas, kopsavilkumu, 7 pielikumus, 86 zīmējumus, 27 tabulas, kopā 191 lappuse, literatūras sarakstā ir 38 nosaukumi.

## 1. Zinātniskā darba aktualitāte

Noguruma bojājumi tiek uzskatīti par vienu no būtiskākajiem faktoriem, kas ietekmē aviācijas konstrukciju drošumu, savukārt uzkrājošos noguruma bojājumu izpausmju sekas sastāda būtisku daļu no lidmašīnu darbības visu veidu atteikumu un sagrūšanas gadījumu skaita. Pastāvošās minētā bojājumu veida negatīvo seku novēršanas metodes balstās uz diviem pamatprincipiem: aviācijas konstrukcijas ekspluatācijas intervāla ilguma ierobežošana, determinējot noguruma pārbaudes rezultātā iegūtas kontrolējamo resursu vērtības, kā arī attiecīgu apskates programmu realizācija ekspluatācijas gaitā ar nolūku konstatēt noguruma plaisu esamību vēl līdz brīdim, kamēr atlikusī konstrukcijas izturība nekļūst zemāka par iepriekš definētu minimāli pieļaujamo līmeni. Apskates programmu noteikšanas metodikas radīšanai un pētījumiem par iespējām šīs programmas koriģēt ekspluatācijas gaitā arī ir veltīts aplūkojamais darbs.

## 2. Zinātniskā darba mērķis

Zinātniskā darba mērķis ir:

- nogurumam pakļauto lidmašīnas korpusa konstrukcijas nesošo elementu apskašu programmas izstrādes un realizācijas procesa matemātiskā modeļa izveide, tā efektivitātes un optimizācijas metožu novērtēšana gadījumam, kad par sākotnējo informāciju tiek izmantots ierobežots noguruma plaisu izplatīšanās trajektoriju skaits, kas iegūts iepriekšēju (stenda) izmēģinājumu gaitā;
- modeļa realizēšanai atbilstoša programnodrošinājuma izstrāde un tā praktiskās pielietošanas iespēju izpēte.

## 3. Pētījumu metodes

Teorētiskās metodes:

- varbūtību teorija un Markova ķēžu teorija;
- matemātiskā statistika;
- matemātiskā modelēšana.

Eksperimentālās metodes:

- noguruma ilgizturības mehāniskie izmēģinājumi;
- periodisku novērojumu veikšana un ekspluatācijas rādītāju izmantošana apskašu programmas koriģēšanai;
- matemātiskā modelēšana, izmantojot mūsdienīgus matemātisko programmu kompleksus.

## 4. Zinātniskā novitāte

4.1. Zinātniskajā darbā tiek piedāvāta lidmašīnu parka apskašu programmas izstrādes metodika, izmantojot nedaudzus rezultātus, kas gūti noguruma plaisu izplatīšanās trajektorijas iepriekšējos (stenda) novērojumos. Metodikai raksturīgas sekojošas īpatnības:

- noguruma plaisas izplatīšanās aproksimācijai tiek piemērots eksponenciālais modelis (otrās kārtas Perisa modelis) ar diviem gadījuma rakstura parametriem – ekvivalento plaisas sākuma izmēru un plaisas izplatīšanās ātrumu (logaritmiskajā mērogā); modelis ļauj ņemt vērā šo parametru novērtējuma korelāciju;
- lai izvēlētos ekspluatējamo lidmašīnu parka apskašu programmu, izmantojot iegūtos plaisu izplatīšanās rezultātus, dabisko noguruma izmēģinājumu procesā tika pielietota statistiskā minimaksa lēmumu funkcija, kas, neraugoties uz nezināmu plaisu izplatīšanās parametru klātbūtni, garantē uzdoto lidmašīnu parka atteikuma varbūtības ierobežošanu.

- 4.2. Ir izstrādāts matemātiskais modelis, kas realizē minēto lidmašīnu parka apskašu programmas noteikšanas metodiku un ar tā palīdzību iegūti sekojoši rezultāti:
- izpētīta atteikuma varbūtības gaita kā dažādo modeļa parametru (starpapskašu intervāls, pirmās apskates veikšanas moments u.c.) funkcija, iegūtas un analizētas atsevišķas tās gaitas īpatnības;
  - piedāvāta jauna pirmās apskates veikšanas momenta noteikšanas metodika, kas nodrošina minimāli iespējamo apskašu skaitu konkrētajam apskašu programmas veidam;
  - piedāvāts modelis pārejai uz alternatīvu apskašu programmu, ja ekspluatācijas gaitā radušies noteikti atgadījumi, tādējādi ļaujot pagarināt lidmašīnu parka ekspluatācijas termiņu, vienlaicīgi saglabājot uzdoto atteikumu varbūtības līmeni un samazinot kopīgo vidējo apskašu skaitu.
- 4.3. Izstrādāts programmnodrošinājums noguruma plaisu izplatīšanās datu analīzei un apskašu programmas raksturlielumu aprēķiniem, kas sevī iekļauj:
- plaisu izplatīšanās parametru novērtēšanu;
  - uzskatāmu noguruma plaisu attīstības procesa un aplūkojamās apskašu programmas (ko raksturo pirmās apskates veikšanas laika moments, starpapskašu intervāls, minimālais konstatējamais plaisas izmērs u.c.) efektivitātes modelēšanu, vizualizējot aprēķinu rezultātus ar Monte-Karlo metodes palīdzību;
  - apskašu programmas efektivitātes aprēķinu, izmantojot atteikumu varbūtību analītiskās atkarības no apskašu programmas parametriem;
  - Markova ķēžu aparāta izmantošanu, lai aprēķinātu sekas pārejai uz alternatīvo apskašu programmu (konkrēti – apskašu biežuma dubultošanu pēc pirmās noguruma plaisas konstatācijas ekspluatācijas gaitā);
  - modulārā principa izmantošanu virtuālā izmēģinājumu stenda izveidē, pieļaujot elastīgu modelēšanas sistēmas pārkonfigurēšanu saskaņā ar tekošajām izmēģinātāja prasībām, vajadzības gadījumā to papildinot ar jauniem vai izmainot esošos moduļus.
- 4.4. Uzrādīti skaitliskie aprēķinu piemēri.
- 4.5. Izveidots programmu komplekss ar pievienotiem detalizētiem aprakstiem un instrukcijām.

## 5. Praktiskā nozīme

Piedāvātajam darbam ir sekojoša praktiskā nozīme:

- izstrādātais programmu komplekss ievērojami paplašina un padziļina vienkāršāko sistēmas variantu, kas ticis izstrādāts pēc Iljušina konstruktoru biroja pasūtījuma un bijis nodots arī Jakovļeva konstruktoru biroja rīcībā;
- šī modeļa pielietošana ļauj uzlabot apskašu programmas ekonomiskos rādītājus, vienlaicīgi saglabājot uzdoto lidmašīnu parka atteikuma varbūtības ierobežojumu;
- radīti līdzekļi lēmumu pieņemšanas procesa modelēšanai, pieņemto lēmumu seku analīzei atkarībā no dažādām apskašu veikšanas tehnoloģijām un apskašu programmas koriģēšanas stratēģijām, pakāpeniski uzkrājoties apskašu gaitā iegūtajai informācijai;
- izstrādātā sistēma tiek izmantota mācību procesā RTU Aviācijas institūtā.

## 6. Pirmā nodaļa

Šajā nodaļā tiek aplūkota īsa problēmas izcelsmes vēsture, tiek skaidroti jēdzieni, atspoguļotas eksistējošās un patreiz izmantojamās metodes sagrūšanas varbūtības ierobežošanai noguruma bojājumu uzkrāšanās rezultātā, kā arī tiek analizētas to priekšrocības un trūkumi.

Problēmas nozīmīgumu apliecina statistikas dati, kas publicēti G.S.Kembella un R.Lahi darbā „Noguruma destrukciju izraisīto nopietno aviokatastrofu apskats”: laika posmā no 1927. līdz 1981. gadam ir notikušas 1885 katastrofas ar 2240 bojāgājušajiem; uzrādītie statistikas dati par pēdējiem gadiem liecina par apm. 69 avārijām ikgadu, ko izraisījušas noguruma sagrūšanas; daļa no šīm avārijām beidzās ar katastrofām.

Lidmašīnas korpusa apskašu programmas izveidei ar nolūku savlaicīgi atklāt noguruma plaisas ir veltīti B.Lundberga, F.H.Huka, D.N.Janga, V.J.Sennika, V.V.Nikonova, N.N.Smironova, V.S.Streljajeva, G.I.Nesterenko u.c. autoru darbi. Šīs problēmas risināšanā lielu ieguldījumu devuši arī H.B.Kordonska un J.A.Martinova vadībā veiktie pētījumi.

