

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte  
Aeronautikas institūts

**Sergejs TRETJAKOVŠ**  
Doktora studiju programmas “Transports” doktorants

**GAISA KUĢU PARKA DROŠUMS UN  
GAISA KUĢA AIZTĀŠANĀS PROBLĒMA**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
Profesors *Dr. habil. sc. ing.*  
**J. PARAMONOVŠ**

**RTU Izdevniecība**  
**Rīga 2016**

Tretjakovs S. Gaisa kuģu parka drošums un  
gaisa kuģa aizstāšanas problēma. Promocijas  
darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība,  
2016. – 44 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU promocijas padomes  
P-22 2016. gada 10. marta lēmumu, protokols  
Nr. 1/2016.

**ISBN 978-9934-10-817-4**

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2016. gada 9. jūnijā Rīgas Tehniskās universitātes Aeronautikas institūtā, Lomonosova ielā 1A, k-1, 218. auditorijā.

### OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Vladimirs Šestakovs  
Rīgas Tehniskā universitāte

*Dr. sc. ing.* Rafal Chatys  
Kelces Tehnoloģiju Universitāte, Polija

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Nikolajs Nečvaļs  
Latvijas Universitāte

### APSTIPRINĀJUMS

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

Sergejs Tretjakovs .....(Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, pielikumus, 49 attēlus un 6 tabulas, kopā 140 lappuses. Literatūras sarakstā ir 61 nosaukums.

## SATURS

<b>DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS.....</b>	<b>5</b>
Tēmas aktualitāte.....	5
Pētījuma mērķis.....	6
Pētījuma uzdevumi.....	6
Pētījumā izmantotās metodes un līdzekļi.....	6
Aizstāvamās tēzes.....	7
Pētījuma novitāte.....	7
Pētījuma rezultāti.....	8
Praktiskā vērtība.....	8
Darba rezultātu aprobācija.....	8
Uzstāšanās starptautiskās konferencēs.....	8
Publikācijas periodiskajos izdevumos.....	9
Darba struktūra.....	10
<b>DARBA SATURS.....</b>	<b>12</b>
1. nodaļa. Problēmas vēsture.....	12
2. nodaļa. Eksploatēto sistēmu drošums un apkopes stratēģijas.....	13
3. nodaļa. Pārbaudes programmas izstrāde.....	14
3.1. Sākotnējie dati.....	14
3.2. Viena gaisa kuģa atteices varbūtības aprēķins, ja parametrs $\theta$ ir zināms.....	14
3.3. Noguruma atteices varbūtība gaisa kuģu parkā, ja parametrs $\theta$ ir zināms.....	15
3.4. Risinājums, ja parametrs $\theta$ ir nezināms, <i>p-set</i> funkcija.....	18
<b>3.4.1. Risinājums vienam gaisa kuģim, ja parametrs <math>\theta</math> ir nezināms.....</b>	<b>18</b>
<b>3.4.2. Risinājums gaisa kuģu parkam, ja parametrs <math>\theta</math> ir nezināms.....</b>	<b>19</b>
3.5. Noguruma atteices varbūtība gaisa kuģu parkā, ja parametrs $\theta$ ir nezināms.....	21
Skaitlisks piemērs.....	23
4. nodaļa. Drošuma aizstāšanas problēma.....	27
Skaitlisks piemērs.....	32
Pielikums.....	37
<b>SECINĀJUMI.....</b>	<b>38</b>
Turpmākās izpētes virziens.....	39
<b>Izmantotās literatūras un avotu saraksts.....</b>	<b>40</b>

## DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS

### Tēmas aktualitāte

Mūsdienu gaisa kuģu konstrukcijas lielākoties izgatavo no metāla elementiem, tomēr bieži tiek izmantoti modernie kompozītmateriāli. Gaisa kuģa apkalpošana ir saistīta ar metāla elementu (īpaši dažādu alumīnija sakausējumu) īpatnībām, kuras ietekmē ārējais spriegums.

Sprieguma ciklu rezultātā gaisa kuģa konstrukcijas noguruma apdraudētajās vietās izveidojas noguruma plaisas, tādējādi samazinot konstrukcijas izturību. Šīs problēmas dēļ ir notikuši daudzi aviācijas negadījumi. Gaisa kuģa noguruma apdraudētā konstrukcijas izturība un nepieciešamā drošuma līmeņa nodrošināšana ir aktuāla problēma jau kopš pagājušā gadsimta 50. gadiem.

Lai sasniegtu nepieciešamo drošuma līmeni, tika izstrādātas dažādas problēmas risināšanas metodes. *Safe-life* pieeja pieprasa noteikt strukturāli nozīmīgā elementa (*structurally significant item (SSI)*) kalpošanas laiku. Šajā kalpošanas laikā ir jānodrošina nepieciešamais drošuma līmenis. *Fail-safe* paņēmiens pieprasa veikt inspekciju ar mērķi atklāt noguruma plaisu, pirms tā sasniedz kritisko izmēru.

Noteiktais kalpošanas ilgums ir jāizvērtē, pieņemot, ka ekspluatācija notiek vissliktākajos apstākļos, tomēr liela daļa no gaisa kuģu konstrukcijām netiek pakļautas vissliktākajiem apstākļiem, rezultātā rodas ekonomiski zaudējumi. Dokumentā MSG-3 ir aprakstīta noguruma ietekmēta gaisa kuģa konstrukcijas inspekcijas programmas izstrādes metodika. Dokumenta MSG-3 izstrāde ir liels solis uz priekšu šīs problēmas risināšanā, tomēr daži statistiskie parametri vēl joprojām netiek ņemti vērā. Pastāvošajā metodoloģijā vēl joprojām tiek ņemts vērā izturības sadales likums, kas tiek uzskatīts par zināmu lielumu, tādējādi ļaujot veikt varbūtības aprēķinus. Šajā konkrētajā metodoloģijā, kas aprakstīta MSG-3 dokumentos, kā arī citos, tiek ņemti vērā noguruma plaisas izaugsmes parametri: plaisas parādīšanās un tās attīstība. Plaisas parametri tiek novērtēti pieņemšanas noguruma izmēģinājuma laikā, kad tiek izlemts, vai gaisa kuģa ekspluatācija tiek atļauta vai arī tas jāsūta uz pārprojektēšanu. Pēc tam tiek izmantots minimaksa paņēmiens, lai sasniegtu nepieciešamo drošuma līmeni, ekspluatējot gaisa kuģi ar dažādām gadījuma plaisām.

Tiek arī apsvērta problēma, kad labāk veikt detaļas nomaiņu, jo tās stāvoklis ar laiku pasliktinās. Tas ir *safe-life* laika noteikšanas problēmas ekonomisks vispārinājums. *Safe-life* pieeja ir neekonomiska pēc savas dabas, ir svarīgi uzzināt visizdevīgāko gaisa kuģa kalpošanas laiku. No otras puses, drošuma prasībās nosaka spēcīgus noguruma atteices intensitātes

ierobežojumus attiecībā uz nogurumam pakļauto gaisa kuģa konstrukciju. Šie abi nosacījumi ir jāņem vērā, lai noteiktu pareizu *safe-life* laiku.

Pastāvošajos risinājumos attiecībā uz pirmo uzdevumu netiek ņemta vērā informācijas apmaiņa par noguruma plaisas atklāšanu gaisa kuģu parkā un gaisa kuģa ekspluatācijas uzsākšanas intensitāti. Otrs risinājums atšķirībā no piedāvātajiem risinājumiem, piemēram, Hovarda algoritma, sistēmas (nosacīti sauktas par aviolīniju) ekonomiskās efektivitātes optimizēšana, izskatīta, ņemot vērā sistēmas atteices intensitātes ierobežojumus (atteices skaits laika vienībā).

### **Pētījuma mērķis**

Pētījuma mērķis ir izstrādāt inspekcijas programmas sastādīšanas metodiku noguruma plaisām pakļautam gaisa kuģu parkam. Vēl viens mērķis ir izstrādāt metodi, ar kuras palīdzību var noteikt, kad ir nepieciešams aizvietot detaļu, kura ar laiku nolietojas.

### **Pētījuma uzdevumi**

Lai pabeigtu pētījumu, ir nepieciešams atrisināt dotos uzdevumus.

- Izstrādāt gaisa kuģu parka atteices varbūtības aprēķinu metodi, apsverot:
  - a) noguruma plaisu atklāšanas informācijas apmaiņu;
  - b) gaisa kuģu ekspluatācijas sākšanas intensitāti;
  - c) cilvēcisko faktoru;
  - d) funkciju, kas nosaka plaisas atklāšanas varbūtību un plaisas izmēru.
- Izveidot līdzīga statistiska uzdevuma matemātisko analīzi, kad gaisa kuģu parka drošuma ietekmējošo parametru vietā tiek izmantoti šo parametru novērtējumi. Parametru novērtējumi tiek iegūti, apstrādājot pieņemšanas noguruma izmēģinājuma datus.
- Izstrādāt inspekcijas programmas plānošanas metodiku gaisa kuģu parkam, balstoties uz iepriekšējā uzdevuma rezultātiem.
- Izstrādāt aviolīniju ieguvuma un noguruma atteices intensitātes aprēķinu metodi.
- Izstrādāt metodi ekonomiski visefektīvākā risinājuma izvēlei, ņemot vērā noguruma atteices intensitāti.
- Izstrādāt modulāru programmatūru, lai īstenotu izstrādātās metodikas.
- Analizēt un aprēķināt skaitliskos piemērus.

### **Pētījumā izmantotās metodes un līdzekļi**

Promocijas darbs ir izstrādāts, izmantojot šādas analītiskās metodes:

- teorija par noguruma plaisas izplešanos gaisa kuģa konstrukcijā;
- varbūtību teorija;

- matemātiskā statistika;
- Montekarlo metode;
- vadāma Markova ķēde ar atlīdzību un Hovarda algoritmu;
- vizuālā programmēšana.

### **Aizstāvāmās tēzes**

Šajā pētījumā tiek piedāvātas metodes, kā plānot un izveidot gaisa kuģu parka inspekcijas programmas un kā noteikt gaisa kuģa aizstāšanas laiku. Tiek aprēķināti noguruma plaisas augšanas parametru novērtējumi, izmantojot visaptverošus konstrukcijas pieņemšanas noguruma izmēģinājumu datus.

Metodoloģija balstās uz Montekarlo simulācijām, Markova ķēdēm ar atlīdzību, Hovarda algoritmu un minimaksa pieeju.

Tiek izmantota *Matlab* skaitļošanas vide, lai izstrādātu datorprogrammu, kas ir nepieciešama aprēķinu veikšanai. Šo programmu var izmantot, lai izstrādātu zinātnisku pētījumu, kā arī to var izmantot universitātē, mācību procesā.

### **Pētījuma novitāte**

Pastāvošajām metodēm drošuma nodrošināšanai nogurumam pakļautām gaisa kuģa konstrukcijām piemīt vairāki trūkumi:

- a) gaisa kuģu parka atteices varbūtība tiek uzskatīta par gaisa kuģa atteices varbūtību ar vismazāko noguruma izturību. Tajā pašā laikā noguruma plaisu atklāšana gaisa kuģu parkā tiek uzskatīta par neatkarīgu notikumu. Pastāvošajos risinājumos netiek ņemts vērā, ka vismaz pēc vienas plaisas atklāšanas visā gaisa kuģu parkā tiek veikta ikviena gaisa kuģa tehniskā apkope, lai novērstu noguruma atteici;
- b) netiek ņemta vērā gaisa kuģu ekspluatācijas sākšanas intensitāte. Tas nozīmē, ka pastāvošajos aprēķinos par gaisa kuģa ekspluatācijas sākumu tiek pieņemts viens konkrēts brīdis;
- c) netiek uzskatīts, ka konstrukciju inspekcija, kas ir noteikta ar inspekciju programmu, tiek izveidota ar kādu varbūtību. Netiek ņemts vērā cilvēciskais faktors;
- d) plaisu atklāšanas varbūtības funkcija atkarībā no plaisas izmēra ir lēcienveida.

Šajā darbā ir atrisināti visi šie minētie trūkumi. Ir apskatīta optimālā laika izvēle novecojušā gaisa kuģa nomaiņai uz gaisa kuģi, kuram ir mazāks ekspluatācijas laiks, ar mērķi bezgalīgai sistēmas (aviolīnijas) darbībai. No literatūrā pieejamajiem risinājumiem tika iegūta

maksimālā ekonomiskā efektivitāte, bet netika ņemti vērā atteices intensitātes ierobežojumi. Uzdevumi ir risināti, ņemot vērā šos ierobežojumus.

### **Pētījuma rezultāti**

- Gaisa kuģu parka inspekcijas programmas metodes izstrāde tika paveikta, ievērojot minētās drošuma prasības, ņemot vērā visaptverošus pieņemšanas noguruma izmēģinājuma rezultātus. Šis risinājums nodrošina nepieciešamo gaisa kuģu parka drošumu neatkarīgi no gaisa kuģa nezināmā noguruma dzīves laika sadalījuma parametriem.
- Tiek atrisināta optimālā laika izvēle novecojušā gaisa kuģa nomainībai uz gaisa kuģi ar īsāku ekspluatācijas laiku, lai nodrošinātu bezgalīgu sistēmas (aviolinijas) darbību.
- Izstrādāts *Matlab* skripts, kuru var izmantot turpmākos zinātniskos pētījumos, kā arī to var izmantot izglītojošiem mērķiem.