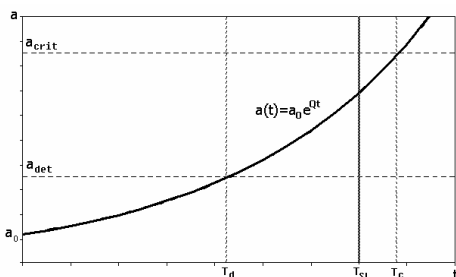
Tomēr visos šajos darbos netika ņemts vērā, ka ekspluatācijas gaitā atteikumu varbūtība ir atkarīga ne vien no plaisu izplatīšanās parametru novērtējumu gadījuma rakstura un apskašu veikšanas tehnoloģiju raksturlielumiem, bet arī no izšķirošā lēmuma pieņemšanas procedūras, resp., no tā, ka daudzos gadījumos tiek mainīts mūs interesējošās konstrukcijas projekts. Matemātisko modeļu attīstības pirmsākumi šajā virzienā ir novērojami J.M.Paramonova un P.M.Soboļeva darbos, bet vēlāk tas turpināts N.M.Kimlika darbā.

Aplūkojamais darbs ir iepriekš minēto pētījumu turpinājums, kas izceļas ar divu gadījuma rakstura parametru (sākotnējais ekvivalentais noguruma plaisas izmērs un tās izplatīšanās ātrums) izmantošanu plaisu izplatīšanās modelī, kā arī ar kopējā sadalījuma likuma izmantošanu šo gadījuma lielumu sadalījuma parametru novērtējumos.

## 7. Otrā nodaļa

Šī nodaļa atspoguļo gan pieejas ideoloģiju tādas lidmašīnu apskašu programmas izstrādei, kas ļauj optimizēt tās izmaksas (minimizēt lidmašīnu parka vidējo apskašu reižu skaitu) pie nosacījuma, ka tiek nodrošināts uzdotais atteikumu varbūtības līmenis, gan piedāvātā matemātiskā modeļa aprakstu, kā arī šī modeļa uzvedības pētījumu, izmantojot varbūtību un statistiskās pieejas.

Izstrādājot lidmašīnas konstrukcijas apskašu programmas, kuras ļautu novērst vai samazināt lidmašīnas sagrūšanas varbūtības līmeni līdz definētai vērtībai, mēs saduramies ar statistisko datu trūkumu par noguruma plaisu izplatīšanās parametriem. Lidmašīnas iespējamās sagrūšanas varbūtības līmeņa noteikšanas uzdevumu matemātiskos jēdzienos var noformulēt sekojoši: nepieciešams radīt procedūru (vai noformulēt statistisko lēmuma funkciju) apskašu programmas nozīmēšanai, kas ierobežotu lidmašīnas sagrūšanas varbūtības maksimālo vērtību pie nezināmiem, taču visaptverošu noguruma izmēģinājumu rezultātu apstrādes ceļā aptuveni novērtētiem plaisu izplatīšanās parametriem.

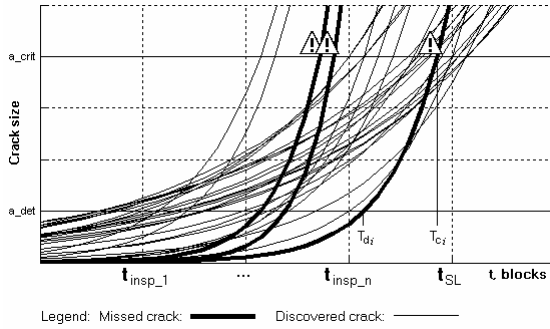


1. zīm. Plaisas izplatīšanās modeļa vizuālais atspoguļojums

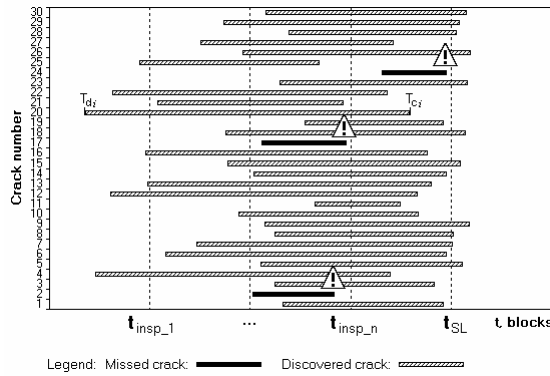
Turpmāku aprēķinu realizācijai nepieciešams noguruma plaisu izplatīšanās procesa matemātiskais modelis.

Izanalizējot eksperimentālos datus, kas iegūti lidmašīnas TY-134 (spārnu) izmēģinājumos, tika nolemts izmantot divu parametru eksponenciālo modeli (1.zīm.), resp., tika veikta reālās plaisu izplatīšanās līknes aproksimācija, piemērojot eksponenciālo funkciju, kas atkarīga no diviem parametriem (analoģisku aproksimāciju izmantoja Jangs):  $a(t) = a_0 \cdot e^{Qt} = \alpha \cdot e^{Qt}$ .

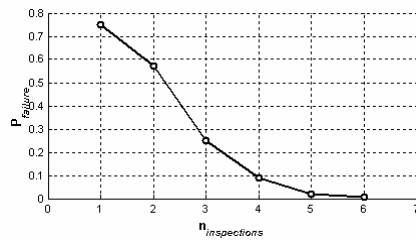
Plaisas izplatīšanās ātruma vērtību eksponenciālajā modelī reprezentē parametrs  $Q$ , bet tās t.s. ekvivalento sākotnējo izmēru pārstāv  $\alpha$ . Neraugoties uz vienkāršību, šī formula demonstrē pietiekoši labus rezultātus novērojumu diapazonā  $[T_d; T_c]$ , kur  $T_d$  – laika moments, kad plaisa kļūst konstatējama, bet  $T_c$  – laika moments, kad plaisa sasniedz savu kritisko izmēru.



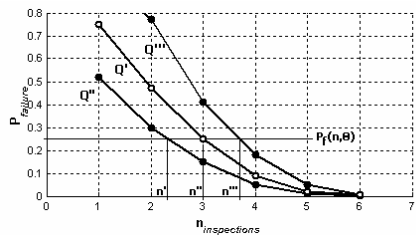
2.zīm. Neatklāto plaisu demonstrējums



3. zīm. Neatklāto plaisu demonstrējums



4. zīm. Atteikuma varbūtības atkarībā no  $n_{inspections}$



5. zīm. Atteikuma varbūtības atkarība no  $n_{inspections}$  un  $\theta$

No normālsadalījuma aditivitātes izriet, ka  $\ln T_c$  var pakļauties normālsadalījumam divos gadījumos: vai nu abas vērtības  $\ln C_c$  un  $\ln Q$  ( $C_c = \ln a_{crit} - \ln \alpha$ ) ir normāli sadalītas, (resp.,  $X = \ln Q \sim N(\mu_X, \sigma_X^2)$  un  $Y = \ln C_c \sim N(\mu_Y, \sigma_Y^2)$ ), vai arī, ja viena no šīm vērtībām ir normāli sadalīta, bet otra ir konstanta. Zīmējumos 6 un 7 šie gadījumi nosaukti attiecīgi par vien- un divparametru modeļiem.

Vispirms definēsim jēdzienu “atteikums” kā situāciju, kad nav iespējams konstatēt plaisu ar izmēru  $a_{det} \leq a < a_{crit}$ , vai, citiem vārdiem, ja netiktu veikta neviena apskate laika intervālā  $[T_d; T_c]$ . Piemēram, 2. un 3. zīm. aplūkojama situācija ar trim neatklātām plaisām.

Ja konstatēto plaisu skaits ir pietiekoši liels, tad nepamanīto plaisu daļa visā eksistējošo plaisu ansamblī var tikt aplūkota kā atteikuma varbūtības novērtējums:

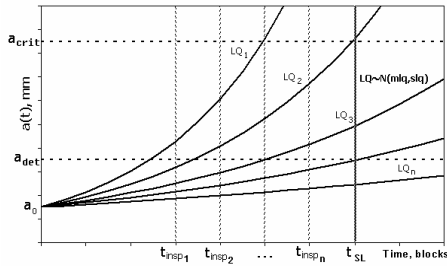
$$\hat{P}_f \rightarrow P_f = \lim_{n_{total} \rightarrow \infty} (n_{missed} / n_{total}).$$

Acīmredzams, ka, mainot apskašu skaitu  $n_{inspections}$ , intervālā  $[0, t_{SL}]$ , mēs ietekmēsim arī uz atklāto plaisu skaitu; attiecīgi atteikuma varbūtības novērtējums arī mainīsies, kā tas parādīts 4. zīmējumā. Diemžēl parametri zīmējumā 4 attēlotas atkarības dabūšanai nav zināmi. Tā vietā mēs izmantojam nelielu (viena, retos gad. divu) mērījumu skaita rezultātus. Reālā likne var atrasties kā virs, tā arī zem tās, kas redzams zīmējumā. Tas arī nozīmē, ka atteikuma varbūtības reālā vērtība pie dotā apskašu skaita arī mainās. Šāds gadījums demonstrēts 5. zīmējumā.

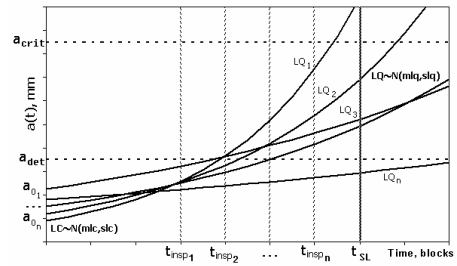
Kā tieši izskatīsies katra konkrētā reālā noguruma plaisu izplatīšanās likne paredzēt nav iespējams. Tādējādi, veicot plaisas izplatīšanās aproksimāciju noteikta modeļa ietvaros, šī modeļa parametru (fatigue crack growth model parameters, FCGMP) vērtības izrādās gadījuma lielumi ar saviem individuāliem sadalījuma parametriem.