### **Praktiskā vērtība**

Izstrādātie gaisa kuģu parka drošuma *fail-safe* pieejas un gaisa kuģa *safe-life* pieejas modeļi var būt izmantoti, lai izstrādātu gaisa kuģa inspekcijas programmu un noteiktu gaisa kuģa kalpošanas laiku vai aizstāšanas laiku, ņemot vērā šādus aspektus:

- pieņemšanas noguruma izmēģinājuma visaptverošie rezultāti;
- nepieciešams gaisa kuģu parka drošums vai pieļaujamā gaisa kuģa noguruma atteices intensitāte;
- ekonomiskie parametri: noguruma atteicas izmaksas, ekspluatācijas izmaksas, veiksmīgas ekspluatācijas ieguvums, jauna gaisa kuģa izmaksas u.c.

### **Darba rezultātu aprobācija**

Uzstāšanās starptautiskās konferencēs.

1. Reliability and Statistics in Transportation and Communication (RelStat 12), Latvija, Rīga, 2012. gada 17.–20. oktobris, “Reliability of Fleet of Aircraft”, S. Tretjakovs, J. Paramonovs.
2. Fifth International Conference on Scientific Aspects of Unmanned Mobile Objects (SAUMO), Polija, Demblina, 2013. gada 15.–17. maijs, “Reliability of Aircraft Fleet and Airline”, S. Tretjakovs, M. Hauka, J. Paramonovs.
3. Seventh International Workshop on Simulation, Itālija, Rimini, 2013. gada 21.–25. maijs, “Minimax Decision for Reliability of Aircraft Fleet and Airline”, J. Paramonovs, M. Hauka, S. Tretjakovs.



4. Riga Technical University 54<sup>th</sup> International Scientific Conference, Latvija, Rīga, 2013. gada 14.–16. oktobris, “Minimax Decision for Reliability of Aircraft Fleet with and without information exchange”, S. Tretjakovs, J. Paramonovs.
5. Reliability and Statistics in Transportation and Communication (RelStat 13), Latvija, Rīga, 2013. gada 16.–19. oktobris, “Planning of Inspection Interval to Provide Reliability of Fatigue-Prone Aircraft Using Result of Acceptance Fatigue Test”, J. Paramonovs, M. Hauka, S. Tretjakovs.
6. Eighth International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability (MIMAR), Anglija, Oksforda, 2014. gada 10.–12. jūlijs, “Minimax Inspection Program for Reliability of Aircraft Fleet and Airline”, M. Hauka, S. Tretjakovs, J. Paramonovs.
7. Riga Technical University 55<sup>th</sup> International Scientific Conference, Latvija, Rīga, 2014. gada 14.–17. oktobris, “Planning of Inspection Interval for Aircraft Fleet”, S. Tretjakovs, J. Paramonovs.
8. Eighth International Workshop on Simulation, Austrija, Vīne, 2015. gada 21.–25. septembris, “Modelling of Reliability of Aircraft Fleet and Airline. P-set and  $\lambda$ -set Functions”, J. Paramonovs, S. Tretjakovs, M. Hauka.
9. Riga Technical University 56<sup>th</sup> International Scientific Conference, Latvija, Rīga, 2015. gada 14.–16. oktobris, “Modelling of Reliability of Aircraft Fleet and Airline”, S. Tretjakovs, J. Paramonovs.

Publikācijas periodiskajos izdevumos.

1. Tretjakovs S., Paramonovs J. Reliability of Fleet of Aircraft. In: Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on “Reliability and Statistics in Transportation and Communication” (RelStat 12), 2012. gada 17.–20. oktobris, Rīga, Latvija, 116.–121. lpp. ISBN 978-9984-818 -49-8.
2. Paramonovs J., Tretjakovs S. Reliability of Fleet of Aircraft Taking into Account Information Exchange About the Discovery of Fatigue Cracks and the Human Factor. AVIATION. 2012, Sējums 16(4), 103.–108. lpp. ISSN 1648-7788 DOI: 10.3846/16487788.2012.753680.
3. Tretjakovs S., Hauka M., Paramonovs J. Reliability of Aircraft Fleet and Airline. In: Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Scientific Aspects of Unmanned Mobile Objects, 2013. gada 15.–17. maijs, Demblina, Polija, 86.–88. lpp. ISBN 978-83-63792-28-2.

4. Paramonovs J., Hauka M., Tretjakovs S. Minimax Decision for Reliability of Aircraft Fleet and Airline. In: Book of Abstracts of Seventh International Workshop on Simulation, 2013. gada 21.–25. maijs, Rimini, Itālija, 28.–286. lpp. ISSN 1973-9346.
5. Paramonovs J., Hauka M., Tretjakovs S. Planning of Inspection Interval to Provide Reliability of Fatigue-Prone Aircraft Using Result of Acceptance Fatigue Test. In: Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on “Reliability and Statistics in Transportation and Communication” (RelStat 13), 2013. gada 16.–19. oktobris, Rīga, Latvija, 39.–47. lpp. ISBN 978-9984-818-58-0.
6. Hauka M., Tretjakovs S., Paramonovs J. Minimax Inspection Program for Reliability of Aircraft Fleet and Airline. In: Proceedings of 8<sup>th</sup> International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability (MIMAR), 2014. gada 10.–12. jūlijs, Oksforda, Anglija, 120.–124. lpp.
7. Paramonovs J., Tretjakovs S., Hauka M. Inspection Program Development for an Aircraft Fleet and an Airline on the Basis of the Acceptance Fatigue Test Result. Transport and Telecommunication, 16. sējums 16, no 1, 2015., 1.–8. lpp. DOI 10.1515/ttj-2015-0001.
8. Paramonovs J., Tretjakovs S., Hauka M. Fatigue-Prone Aircraft Fleet Reliability Based on the Use of a P-set Function. Reliability: Theory & Applications, #01 (36), 10. sējums, marts, 2015., 40–49. lpp. ISSN 1932-2321.
9. Paramonovs J., Tretjakovs S., Hauka M. Binary Lambda-set Function and Reliability of Airline. Reliability: Theory & Applications, #03 (38), 10. sējums, septembris, 2015., 37.–42. lpp.. ISSN 1932-2321.
10. Paramonovs J., Tretjakovs S., Hauka M. Modelling of Reliability of Aircraft Fleet and Airline. P-set and  $\lambda$ -set Functions. In: Proceedings of Eighth International Workshop on Simulation, 2015. gada 21.–25. septembris, Vīne, Austrija.

### **Darba struktūra**

Promocijas darbs sastāv no ievada, 4 nodaļām, secinājumiem, izmantotajiem literatūras avotiem, kurus veido 61 nosaukums, un 3 pielikumiem. To ilustrē 49 attēli un 6 tabulas. Promocijas darba kopējais apjoms ir 140 lapas puses.

- Ievads — noguruma atteices negadījumu kopsavilkums un galvenās metodes, lai tos novērstu.
- 1. nodaļa — tiek apskatīta metālu noguruma vēsture. Problēmu risinājuma izstrādes metodika aviokatastrofām, kuras rodas metāla noguruma dēļ.

- 2. nodaļa — atteices izpratne un apkopes stratēģijas izstrāde, lai novērstu atteices. Tika apskatīta nesagraujošās kontroles metode un apkopes vadības grupas (MSG) izstrāde.
- 3. nodaļa — tika pētīts ekspluatētas sistēmas drošums. Tika pētīti apkopes koncepti un stratēģijas, piemēram, balstoties uz laiku, vecumu vai stāvokli. Katrai metodei ir savas priekšrocības un trūkumi. Šo tēmu izpēte palīdz pieņemt labāko lēmumu attiecībā uz gaisa kuģa konstrukcijas apkopes stratēģiju.
- 4. nodaļa — tiek izpētīts noguruma plaisas izplešanās modelis un tiek veikta šī modeļa parametru novērtēšana. Inspekcijas biežuma plānošanas metodikas izstrādāšana attiecībā uz plaisas parametriem, kuri ir zināmi. Tika izmantots minimaksa paņēmieni, lai iegūtu nepieciešamo drošuma līmeni pie nezināmajiem plaisu parametriem. Tika aprēķināti skaitliski piemēri, lai ilustrētu dažādu parametru ietekmi uz gaisa kuģu parka drošumu.
- 5. nodaļa — visrentablākās *safe-life* noteikšanas metodes izstrāde saskaņā ar noguruma atteices intensitātes ierobežojumiem. Tika aprēķināti skaitliski piemēri, lai ilustrētu metodes darbību.
- Secinājumi — tiek apskatīti galvenie darba rezultāti un turpmākās izpētes virziena piedāvājums.
- Pielikumi — tiek apskatīta gaisa kuģa parka noguruma atteices varbūtības aprēķins, atteices normāla sadalījuma gadījumam. *Matlab* skriptu izdrukas ar izstrādāto modulāro programmatūru. Iekļauts noguruma negadījumu saraksts ASV no 1982. gada līdz 2015. gadam.

## DARBA SATURS

### 1. nodaļa. Problēmas vēsture

1. nodaļa sniedz pārskatu pār aviācijas noguruma problēmām un problēmu risinājuma izstrādi. Saskaņā ar *G. S. Campbell* un *R. Lahey* darba “*A survey of serious aircraft accidents involving fatigue fracture*” informāciju pasaulē tika identificēti 1885 negadījumi, kas ir saistīti ar noguruma plaisām, laika posmā no 1927. gada līdz 1981. gadam, šo negadījumu rezultātā mirušas 2240 personas. Saskaņā ar *National Transportation Safety Board (NTSB)* informāciju laika posmā no 1982. gada līdz 2015. gadam ASV notika 1114 negadījumi, kas ir saistīti ar metāla nogurumu, šo negadījumu rezultātā gāja bojā 536 cilvēki.

Pirmā svarīgā izmeklēšana tikai veikta pēc “Comet” katastrofas (1953. gadā un 1954. gadā). Pirmais izstrādātais nogurumu problēmas risinājums tika saukts par *safe-life* paņēmieni. Šis paņēmienis izvirza prasību, kas nosaka, ka visām struktūras daļām, kuru atteices rezultātā var aiziet bojā gaisa kuģis, ir jābūt droši lietojamām iepriekš noteiktu laiku. Vēlāk tika izstrādāti *fail-safe* un bojājumu pielaides (*damage tolerance*) paņēmieni. Dažiem nozīmīgākajiem struktūras elementiem ir jāveic inspekcijas ar mērķi atklāt noguruma plaisu. Diemžēl neviens no šiem paņēmieniem nav ideāls, un noguruma atteice vēl joprojām ir daļa no aviācijas problēmām, piemēram, 2011. gadā tika atklātas plaisas “Airbus” spārna ribās. Pastāv daudz darbu, kuri ir veltīti metāla noguruma problēmu risināšanai un inspekcijas programmu izstrādei, piemēram, *B. Lundberg, F. H. Hooke, J. N. Yang, E. L. Zimont, V. Ya. Senik, V. V. Nikonov, V. S. Strelayev, N. N. Smirnov, V. S. Shapkin, V. M. Baykov, G. I. Nestrenko, H. B. Kordonsky, J. A. Martinov, G. S. Locmanov* un citu autoru darbi.

Visos šajos darbos tiek ņemta vērā noguruma plaisu izplešanās modeļa parametru gadījuma daba un inspekcijas paņēmieni, tomēr gala lēmuma pieņemšana un galvenokārt projekta pārprojektēšanas varbūtība var ietekmēt atteices varbūtību. Matemātiskā modeļa izstrāde dotajā virzienā ir atrodama *J. M. Paramonova* un *P. M. Soboleva* darbos. Izpēte tiek turpināta *N. M. Kimlika, A. Kuznecova, K. Nečvala* un *M. Hauka* darbos.

Šajā pētījumā tiek turpināts pētīt modeļa modernizāciju, iekļaujot iespējamu inspekcijas programmas izstrādi ne tikai atsevišķiem gaisa kuģiem vai aviolīnijām, bet gan gaisa kuģu parkiem ar atšķirīgu gaisa kuģu ekspluatācijas intensitāti. Tika izstrādāts visizdevīgākais *safe-life* laika aprēķina modelis, ņemot vērā noguruma atteices intensitātes ierobežojumus.

## 2. nodaļa. Eksploatēto sistēmu drošums un apkopes stratēģijas

2. nodaļā tiek paskaidrota aprīkojuma atteices izpratnes attīstība un plānotā apkope, novertējot inspektētās daļas stāvokli, vai var to turpināt ekspluatēt, un stāvokļa novērošanas apkopes lēmums. Skaidrs, ka ir jāveic gaisa kuģa strukturāli svarīgo elementu inspekcijas. Nepieciešams lietot nesagraujošās kontroles metodes ar mērķi atklāt iespējamo noguruma plaisu. Ir nepieciešama apkopes un izvērtēšanas noteikumu un apkopes vadība, tika izveidota MSG-1, MSG-2 un MSG-3 apkopes vadības grupa. MSG-3 apkopes process nodrošina augstus un efektīvus drošības standartus.

Tālāk ir aprakstīti profilaktiskās tehniskās apkopes lēmumi un tās matemātiskie modeļi. Aizstāšanas lēmums pieprasa veikt preventīvu nomaiņu dažādu iemeslu dēļ vai arī korektīvo nomaiņu atteices dēļ. Tiek pieņemts, ka aizstātā priekšmeta atteices sadalījuma funkcija ir tāda pati kā jaunajam.

Vecuma nomaiņas lēmums ir velītis detaļu (komponentu, sistēmu) nomaiņai, kad noteiktais darbības vecums  $t_0$  ir sasniegts, vai arī atteices gadījumā. Šis lēmums ir jāņem, ja priekšmeta atteices intensitāte pieaug līdz ar darbības laiku, un atteices nomaiņas izmaksas ir ievērojami augstākas nekā plānotās maināmās detaļas izmaksas.  $t_0$  vērtību var noteikt pēc izmaksas kritērija vai pēc pieejamības kritērija.