Lai veiktu noguruma plaisu izplatīšanās procesa modelēšanu saskaņā ar Monte-Karlo metodi, nepieciešams zināt FCGMP sadalījuma likumu un tā parametrus.

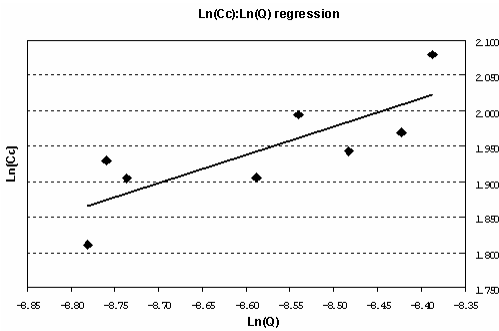
Modeļa parametri  $a$  un  $Q$  konkrētai noguruma plaisas izplatīšanās līknes realizācijai ir gadījuma rakstura lielumi; apzīmēsim  $X = \ln Q$  un  $Y = \ln C_c = \ln(\ln(a_{crit}/a))$ . Ilgizturība tiek izteikta kā  $T_c = C_c/Q$ . Veicot noguruma testu datu rezultātu analīzi, var pieņemt, ka laika logaritms, kurā plaisa sasniedz kritisko izmēru (ilgizturības logaritms) pakļaujas normālsadalījumam:  $\ln T_c \sim N(\mu_{\ln T_c}, \sigma_{\ln T_c}^2)$ .



6. zīm. Viena parametra plaisas pieauguma modelēšana



7. zīm. Divu parametru plaisas pieauguma modelēšana



8. zīm. Korelācija  $\ln Q - \ln C_c$

Lai novērtētu FCGMP sadalījuma parametrus, mēs izmantojam vairāku plaisu eksperimentālo novērojumu datus. Svarīgi atzīmēt, ka starp  $\ln Q$  un  $\ln C_c$  (starp  $X$  un  $Y$ ) pastāv būtiska korelācija. Mūsu izmantoto datu gadījumā, kas iegūti visaptverošu noguruma izmēģinājumu gaitā, korelācijas koeficienta  $r$  vērtība sastādīja 0.796419 (skat. 8. zīmējums).

Šajā darbā aplūkotas trīs atteikuma varbūtības aprēķina metodes: izmantojot formulas, izmantojot Monte-Karlo modelēšanu un Markova ķēžu teoriju.

Markova ķēdē tiek aplūkoti sekojoši stāvokļi: pirmie  $n+1$  stāvokļi atbilst lidmašīnas ekspluatācijai starp divām secīgām apskatēm; trīs nākošie stāvokļi atbilst sekmīga ekspluatācijas posma beigu stāvoklim, lidmašīnas stāvoklim atteikuma gadījumā un lidmašīnas norakstīšanas stāvoklim noguruma plaisas atklāšanas gadījumā.

- $E_i$  - lidmašīna tiek ekspluatēta  $i$ -jā intervālā;  $i = 1, 2, \dots, (n+1)$ ;
- $E_{n+2}$  - lidmašīna veiksmīgi nokalpojusi līdz  $t_{SL}$  bez konstatētām plaisām (SL-stāvoklis);
- $E_{n+3}$  - atteikums, resp., plaisa nav tikusi savlaicīgi atklāta (FF-stāvoklis);
- $E_{n+4}$  - apskates gaitā tikusi atklāta plaisa (CD-stāvoklis).

	$E_1$	$E_2$	$E_3$	...	$E_n$	$E_{n+1}$	$E_{n+2}$ (SL)	$E_{n+3}$ (FF)	$E_{n+4}$ (CD)
$E_1$	0	$u_1$	0	...	0	0	0	$q_1$	$v_1$
$E_2$	0	0	$u_2$	...	0	0	0	$q_2$	$v_2$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$E_{n-1}$	0	0	0	...	$u_{n-1}$	0	0	$q_{n-1}$	$v_{n-1}$
$E_n$	0	0	0	...	0	$u_n$	0	$q_n$	$v_n$
$E_{n+1}$	0	0	0	...	0	0	$u_{n+1}$	$q_{n+1}$	$v_{n+1}$
$E_{n+2}$ (SL)	0	0	0	...	0	0	1	0	0
$E_{n+3}$ (FF)	0	0	0	...	0	0	0	1	0
$E_{n+4}$ (CD)	0	0	0	...	0	0	0	0	1

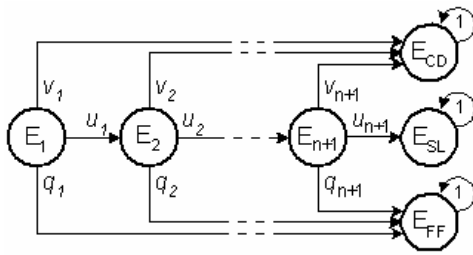
9. zīm. Pāreju varbūtību matrica

Atrašanās ekspluatācijas režīmā  $i$ -jā intervālā nozīmē, ka  $t \in (t_{i-1}, t_i)$ , kur  $i = 1, 2, \dots, n_{TTP}$ ,  $t_0 = 0$ ,  $t_{n_{TTP}+1} = t_{SL}$ .

Apzīmēsim  $i$ -tās apskates gaitā plaisas atklāšanas varbūtību ar  $v_i$ , atteikuma varbūtību ar  $q_i$ , un veiksmīgas ekspluatācijas turpināšanas varbūtību ar  $u_i$ . Tā kā šīs trīs varbūtības veido pilnu komplektu, tad  $u_i + v_i + q_i = 1$ . Mūsu modelī mēs arī pieņemam, ka lidmašīna tiek izņemta no ekspluatācijas laika momentā  $t_{SL}$  pat tad, ja uz to brīdi netiks konstatēta neviena plaisa. Šāds pārejas process grafiski attēlots 10. zīmējumā. Šī procesa pāreju varbūtību matrica aplūkojama 9. zīmējumā.

No 9. zīm. redzams, ka šī matrica var tikt uzlūkota kā 4 matricu ( $Q$ ,  $R$ ,  $0$  un  $I$ ) kompozīcija. Pielietojot Markova ķēžu aparātu, var viegli izrēķināt absorbcijas varbūtību katrā no stāvokļiem SL, FF un CD.

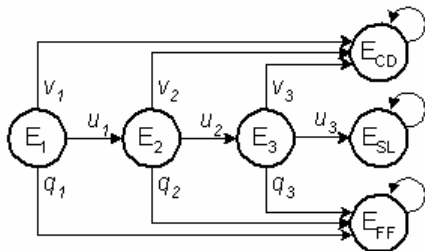




10. zīm. Lidmašīnas ekspluatācijas procesa grafiskais atspoguļojums

	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub> (E <sub>SL</sub> )	E <sub>5</sub> (E <sub>FF</sub> )	E <sub>6</sub> (E <sub>CD</sub> )
E <sub>1</sub>	0	u <sub>1</sub>	0	0	q <sub>1</sub>	v <sub>1</sub>
E <sub>2</sub>	0	0	u <sub>2</sub>	0	q <sub>2</sub>	v <sub>2</sub>
E <sub>3</sub>	0	0	0	u <sub>3</sub>	q <sub>3</sub>	v <sub>3</sub>
E <sub>4</sub> (E <sub>SL</sub> )	0	0	0	1	0	0
E <sub>5</sub> (E <sub>FF</sub> )	0	0	0	0	1	0
E <sub>6</sub> (E <sub>CD</sub> )	0	0	0	0	0	1

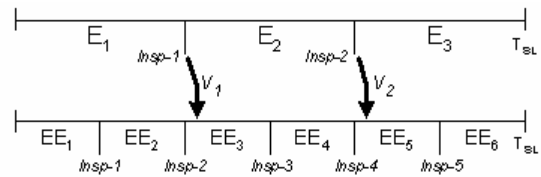
11. zīm. Pāreju varbūtības matrica divreizējas apskates programmai



12. zīm. Divreizējas apskates programmas stratēģijas grafis

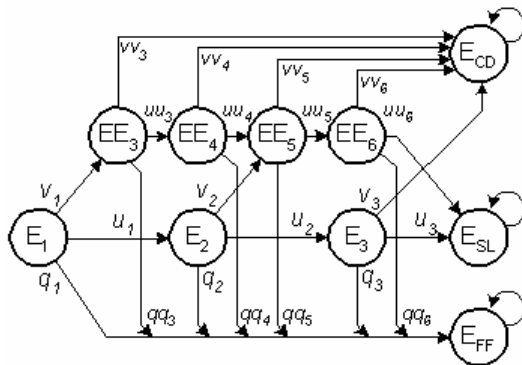
Markova ķēžu teorija ir sevišķi pievilcīga, lai modelētu dažādus scenārijus pārejai uz alternatīvām apskašu programmām gadījumos, kad ekspluatācijas gaitā realizējas noteikti atgadījumi. Piemēram, var divkāršot apskašu biežumu atlikušajai parka daļai pēc pirmās plaisas atklāšanas. Šādas pieejas piemērs nodemonstrēts programmai, kura sākotnēji sastāvēja no divām apskatēm: atbilstošais stāvokļu grafs aplūkojams 12. zīm., bet pāreju varbūtību matrica 11. zīmējumā.