Bloku nomaiņas lēmums ir velītis detaļu (komponentu, sistēmu) nomaiņai regulārā laika intervālā ( $t_0, 2t_0, 3t_0, \dots$ ) neatkarīgi no vecuma. Galvenā bloka nomaiņas lēmuma priekšrocība ir tā administratīvā vienkāršība. Salīdzinājumā ar vecuma nomaiņas lēmumu te jāievēro tikai kalendāra laiks, nevis ekspluatācijas laiks, kopš pēdējās nomaiņas. No otras puses, gandrīz jaunus komponentus var aizvietot pēc plānotā nomaiņas laika. Šis lēmums ir jāņem, ja ir jāapkalpo liels skaits viena tipa elementu. Vecuma nomaiņas lēmuma izmaksu kritēriju var izmantot, lai iegūtu maksimālo ieguvumu, vai arī var izmantot pieejamības kritēriju, lai palielinātu stacionāro pieejamību.

Uz tehnisko stāvokli balstīta apkope ir arī pazīstama kā prognožu apkope, tas ir apkopes lēmums, kad darbība pēc apkopes tiek nolemta, balstoties uz elementa prognozējošā parametra degradācijas rezultātiem. Prognozējošais parametrs ir mainīgais, kas apliecina priekšmeta (komponenta, sistēmas) stāvokli. Tās var būt mainīgas fizikālās īpatnības, piemēram, spiediens, temperatūra, elektriskā pretestība utt., sistēmas veiktspējas mainīgais vai mainīgais, kas ir saistīts ar priekšmeta atlikušo dzīves ilgumu. Šis lēmums ir jāņem, ja priekšmeta atteices intensitāte pieaug līdz ar ekspluatācijas laiku.

Uz tehnisko stāvokli balstītai apkopei ir nepieciešams sistēmas nodilšanas procesa matemātiskais modelis. Elementa uzraudzība ar nepieciešamo mainīgā mērījumu ir vajadzīga, lai paredzētu priekšmeta atteici. Ir nepieciešams izprast defekta dabu, lai izvēlētos pareizu apkopes darbības tipu un darbību datumu. Lēmums tiek pieņemts, balstoties uz izmērīto mainīgo vērtību. Darbība ir jāveic, kad mainīgā vērtība pārsniedz iepriekš definēto robežvērtību. Dažādas, iepriekš definētas robežvērtības atbilst dažādiem apkopes lēmumiem, šāda veida principu sauc par kontroles robežu principu.

### 3. nodaļa. Pārbaudes programmas izstrāde

3. nodaļā ir aprakstīta inspekcijas programmas izstrādes metodika, kura tiek izmantota, lai nodrošinātu nepieciešamo drošuma līmeni.

#### 3.1. Sākotnējie dati

Tiek pieņemts, ka plaisas augšanas intervālu no detektējamā izmēra līdz kritiskam izmēram var aptuveni noteikt, izmantojot (4.1) vienādojumu

$$a(t) = \alpha \exp(Qt), \quad (3.1)$$

kur

$\alpha$  — ekvivalents sākotnējais plaisas izmērs;

$Q$  — plaisas izplešanās ātrums logaritmiskajā skalā.

Šo parametru aplēses var iegūt pēc visaptverošiem noguruma testa rezultātiem, izmantojot regresa analīzi. Šajā darba tiek izmantoti tradicionālie pieņēmumi, kas ir atrodami iepriekšējā M. Hauka pētījumā [38].

#### 3.2. Viena gaisa kuģa atteices varbūtības aprēķins, ja parametrs $\theta$ ir zināms

Attiecībā uz zināmo  $\theta$  pastāv divi lēmumi: 1) jauna tipa gaisa kuģis ir pietiekami labs, un šāda tipa gaisa kuģa ekspluatācija ir atļauta, 2) jauna tipa gaisa kuģa ekspluatācija nav atļauta, un ir jāveic gaisa kuģa pārprojektēšana. Pirmā lēmuma gadījumā ir nepieciešams definēt vektoru  $t = (t_1, \dots, t_n)$ , kur  $t_i$  ir  $i$ -tais inspekcijas laika brīdis. Ja  $\theta$  ir zināms, ir iespējams piedāvāt izvēlēties vektora  $t$  dažādas struktūras: 1) katrs intervāls starp inspekcijām ir vienāds ar konstanti  $d_t = t_{SL} / (n + 1)$ , kur  $t_{SL}$  ir gaisa kuģa norādītais dzīves ilgums (norakstīšanas laiks),  $n$  ir inspekciju skaits; 2) atteices stacionāras varbūtības (ar nosacījumu, ka noguruma atteice neradās iepriekšējā intervālā) jebkurā intervālā ir vienādas ar tām pašām vērtībām  $P(T_c < t_{SL}) / (n + 1)$ ... Šajā darbā mēs pieņemam pirmā tipa izvēli un vektoru  $t$  definē fiksēts  $t_{SL}$  un  $n$  izvēle.

Lai pamatotu inspekciju skaita izvēli, mums ir jāuzzina gaisa kuģa noguruma plaisas atklāšanas varbūtība kā plaisas izmēra  $a$  funkcija. Mēs pieņemam, ka šo varbūtību definē vienādojums:

$$p_d(a) = w_0 w(a), \quad w(a) = \begin{cases} 0, & \text{if } a \leq a_{d0}, \\ \frac{a - a_{d0}}{a_{d1} - a_{d0}}, & \text{if } a_{d0} < a < a_{d1}, \\ 1, & \text{if } a \geq a_{d1}. \end{cases} \quad (3.2)$$

kur  $a_{d0}, a_{d1}$  ir konstantes,

$w_0$  var uzskatīt par varbūtību veikt plānoto inspekciju (cilvēciskais faktors).

Ja novēroto plaisu skaits ir pietiekami liels, mēs varam novērtēt daļu no nepamanītajām plaisām salīdzinājuma ar visām plaisām kā atteices varbūtības novērtējumu izvēlētajai inspekciju programmai.

Šajā darbā ir ņemts vērā cilvēciskais faktors  $w_0$  un varbūtība atklāt plaisu saskaņā ar formulu (3.2). Atbilstošā konkrētā gaisa kuģa noguruma atteices vērtība fiksētam inspekciju skaitam  $n$  ir:

$$p_f(n) = \prod_{i=1}^n (1 - p_{di}(a_i)), \quad (3.3)$$

kur  $p_{di}$  —  $i$ -tās inspekcijas plaisas atklāšanas varbūtība.

Pēc tam mēs varam aprēķināt vidējo atteices varbūtības vērtību kā, piemēram, funkciju no inspekciju skaita  $n$ :

$$\hat{p}_f(n) = \frac{\sum_{i=1}^N p_{fi}(n)}{N}, \quad (3.4)$$

kur  $p_{fi}$  —  $i$ -tā gaisa kuģa atteices varbūtība.

### 3.3. Noguruma atteices varbūtība gaisa kuģu parkā, ja parametrs $\theta$ ir zināms

Mēs apsveram gadījumus, kad visu  $N$  gaisa kuģu darbība tiks pārtraukta, ja tiks atklāta kāda noguruma plaisa. Lai samazinātu noguruma atteices varbūtību gaisa kuģu parkā, pietiek atklāt tikai vienu noguruma plaisu, pirms notiek kāda gaisa kuģa atteice gaisa kuģu parkā.

Gadījumā, ja noguruma plaisas atklāšanas varbūtību definē (3.2) un  $a_{d0} = a_{d1}$ , atbilstošā varbūtība ir vienāda ar gadījuma mainīgā matemātisko ceŗību:

$$P_{fNW} = (1 - w_0)^R, \quad (3.5)$$

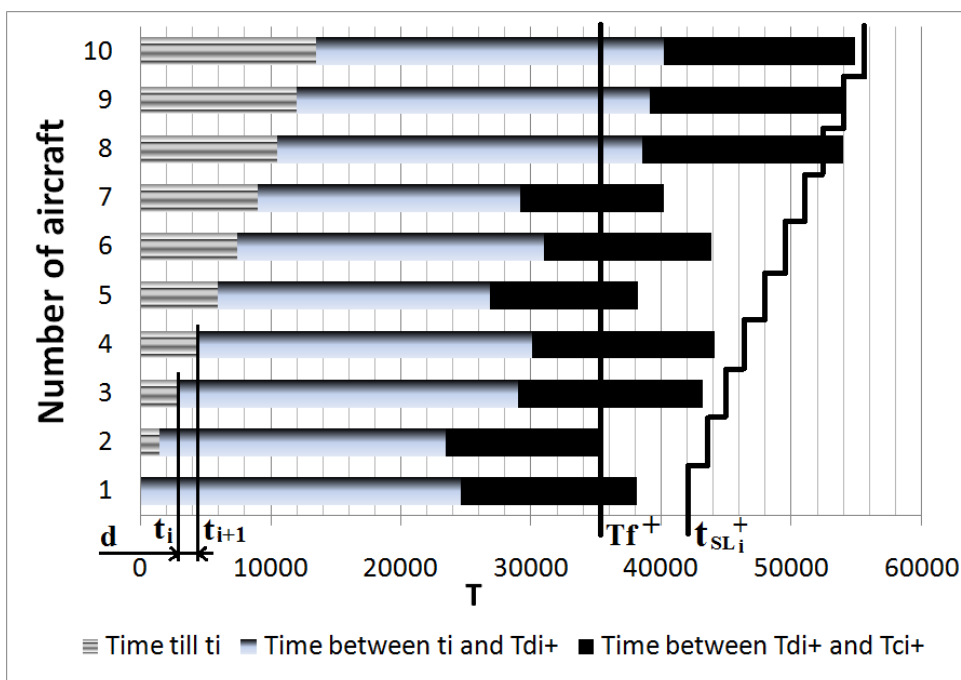
kur  $R$  ir kopējais inspekciju gadījuma skaits, pirms notiek pirmā atteice visā parkā.

$t_k^+, t_{k-1}^+ < t_k^+, t_0^+ = 0$  ir kalendāra laika brīdis, kad  $k$ -tais gaisa kuģis uzsāk ekspluatāciju,

$T_{dk}^+ = t_k^+ + T_{dk}$ ,  $T_{ck}^+ = t_k^+ + T_{ck}$ ,  $k=1,2,\dots,N$  ir gadījuma kalendāra laika brīdis, kad noguruma plaisa ir atklājama un attiecīgi notiek gaisa kuģa noguruma atteice (skatīt 1. att.). Un  $K_{SL} = \{k: T_{ck} < t_{SL}\}$ ,  $k=1,2,\dots,N$  ir gaisa kuģu indeksu kopa, kuru atteice var notikt, ja netiks veiktas inspekcijas,  $T_f^+ = \min\{T_{fk}^+ : k \in K_{SL}\}$ ,  $T_{fk}^+ = \min\{T_{ck}^+, T_f^+\}$ ,  $k \in K_{SL}$ ,

$$R = \sum_{k \in K_{SL}} R_k, \quad (3.6)$$

kur  $R_k = \max(\{[(T_{fk}^+ - t_k^+) / d_t] - [(T_{dk}^+ - t_k^+) / d_t]\}, 0)$ ,  $k \in K_{SL}$  ir gadījuma inspekciju skaits  $k$ -tajam gaisa kuģim no  $K_{SL}$  kopas, ja inspekcijas intervāls ir  $\Delta = t_{SL} / (n+1)$  (tas ir īpašs katra gaisa kuģa kalendāra inspekciju grafiks,  $i=1,2,\dots,n+1$ ,  $k \in K_{SL}$ ).



1. att.  $N$  gaisa kuģu ekspluatācija, ja  $a_{d0} = a_{d1}$ .

Gadījuma mainīgais  $Q$  ir noguruma plaisas izplešanās ātrums logaritmiskajā skalā. Tai ir specifiska realizācija katram gaisa kuģim un  $Q_1, \dots, Q_N$  ir neatkarīgie gadījuma mainīgie. Tātad vidējā atteices varbūtības vērtība gaisa kuģu parkam ir

$$E(P_{fNW}) = p_{fNW}(n, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} (1-w)^{r(q)} dF_{Q_1}(q_1) \dots dF_{Q_N}(q_N), \quad (3.7)$$

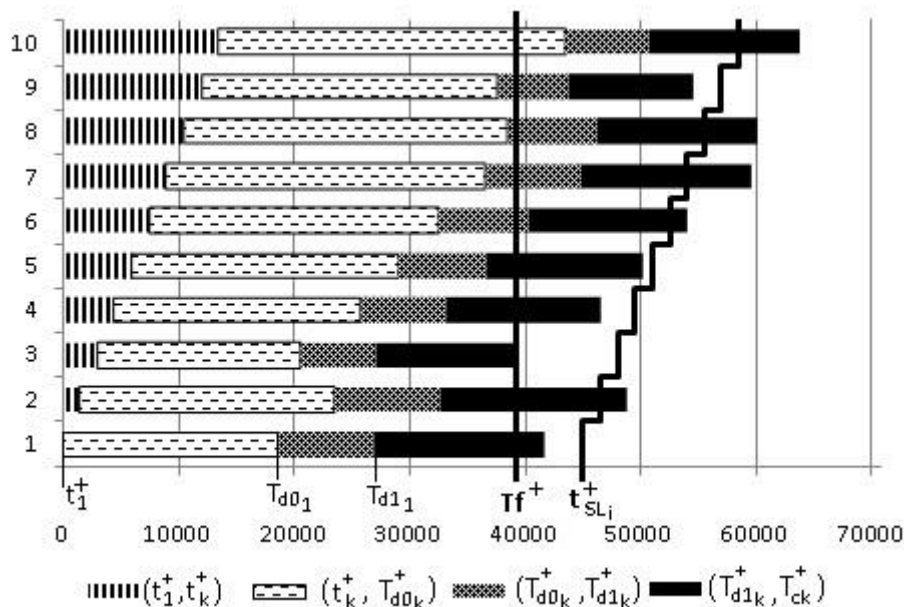
kur  $q = (q_1, \dots, q_N)$ ,  $r(q)$  ir gadījuma mainīgā  $R$  realizācija.