Šajā piemērā eksistē divi laika momenti, kad iespējama pāreja uz divkāršotu apskašu biežumu: pēc pirmās apskates (ja tās gaitā konstatēta plaisa) un pēc otrās apskates (ja plaisa atklāta otrās apskates gaitā). Grafiski tas attēlots 13. zīmējumā.

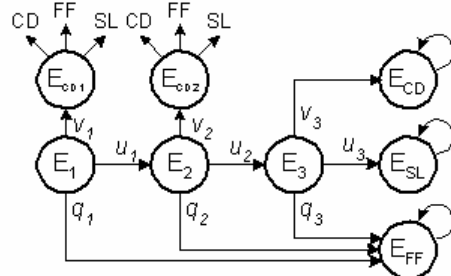


13. zīm. Pāreja uz divkāršu apskašu biežumu (2-5 apskašu modelis)

Modificētais stāvokļu grafs pilnā veidā redzams 14. zīm., bet saīsinātā formā – 15. zīmējumā.

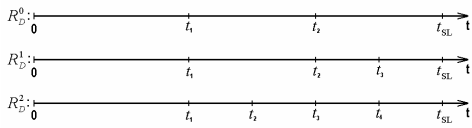


14. zīm. Modificētais apskates programmas stāvokļu grafs pilnā veidā



15. zīm. Modificētais apskates programmas stāvokļu grafs saīsinātā formā

Acīmredzams, ka nejaušai apskāšu programmai  $R_D(\cdot)$  šajā gadījumā ir trīs iespējamās realizācijas; šīs trīs realizācijas (vai scenāriji) grafiskā veidā tiek parādītas 16. zīmējumā.



$$R_D^0 : \{t_1, t_2, t_{SL}\};$$

$$R_D^1 : \{t_1, t_2, \frac{1}{2} \cdot (t_{SL} + t_2), t_{SL}\};$$

$$R_D^2 : \{t_1, \frac{1}{2} \cdot (t_2 + t_1), t_2, \frac{1}{2} \cdot (t_{SL} + t_2), t_{SL}\}.$$

16. zīm. Gadījuma apskates programmu attīstības iespējas (2 – 5 apskāšu modelis)

Katra scenārija papildīšanās varbūtība ir atkarīga no plaisas atklāšanas varbūtības pamatscenārijā iekļautās apskates gaitā ( $R_D^0$ , resp., nepārejot uz divkāršotu apskāšu biežumu). Šajā gadījumā modificētā pāreju varbūtību matrica apskāšu programmai ar 2-5 apskates reizēm izskatās tā, kā tas parādīts 17. zīmējumā. Zinot šo pāreju varbūtību matricu, var aprēķināt atteikuma varbūtību modificētajai apskāšu programmai.

	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$EE_3$ ( $E_{CD1}$ )	$EE_5$ ( $E_{CD2}$ )	$E_4$ ( $E_{SL}$ )	$E_5$ ( $E_{FF}$ )	$E_6$ ( $E_{CD}$ )
$E_1$	0	$u_1$	0	$v_1$	0	0	$q_1$	0
$E_2$	0	0	$u_2$	0	$v_2$	0	$q_2$	0
$E_3$	0	0	0	0	0	$u_3$	$q_3$	$v_3$
$EE_3$ ( $E_{CD1}$ )	0	0	0	0	0	$uu_3^*$	$qq_3^*$	$vv_3^*$
$EE_5$ ( $E_{CD2}$ )	0	0	0	0	0	$uu_5^*$	$qq_5^*$	$vv_5^*$
$E_4$ ( $E_{SL}$ )	0	0	0	0	0	1	0	0
$E_5$ ( $E_{FF}$ )	0	0	0	0	0	0	1	0
$E_6$ ( $E_{CD}$ )	0	0	0	0	0	0	0	1

17. zīm. Modificētā pāreju varbūtību matrica programmai ar 2 – 5 apskatēm

Vispārīgā gadījumā programma sastāv no  $n_{TIP}$  apskatēm un, attiecīgi, tai ir  $n_{TIP} + 1$  pārejas stāvokļi. Tādējādi, eksistē  $n_{TIP}$  iespējamie pāreju momenti uz divkāršu apskāšu biežumu, radot nejaušas apskāšu programmas  $n_{TIP} + 1$  realizācijas (vai scenārija) komplektu  $\tilde{\mathbf{R}}_D = \{R_D^0, R_D^1, \dots, R_D^{n_{TIP}}\}$ . Aplūkosim varbūtību vektoru  $\tilde{\mathbf{V}}^* = \{v_0^*, v_1^*, v_2^*, \dots, v_{n_{TIP}}^*\}$ , kur  $v_i^*$  ir plaisas atklāšanas varbūtība  $i$ -tās apskates gaitā,  $i = 1, \dots, n_{TIP}$ ,

$$v_0^* = 1 - P_f^0 - \sum_{i=1}^{n_{TIP}+1} v_i^*,$$

kur  $P_f^0$  ir atteikuma varbūtība sākotnējai apskāšu programmai saskaņā ar scenāriju  $R_D^0$ , bet  $v_0^*$  apzīmē varbūtību neatklāt nevienu plaisu un atrasties sākotnējā scenārija  $R_D^0$  ietvaros līdz pat  $t_{SL}$ .

	$E_1$	$E_2$	...	$E_{n_{TIP}+1}$	$E_{SL}$	$E_{FF}$	$E_{CD1}$	$E_{CD2}$	...	$E_{CD(n_{TIP}+1)}$
$E_1$	0	$u_1$	...	0	0	$q_1$	$v_1$	0	...	0
$E_2$	0	0	...	0	0	$q_2$	0	$v_2$	...	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$E_{n_{TIP}+1}$	0	0	...	0	$u_{n_{TIP}+1}$	$q_{n_{TIP}+1}$	0	0	...	$v_{n_{TIP}+1}$
$E_{SL}$	0	0	...	0	1	0	0	0	...	0
$E_{FF}$	0	0	...	0	0	1	0	0	...	0
$E_{CD1}$	0	0	...	0	0	0	1	0	...	0
$E_{CD2}$	0	0	...	0	0	0	0	1	...	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$E_{CD(n_{TIP}+1)}$	0	0	...	0	0	0	0	0	...	1

18. zīm. Modificētā pāreju varbūtību matrica vektora  $\tilde{\mathbf{V}}$  aprēķinam

Eksistē arī cita interpretācija pārejai uz divkāršotu apskāšu biežumu, ja nejaušu apskāšu programmu  $R_D$  aplūko kā scenāriju komplekta  $\tilde{\mathbf{R}}_D$  elementu. Šādam gadījumam  $\tilde{\mathbf{P}}_f(\tilde{\mathbf{R}}_D) = \{P_f^0(R_D^0), P_f^1(R_D^1), \dots, P_f^{n_{TIP}}(R_D^{n_{TIP}})\}$ , atteikuma varbūtība nejaušai apskāšu programmai ir atteikumu varbūtību summa visiem scenārijiem, kas reizināta ar katra šī scenārija realizācijas varbūtību:

$$P_f = P_f^0 + \sum_{i=1}^{n_{TIP}} (v_i^* \cdot P_f^i).$$

Vektora  $\tilde{\mathbf{V}}^*$  elementu vērtības var tikt iegūtas, sastādot modificēto pāreju varbūtību matricu un aprēķinot absorbcijas varbūtību matricas  $B$  elementu vērtības, kā tas demonstrēts 18. zīmējumā.

	$E_{SL}$	$E_{FF}$	$E_{CD1}$	$E_{CD2}$	...	$E_{CD(n_{ip}+1)}$
$E_1$	$v_0^*$	$P_f^0$	$v_1^*$	$v_2^*$	...	$v_{n_{ip}+1}^*$
$E_2$	.	.	.	.	...	.
...	...	...	...	...	...	...
$E_{n_{ip}+1}$	.	.	.	.	...	.

19. zīm. Absorbcijas B varbūtību matrica

iespējama iepriekš aprakstītās procedūras rekursīva pielietošana vai arī kādas citas pāreju varbūtības matricas izmaiņas. Šāds scenārijs patiesībā ir atsevišķas izpētes vērts, tāpēc tas šajā darbā netiek aplūkots.

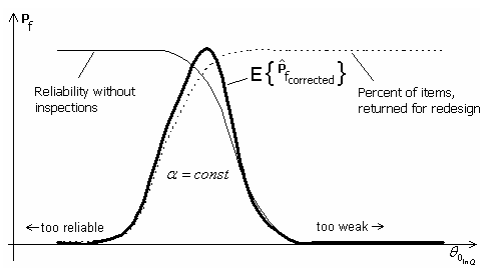
Turpinājumā var tikt izmantota statistisko lēmumu minimaksa funkcija, ja iespējama lēmuma pieņemšana par lidmašīnas projekta novirzīšanu uz atkārtotu izstrādi gadījumā, kad parametru kopas  $\vec{d}_L = \vec{d}_L(\hat{\theta})$  vērtību analīze neapstiprina iekļaušanos pieļaujamo vērtību diapazonā  $D_L$  :

$$\hat{P}_{f_{corrected}} = \begin{cases} P_f(\theta, \vec{d}_L) & , \vec{d}_L \in D_L \\ 0 & , \vec{d}_L \notin D_L \end{cases}$$

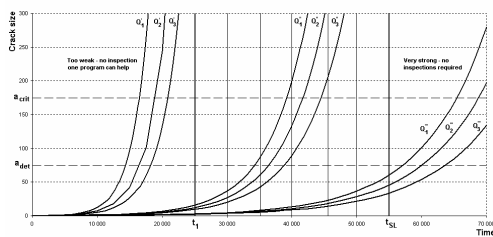
Elementu skaits kopā  $\vec{d}_L$  un, attiecīgi,  $D_L$  dimensija var mainīties atkarībā no modelējamās situācijas un izvirzītajām prasībām. Parametrs  $\theta$ , kurš nosaka vektora  $(T_d, T_c)$  c.d.f., arī ir vektors. Šajā darbā parametrs  $\theta$  aplūkots kā sastāvošs no piecām zemāk aplūkotām komponentēm pie nosacījuma, ka abiem plaisas modeļa parametriem ir gadījuma raksturs un tie pakļaujas normālsadalījumam :

$$\theta = [\theta_{0_{\ln C_c}}, \theta_{1_{\ln C_c}}, \theta_{0_{\ln Q}}, \theta_{1_{\ln Q}}, r], \quad \theta \in \Theta = \left\{ (-\infty, \infty); [0, \infty); (-\infty, \infty); [0, \infty); [0, 1] \right\},$$

kur  $\theta_0$  ir nobīdes koeficients, bet  $\theta_1$  ir mēroga koeficients attiecīgajam plaisu izplatīšanās modeļa parametram  $\ln C_c$  vai  $\ln Q$ ;  $r$  ir  $\ln C_c$  un  $\ln Q$  korelācijas koeficients. Pierādīts, ka šai lēmumu pieņemšanas procedūrai gadījuma lieluma  $\hat{P}_{f_{corrected}}$  matemātiskā cerība ir  $\theta$  funkcija, un šai funkcijai ir maksimums. Piemērs, kur visi parametri, izņemot  $\theta_{0_{\ln Q}}$  (plaisas izplatīšanās ātrums) ir konstantes, tiek demonstrēts 20. un 21. zīmējumos:



20. zīm. Koriģētais atteikuma varbūtības  $\alpha = const$  piemērs.



21. zīm. Minimaksa pieejas skaidrojums.

19. zīm. attēloti tikai mūs interesējošie matricas  $B$  elementi. Matrica  $B = N \cdot R$ ,  $N = (I - Q)^{-1}$ .

Protams, pāreja uz divkāršotu apskāšu biežumu (vai citu apskāšu programmas izmaiņu veikšana) iespējama arī gadījumā, kad tiks iegūta arī jebkura cita informācija par novecojošo lidmašīnu parku. Rezultātā

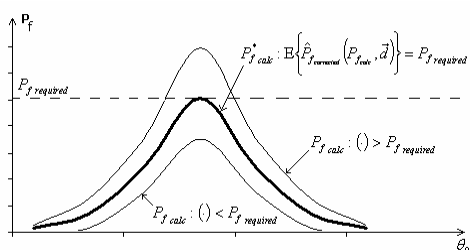
Ja pieņemt, ka parametri  $\theta_{1_{\ln Q}}, \theta_{1_{\ln C_c}}$  un  $r$  ir atkarīgi no tehnoloģijas, kura jaunai lidmašīnai paliek nemainīga, un šie parametri var tikt novērtēti, balstoties uz informāciju par iepriekšējām izstrādēm, tad paliek tikai divi nezināmie parametri  $\theta_{0_{\ln Q}}$  and  $\theta_{0_{\ln C_c}}$ . Tādējādi mēs iegūstam trīsdimensionālu attēlu funkcijai  $P_f = P_f(\theta_{0_{\ln Q}}, \theta_{0_{\ln C_c}})$ , kurai ir maksimums.

Apzīmēsim aprēķinos izmantojamo atteikuma varbūtības vērtību (lai izvēlētos nepieciešamo apskāšu skaitu vai izvēlētos vektoru  $\vec{t}$ ) ar  $P_{f_{calc}}$ . Atteikuma varbūtības

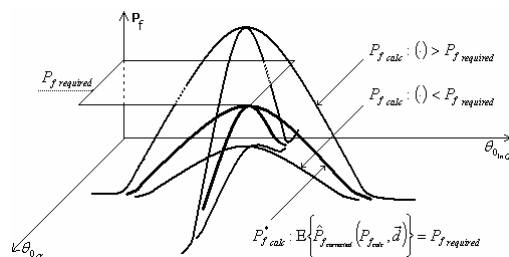
matemātiskās cerības vērtība kā  $\hat{\theta}$  funkcija tiek apzīmēta kā  $E\{\hat{P}_{f_{corrected}}\}$ . Lai to atšķirtu no  $P_{f_{calc}}$ , mēs to nosaucām par koriģēto (“corrected”). Ideja slēpjas tādas  $P_{f_{calc}}^*$  maksimālās vērtības iegūšanā, pie kuras  $E\{\hat{P}_{f_{corrected}}\}$  vērtība nepārsniegtu definēto atteikuma varbūtības ierobežojumu  $P_{f_{required}} = 1 - R_{required}$ , kur  $R_{required}$  ir vajadzīgais drošums.

$$P_{f_{calc}}^* : \tilde{P}(P_{f_{calc}}) \leq P_{f_{required}}, \text{ kur } \tilde{P}(P_{f_{calc}}) = \max_{\theta} \left( E_{\theta} \left\{ \hat{P}_{f_{corrected}} \right\} \right).$$

Šādas pieejas atspoguļojums, kad viens no parametriem  $\theta_0 = const$ , ir aplūkojams 22. zīmējumā, bet vispārīgāks gadījums – 23. zīmējumā:



22. zīm. Minimaksa pieejas piemērs  
( $\alpha = const$  vai  $\ln Q = const$ )



23. zīm. Minimaksa pieejas piemērs  
(vispārējs gadījums)

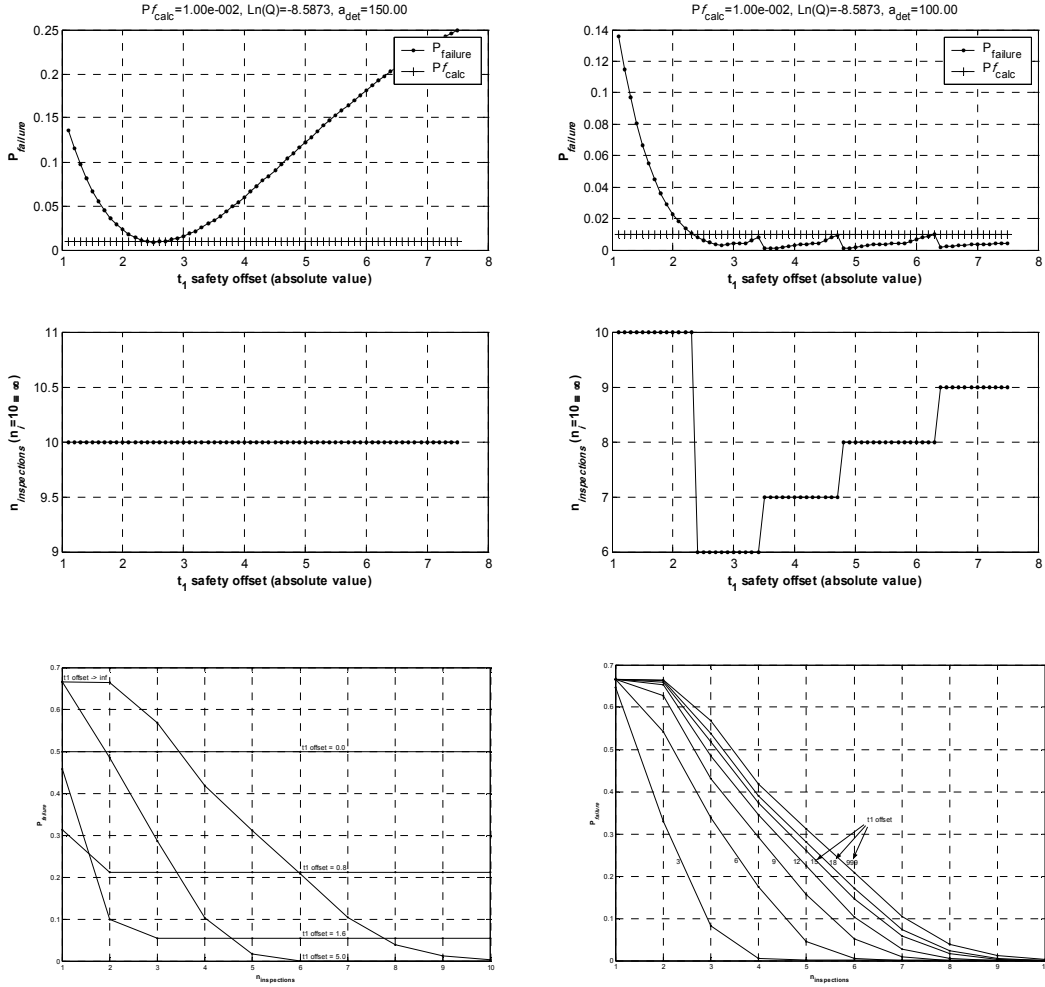
## 8. Trešā nodaļa

Šī nodaļa satur izmēģinātāja “darba vietas” (experimenter’s workplace, EW) aprakstu. Ir izveidoti divi EW varianti: izmantojot tabulu procesoru Excel un izmantojot programmu komplektu Matlab. Excel versija ir vienkāršāka un vairāk piemērota studentiem, lai apgūtu tās darbības principus: tā izmanto mazāku parametru skaitu un ļauj aplūkot aprēķinu rezultātus reālā laika režīmā, taču tai ir ierobežota funkcionalitāte. Versija, kas radīta pielietojot Matlab, ir krietni ražīgāka un tai nav Excel versijai piemītošo ierobežojumu, taču tā prasa Matlab programmatūras pamatzināšanas gadījumā, ja nepieciešams mainīt sistēmas parametrus. Visi šajā darbā aplūkojamie rezultāti tika iegūti ar minēto EW palīdzību. Trešajā nodaļā tiek dots pilnīgs visu EW moduļu iekšējās struktūras, algoritmu un darbības loģikas apraksts.