Lielam  $N$  skaita  $p_{fNW}$  aprēķinam atbilst Montekarlo metode. Ja šī funkcija ir zināma, tad inspekciju skaits  $n(p, \theta)$ , kas ir nepieciešams, lai samazinātu gaisu kuģu parka noguruma



atteices varbūtību ar vērtību  $p$ , tiek definēts ar funkciju  $n(p, \theta) = \min(r : p_{fNW}(r, \theta) \leq p \text{ visiem } r > n(p, \theta), r = 1, 2, \dots)$

Lai vispārīgi definētu funkciju  $p_d(a)$ , ir nepieciešams veikt detalizētāku analīzi.  $N$  gaisa kuģu ekspluatācija ir redzama 2. attēlā.



2. att.  $N$  gaisa kuģu ekspluatācija, ja  $a_{d0} \neq a_{d1}$ .

Atzīmējot ar  $t_{kj}^+$ ,  $k$ -tā gaisa kuģa ( $k \in K_{SL}$ ,  $j \in J_k$ ,  $k \in K_f$ )  $j$ -tās inspekcijas kalendāro laiku, kur  $J_k = \{j : t_{kj}^+ < T_{jk}^+, j = 1, 2, \dots\}$  ir  $k$ -tā gaisa kuģa inspekcijas indeksu kopums;  $t_{kj}^+ = t_k + jd_t$ ,  $j = 1, 2, \dots$ ,  $K_f = \{k : k \in K_{SL}, t_k^+ < T_f^+\}$ .

$q = (q_1, \dots, q_N)$  ir gadījuma vektora  $Q = (Q_1, \dots, Q_N)$  realizācija, un  $a_{jk} = \alpha \exp(q_k d_t j)$  ir noguruma plaisas izmērs  $k$ -tajam gaisa kuģim  $j$ -tajai inspekcijai, kuras izplešanos definē specifiska  $q_k$  vērtība, kura ir gadījuma mainīgā  $Q_k$  realizācija. Attiecīgā noguruma plaisas atklāšanas varbūtība ir  $p_{dkj} = p_d(a_{jk})$ . Pie specifiskas vektora  $q$  vērtības varbūtība, ka noguruma plaisa netiks atklāta, ir vienāda ar:

$$p_f(q) = \begin{cases} 0, & \text{if } K_f = \emptyset, \\ \prod_{k \in K_f} \prod_{j \in J_k} (1 - p_{dkj}). \end{cases} \quad (3.8)$$

Modelējot gadījuma vektoru  $Q$ , izmantojot Montkarlo metodi, varam aprēķināt šīs varbūtības vidējo vērtību:  $p(n, \theta) = E_\theta(p_f(q))$ . Tagad varam izvēlēties inspekcijas  $n(p, \theta)$  skaitu, lai atteices varbūtība būtu vienāda ar  $p$ .

### 3.4. Risinājums, ja parametrs $\theta$ ir nezināms, $p$ -set funkcija

Reālos apstākļos ir grūti iegūt parametra  $\theta$  novērtējumu ar vairāk vai mazāk uzticamu ticamības intervālu. Ļoti nelielu detaļu daudzumu var pārbaudīt laboratorijā, bet tas nav pietiekami. Šajā nodaļā atradīsim risinājumu gadījumā, ja  $\theta$  tiek uzskatīts par nezināmu parametru.

#### 3.4.1. Risinājums vienam gaisa kuģim, ja parametrs $\theta$ ir nezināms

Pirmkārt, mums ir jāņem vērā noguruma atteices varbūtības ierobežojuma problēma vienam gaisa kuģim ekspluatācijā, ja atklāšanas varbūtība ir aprakstīta ar formulu (3.2),  $a_{d0} = a_{d1}$ , un cilvēciskais faktors  $w_0 = 1$ . Tas nozīmē, ka, ja pastāv atklājama noguruma plaisa, tad inspekcijas laikā pēc  $T_d$  mēs to atklājam ar varbūtību 1, un gaisa kuģa noguruma atteices varbūtības ierobežojums tiek nodrošināts ar specifiskas  $p$ -set funkcijas izvēli. Ja jauna tipa gaisa kuģa noguruma laboratorijas testu rezultāti ir “pārāk slikti”, tas netiks nodots ekspluatācijā (pirms tam ir jāveic jauna tipa gaisa kuģa pārprojektēšana). Uzskatām, ka šajā gadījumā, ja  $\hat{\theta} \notin \Theta_0$ ,  $\Theta_0 \subset \Theta$  (piemēram,  $\hat{\theta} \notin \Theta_0$ , ja noguruma dzīves ilgums  $T_c$  ir mazāks nekā kāds no ierobežojumiem vai  $n(p, \hat{\theta})$  ir pārāk liels). Definēsim funkciju:

$$S(\hat{\theta}, \Theta_0, n) = \begin{cases} \bigcup_{i=1}^{n+1} S_i(n) & \text{if } \hat{\theta} \in \Theta_0 \\ \emptyset & \text{if } \hat{\theta} \notin \Theta_0 \end{cases}, \quad (3.9)$$

kur  $S_i = \{(t_d, t_c) : t_{i-1} < t_d, t_c \leq t_i\}$ ,

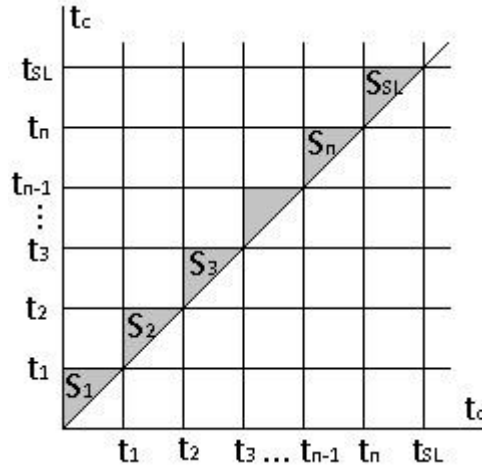
$$t_i = \frac{it_{SL}}{n+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n+1,$$

$\emptyset$  ir tukša kopa.