## 9. Ceturtā nodaļa

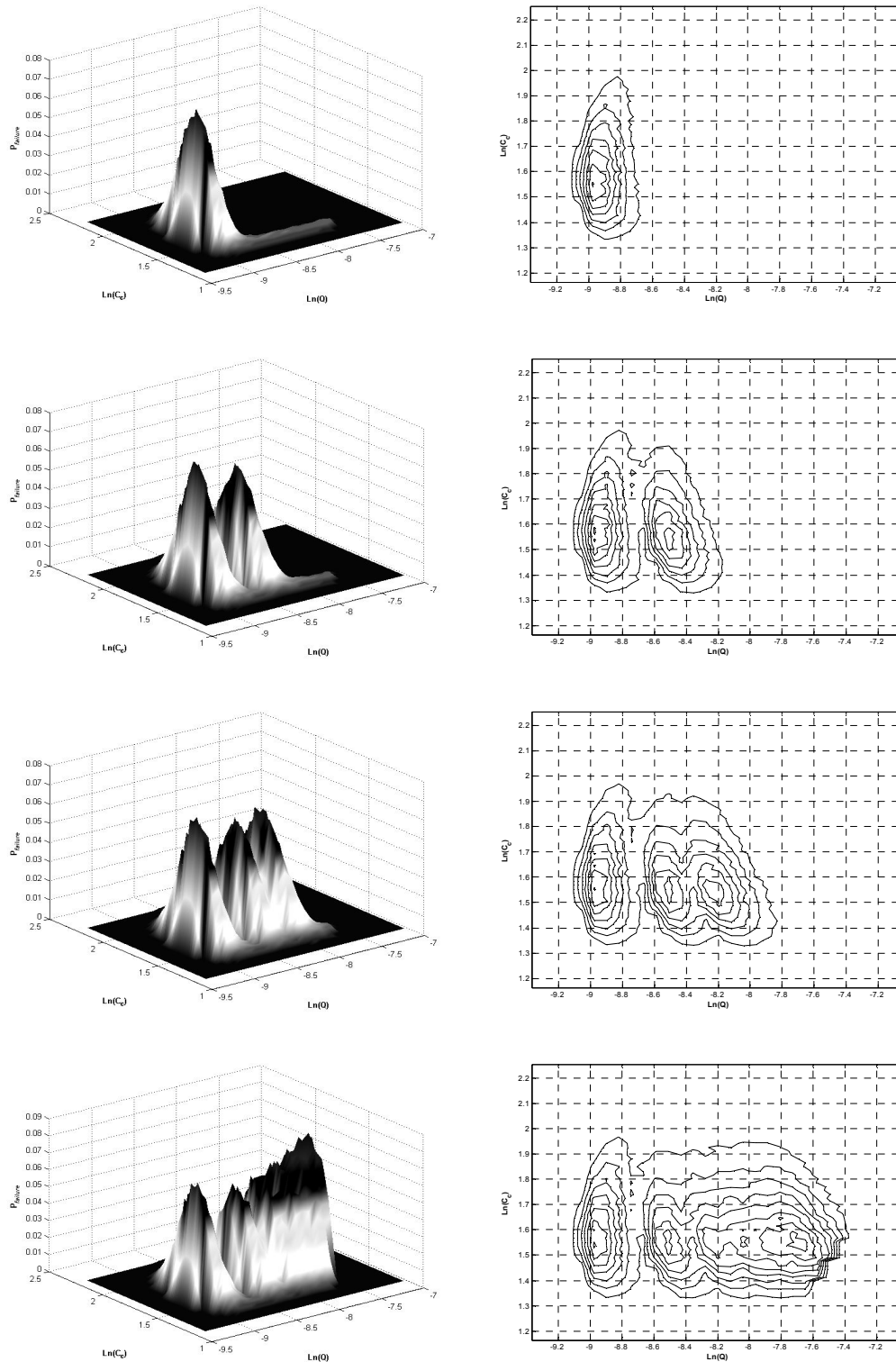
Šajā nodaļā piemēru veidā tiek demonstrēti izstrādātā programmdrošinājuma pielietošanas rezultāti. Turpinājumā tiek aplūkoti dažī iegūtie grafiki (bez rezultātu datus saturošām tabulām).

Pirmās apskates veikšanai optimālā laika momenta  $t_1$  izvēles ilustrācija. Redzams, ka šajā gadījumā optimālā nobīdes vērtība atrodas diapazonā [-3.3; -2.4]:

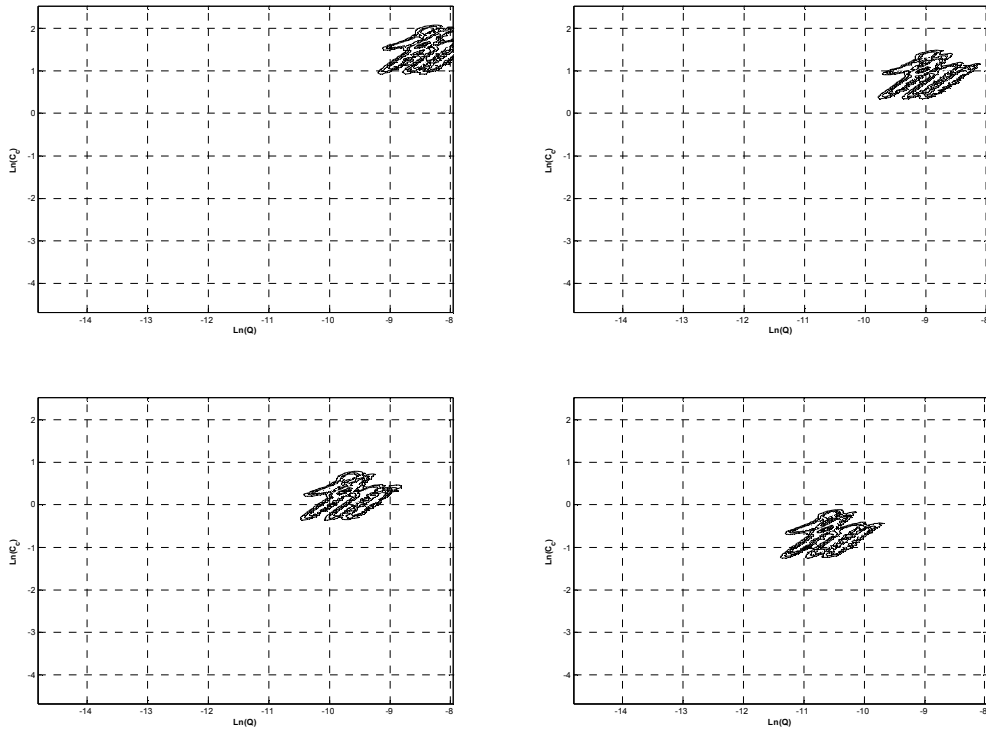


Optimālas  $t_1$  vērtības izmantošana ļauj izmantot minimālo iespējamo apskāšu skaitu konkrētajam apskāšu programmu tipam.

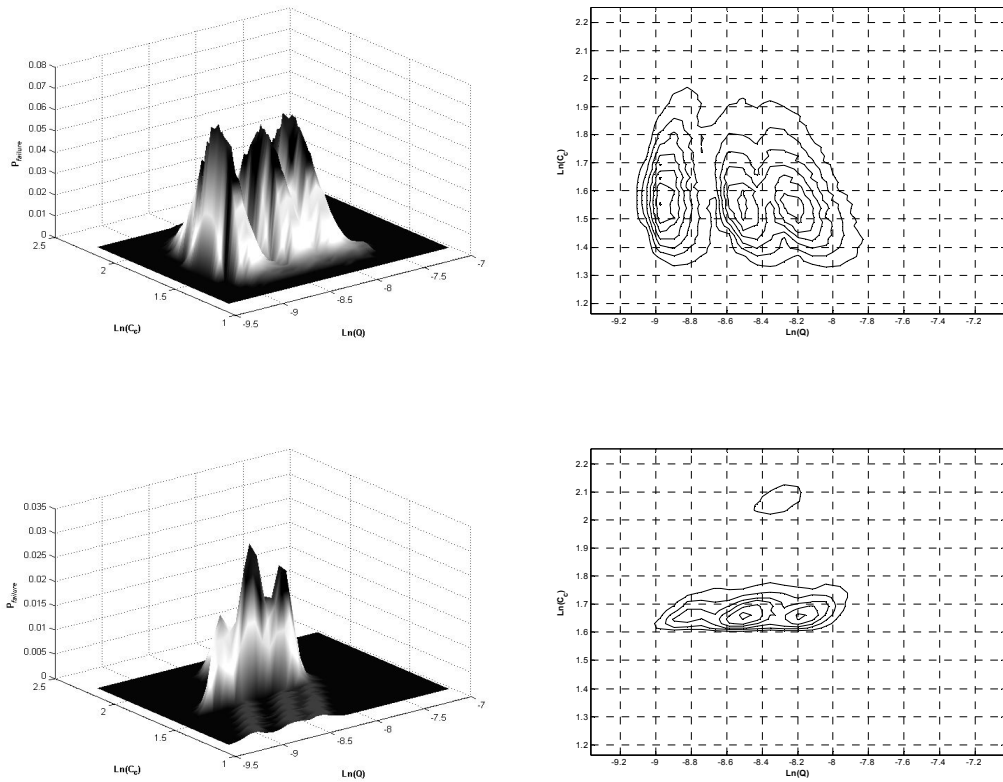
Atsevišķu funkcijas  $P_{f_{corrected}}$  īpatnību ilustrācija: redzams, ka tai ir vairāki ekstrēmi (pie nelielām  $n_{max}$  vērtībām to skaits vienāds ar  $n_{max}$ , pie lielām  $n_{max}$  vērtībām atsevišķi ekstrēmi sāk saplūst); šī fakta pārziņāšana ļauj optimizēt globālā maksimuma atrašanas metodiku:



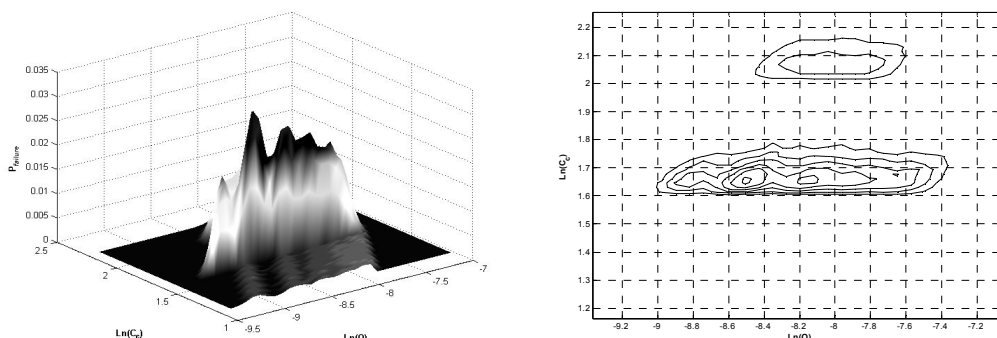
Globālā maksimuma novietojums atkarīgs no izmantojamās apskašu metodikas (maksimums nobīdās, mainot  $a_{\text{det}}$  vērtību); šīs īpašības izmantošana ļauj prognozēt maksimuma novietojumu, mainot apskašu metodiku:



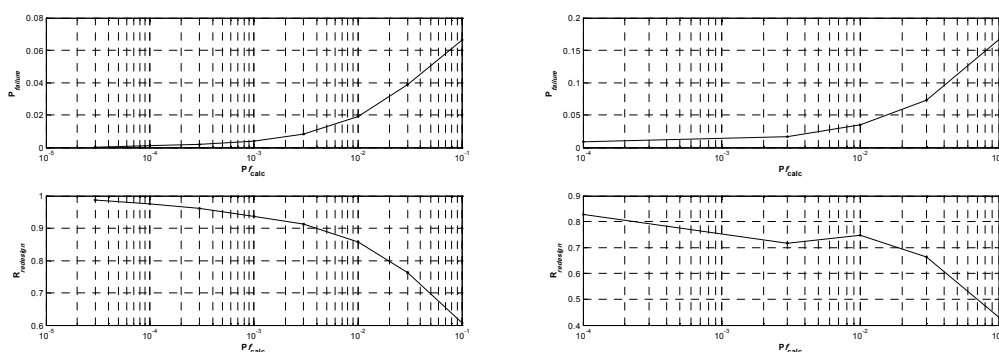
Īpašā veidā izvēlēta  $t_1$  vērtība “nogludina” funkciju salīdzinājumā ar vienmērīgi sadalītu apskašu laika momentu variantu:



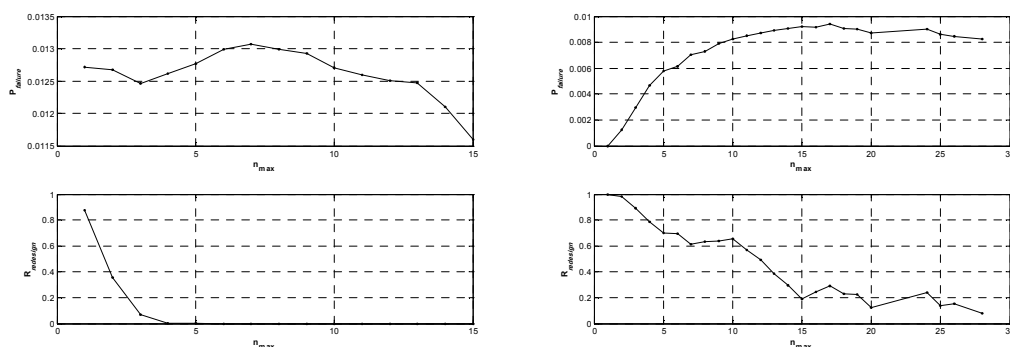
Visi apskašu programmu tipi, izņemot vienmērīgi sadalītu apskašu momentu gadījumu, var radīt pētnieku maldinošas “harmonikas” – lokālu ekstrēmu komplektu, kas parasti atkārtu globālā ekstrēma formu:



Attiecības  $P_{f\_corrected} / P_{f\_calc}$  vērtība atkarīga no  $P_{f\_Lcalc}$  absolūtās vērtības visiem apskašu programmu tiem: jo mazāks pēc absolūtās vērtības nepieciešamais atteikuma varbūtības ierobežojums, jo ar lielāku rezervi nākas izvēlēties  $P_{f\_calc}$ . Atkarība variantam ar īpašu  $t_1$  ir uzrādīta zemāk kreisajā pusē, variants ar vienmērīgu apskašu laika momentu sadalījumu – labajā pusē:



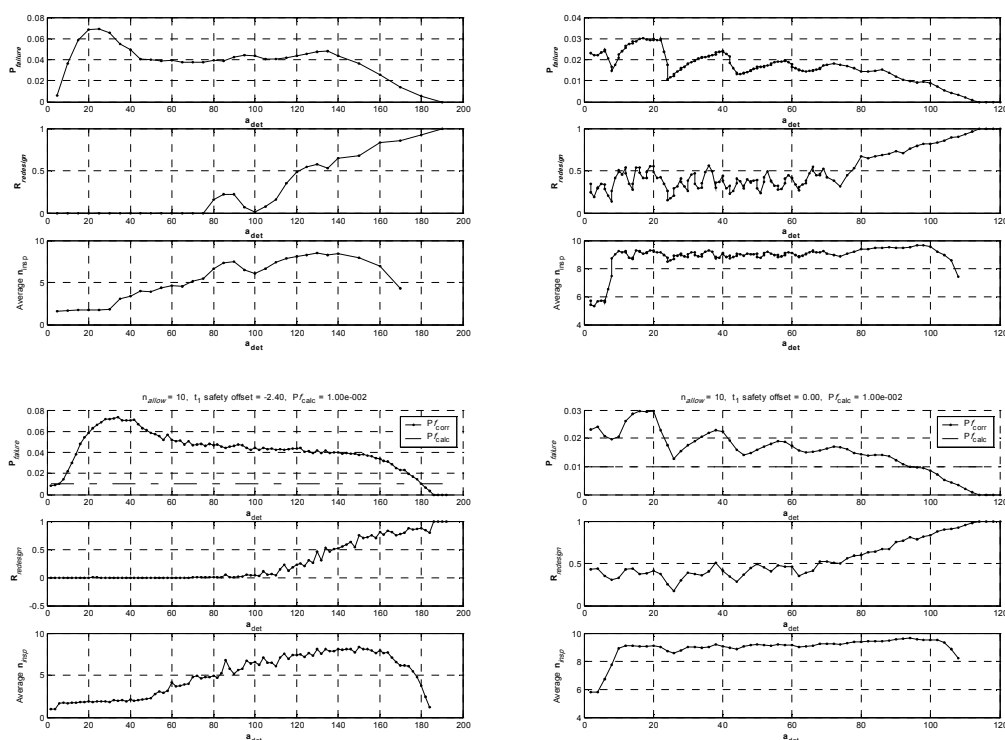
Apskašu programmām ar relatīvi mazu  $n_{max}$  vērtību  $P_{f\_corrected}$  atkarība no pašas  $n_{max}$  var būt nemonotona funkcija. Atkarība variantam ar īpašu  $t_1$  ir uzrādīta zemāk kreisajā pusē, variants ar vienmērīgu apskašu laika momentu sadalījumu – labajā pusē:



Redzams, ka atsevišķos gadījumos apskašu skaita palielināšana var izraisīt atteikuma varbūtības pieaugumu.



Apskašu programmām ar relatīvi mazu  $n_{\max}$  vērtību  $P_{f_{corrected}}$  atkarība no  $a_{det}$  arī var būt nemonotona funkcija. Atkarība variantam ar īpašu  $t_1$  ir uzrādīta zemāk kreisajā pusē, variants ar vienmierīgu apskašu laika momentu sadalījumu – labajā pusē:



## 10. Kopsavilkums

- Veiktā darba rezultātā radīti jauni matemātiskie modeļi, kas ļauj optimizēt nogurumam pakļauto lidmašīnas korpusa konstrukcijas nesošo elementu apskašu programmu; atšķirībā no citām, piedāvātā pieeja izriet no Perisa modeļa (noguruma plaisas izplatīšanās līknei) eksponenciālās versijas ar diviem gadījuma rakstura parametriem – ekvivalento sākotnējo izmēru un izplatīšanās ātrumu (logaritmiskajā mērogā), pie kam ar savstarpējās korelācijas koeficientu atšķirīgu no nulles.
- Iepriekšminēto modeļu realizācijas nolūkā izstrādāts modulāra programnodrošinājuma komplekss, kas ir ne vien instruments, bet arī specializēts poligons, kas ļauj noteikt apskašu programmu parametrus pie vairāk nekā 30 dažādām mainīgo un parametru vērtībām. Programmu komplekss realizē piecas dažādas atslēdzamas optimizācijas aprēķinu funkcijas, balstītas uz modeļa specifisko īpatnību pārzināšanu. Realizēta modelēšanas rezultātu uzkrāšanas iespēja turpmākai izmantošanai (papildināmā datu bāze). Visi galvenie grafiskie rezultāti var tikt piedāvāti gan modelēšanai, gan drukāšanai ērtā veidā; realizēta atslēdzama funkcija rezultātu n-punktu interpolācijai un atslēdzama iespēja vidējot rezultātus, kas iegūti pie vienādām modelēšanas parametru vērtībām. Paredzēta iespēja veikt pakešu režīma modelēšanu ar četriem dažādiem argumentu komplektu secību formēšanas veidiem. Programmu kompleksam raksturīga atvērta modulāra struktūra, papildus funkciju realizācijai to var papildināt ar jauniem moduļiem.
- Izmantojot radīto programmu kompleksu, veikta dziļa un plaša piedāvātā modeļa izpēte, noskaidrojot atsevišķas tā uzvedības īpatnības, kas, savukārt, ļāva optimizēt paša programmu kompleksa darbību. Pētījumu un modelēšanas rezultātā tika piedāvāta jauna pirmās apskates veikšanas laika momenta noteikšanas metodika, kas ļauj noteikt minimāli iespējamo apskašu skaitu konkrētam apskašu programmas veidam. Visi

iegūtie rezultāti ir uzskatāmi un, izmantojot reālus datus, dod ticamus, teorētiski sagaidāmus rezultātus.

- Izmantojot izveidoto programmu kompleksu, tika izpētīta iespēja pārejai uz alternatīvu apskašu programmu, ekspluatācijas gaitā īstenojoties noteiktiem atgadījumiem; nodemonstrēts, ka pat vienkāršākais gadījums ar pāreju uz atlikušās lidmašīnu parka daļas divkāršotu apskašu biežumu pēc pirmās noguruma plaisas atklāšanas, ļauj parka mērogā samazināt kopīgo vidējo apskašu skaitu.

## 11. Pielikumi

Galvenie pielikumos iekļautie dati: skaitliskajos piemēros izmantotie eksperimentālie noguruma dabīgo izmēģinājumu dati; visu datu bāžu struktūras ar aprakstiem; īsas izstrādātā programmnodrošinājuma lietotāja instrukcijas; programmu izejas teksti; vairāki detalizēti skaitliskie piemēri; īsa programmnodrošinājuma lietotāja saskarnes demonstrācija.

## 12. Publikāciju saraksts

1. Y. Paramonov, A. Kuznetsov. Fatigue crack growth parameter estimation by processing inspection results // In: Scientific proceedings of Riga Technical University – Transport and Engineering – Issue #6/6 – Riga, 2001 – pp. 6-17.
2. Kuznetsov A. S., Paramonov Yu. M. Airframe inspection program development using adjustment of required failure probability // Mašīnzinātne un transports, sērija 6. sējums 8, Transports, Aviācijas transports, izdevniecība RTU, Rīga, 2002 – 110-117 lpp.
3. Paramonov Yu. M., Kuznetsov A. S. Fatigue crack growth parameter estimation by processing inspection results // Proceedings of Third International Conference on Mathematical Methods in Reliability (MMR2002), Methodology and Practice. – Trondheim, Norway, 2002, NTNU – pp. 505-508.
4. Paramonov Yu. M., Kuznetsov A. S. Inspection data use for inspection program development // Transport and Telecommunication Institute.v.4, #2, Riga, 2003 – pp.101-107.
5. Kuznetsov A., Paramonov Yu. Switching to doubled aircraft inspection frequency strategy analysis for exponential fatigue crack growth model // Mašīnzinātne un transports, sērija 6. sējums 13., Transports, Aviācijas transports, izdevniecība RTU, Rīga, 2003 – 23-31 lpp.
6. Paramonov Yu. M., Kuznetsov A.S. Inspection data use for airframe inspection interval correction // Aviation, Issue #6 – Vilnius, Technika, 2002 – pp.109-116.
7. Yuri M. Paramonov, Andrey S. Kuznetsov. Inspection data use for inspection program development // Abstracts of International Conference “Reliability and statistics in transportation and communication (RelStat’02)” – Riga, Latvia, 17–18 October 2002 – p. 25.
8. Kuznetsov A., Paramonov Yu. Switching to doubled aircraft inspection frequency strategy analysis for exponential fatigue crack growth model // In the book “Longevity, Ageing and Degradation Models in Reliability, Medicine and Biology”, Volume 1, pp.143-154 – St. Petersburg, Russia, 2004.
9. A. Kuznetsov, Yu. Paramonov. Investigating doubled aircraft inspection frequency strategy for exponential fatigue crack growth model // In: Fourth International conference “Mathematical Methods in Reliability (MMR2004)” – Santa Fe, New Mexico, USA, 21-25 June 2004.
10. A. Kuznetsov, Yu. Paramonov. Using of P-set function for aircraft inspection program development for exponential fatigue crack growth model. // Book of abstracts of Sixth International Seminar on Recent research and design progress in aeronautical engineering and its influence on education – Riga, Latvia, October 14-16, 2004, – p.26.

11. Paramonov Yu., Kuznetsov A. Using of p-set function for airframe inspection program development // Proceedings of the International Symposium on Stochastic models in reliability, safety, security and logistics. 15-17 February 2005, Beer Sheva, Israel – pp. 280-283.
12. Paramonov Yu., Kuznetsov A. Planning of inspection program of fatigue-prone airframe. // Proceedings of International scientific school “Modelling and analysis of safety and risk in complex systems MASR2005” – Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia, June 28-July 1 2005 – pp. 390-396.
13. Y. Paramonov, A. Kuznetsov. Inspection program development for fatigue crack growth model with two random parameters. // Abstracts of International Conference “Reliability and statistics in transportation and communication (RelStat’05)” – Riga, Latvia, 13–14 October 2005 – p. 97.

### **13. Dalība konferencēs, simpozijos un nolasītie referāti**

1. The third International conference on Mathematical Methods in Reliability MMR2002 – Trondheim, Norway, 17-20 June 2002.
2. RTU Conference “Production Engineering and Transport” – Riga, Latvia, 10 October 2002.
3. International scientific conference “Reliability and Statistics in Transportation and Communication RelStat’02” – Riga, Latvia, 17-18 October 2002.
4. RTU 44<sup>th</sup> International scientific conference – Riga, Latvia, 17-18 December 2003.
5. The third International conference on Longevity, Ageing and Degradation models in Reliability, Medicine and Biology LAD2004 – St. Petersburg, Russia, 7-9 June 2004.
6. Fourth International conference on Mathematical Methods in Reliability MMR2004 – Santa Fe, New Mexico, USA, 21-25 June 2004.
7. Conference “Diagnosis of technical systems, numerical and physical non-destructive quality testing – 2004” – Vilnius, Lithuania, 23 April 2004.
8. Starptautiskā zinātniskā konference “Reliability and Statistics in Transportation and Communication RelStat’04” – Riga, Latvia, 14-15 October 2004.
9. Sixth international seminar on Recent research and design progress in aeronautical engineering and its influence on education – Riga, Latvia, 14-16 October 2004.
10. International Symposium on Stochastic models in reliability, safety, security and logistics – Beer Sheva, Israel, 16-18 February 2005.
11. International conference “Modelling and analysis of safety and risk in complex systems MASR2005” – St. Petersburg, Russia, 28 June – 1 July 2005.
12. The fifth International conference “Reliability and statistics in transportation and communication RelStat’05” – Riga, Latvia, 13-14 October 2005.
13. RTU 46<sup>th</sup> International scientific conference – Riga, Latvia, 13-15 October 2005.