Autors sauc šo funkciju par bināro  $p$ -set funkciju, ja

$$\sup_{\theta} \sum_{i=1}^{n+1} P(Z \in S_i(n) \cap \hat{\theta} \in \Theta_0) = p. \quad (3.10)$$

Šeit ņemam vērā, ka, ja  $\hat{\theta} \notin \Theta_0$ , gaisa kuģa ekspluatācija nav atļauta un atbilstošā atteices varbūtība ir vienāda ar 0. Binārās  $p$ -set funkcijas vērtības piemērs ir redzams 3. attēlā.



**3. att. Viena gaisa kuģa  $p$ -set funkcijas vērtības piemērs.**

Var pierādīt, ka ļoti plašā lokā noteiktās  $\Theta_0$  kopas definīcija un prasības ierobežot gaisa kuģa noguruma atteices varbūtību ar  $p^*$  vērtību, kur  $(1 - p^*)$  ir nepieciešamais drošums, pastāv sākotnējā “projekta” gaisa kuģa noguruma atteices atļautas varbūtības izvēle  $p_{jd}$ , jo atbilstošā funkciju kopa  $S(\Theta_0, n(p_{jd}, \hat{\theta}))$  ir  $p$ -set funkcija  $p^*$  līmenim, vektoram  $Z = (T_d, T_c)$ . Vērtību  $p_{jd}$  definē vienādojums

$$\sup_{\theta} \sum_{i=1}^{n+1} P(Z \in S_i(n(p_{jd}, \hat{\theta})) \cap \hat{\theta} \in \Theta_0) = p. \tag{3.11}$$

Šim  $p_{jd}$  gaisa kuģa atteices varbūtība būs ierobežota ar vērtību  $p^*$  ar jebkuru nezināmo  $\theta \in \Theta$ .

$p$ -set funkcijas definīcijas apgabals ir iespējamo izložu kopums  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , kas ir izmantotā parametra  $\hat{\theta}$  novērtēšanai.  $p$ -set funkcijas vērtību apgabals ir  $\{t_i \leq t_d, t_c < t_{i+1}, i = 1, 2, \dots, n\}$  kopu (trīsstūru) kopums. Atteice notiek, ja  $(T_d, T_c)$  vektors atrodas vienā no tiem trīsstūriem. Šī noteikuma varbūtība nepārsniedz atļauto atteices varbūtību  $p^*$ .

**3.4.2. Risinājums gaisa kuģu parkam, ja parametrs  $\theta$  ir nezināms**

Tagad mēs apsveram  $N$  gaisa kuģa parka drošumu, kad pastāv informācijas apmaiņa un visu gaisa kuģu ekspluatācija tiks pārtraukta, ja tiks atklāta noguruma plaisa kāda gaisa kuģa inspekcijas laikā, un, kā jau tika teikts iepriekš, lai novērstu gaisa kuģu parka atteici, ir pietiekami atrast vismaz vienu noguruma plaisu, pirms notiek kāda gaisa kuģa atteice parkā. Definēsim vairāku kopu funkciju:

$$S^+(\hat{\theta}, \Theta_0, n) = \bigcup_{k \in K_{SL}} S_k^+(\hat{\theta}, \Theta_0, n), \quad (3.12)$$

kur

$$S_k^+(\hat{\theta}, \Theta_0, n) = \begin{cases} \bigcup_{i=1}^{n+1} S_{i,k}(n) & \text{if } \hat{\theta} \in \Theta_0 \\ \emptyset & \text{if } \hat{\theta} \notin \Theta_0 \end{cases}, \quad (3.13)$$

$$\text{kur } S_{i,k}^+(n) = \left\{ (t_{dk}^+, t_{ck}^+) : t_{(i-1)k} < t_{dk}, t_{ck} \leq t_{ik} \right\},$$

$$t_{ik}^+ = t_k^+ + t_i,$$

$$t_i = \frac{it_{SL}}{n+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n+1, \quad k = 1, 2, \dots, N.$$

Var pierādīt, ka ļoti plašā lokā noteiktās  $\Theta_0$  kopas definīcija un prasības ierobežot gaisa kuģa noguruma atteices varbūtību ar  $p^*$  vērtību, pastāv sākotnējā “projekta” gaisa kuģa noguruma atteices atļautas varbūtības izvēle  $p_{\mathcal{D}}$ , atbilstošā funkcija  $S^+(\Theta_0, n(p_{\mathcal{D}}, \hat{\theta}))$  ir  $p$ -set funkcija  $p^*$  līmenim, vektoru kopai  $\{Z_k^+, k \in K_{SL}\}$ , kur  $Z_k^+ = (T_{dk}^+, T_{fk}^+)$ :

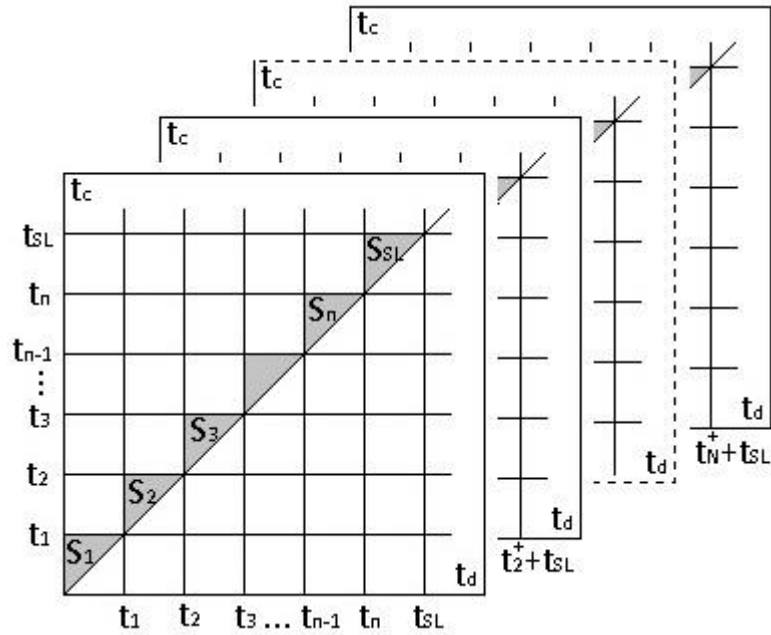
$$v(p_{\mathcal{D}}) = p^*, \quad (3.14)$$

kur

$$v(p) = \sup_{\theta} v(\theta, p), \quad (3.15)$$

$$v(\theta, p) = E \left\{ \sum_{k \in K_{SL}} \sum_{i=1}^{n+1} P(Z_k^+ \in S_{ik}^+(n(p, \hat{\theta})) \cap \hat{\theta} \in \Theta_0) \right\}. \quad (3.16)$$

Tas nozīmē, ka gaisa kuģa parka atteices varbūtību ierobežos  $p^*$  vērtība jebkuram nezināmam  $\theta$ .  $N$  gaisa kuģu ar dažādu ekspluatācijas sākumu  $p$ -set funkcijas vērtību kopuma piemērs ir norādīts 4. attēlā.



4. att.  $N$  gaisa kuģu ar dažādu ekspluatācijas sākumu  $p$ -set funkcijas vērtību kopums.

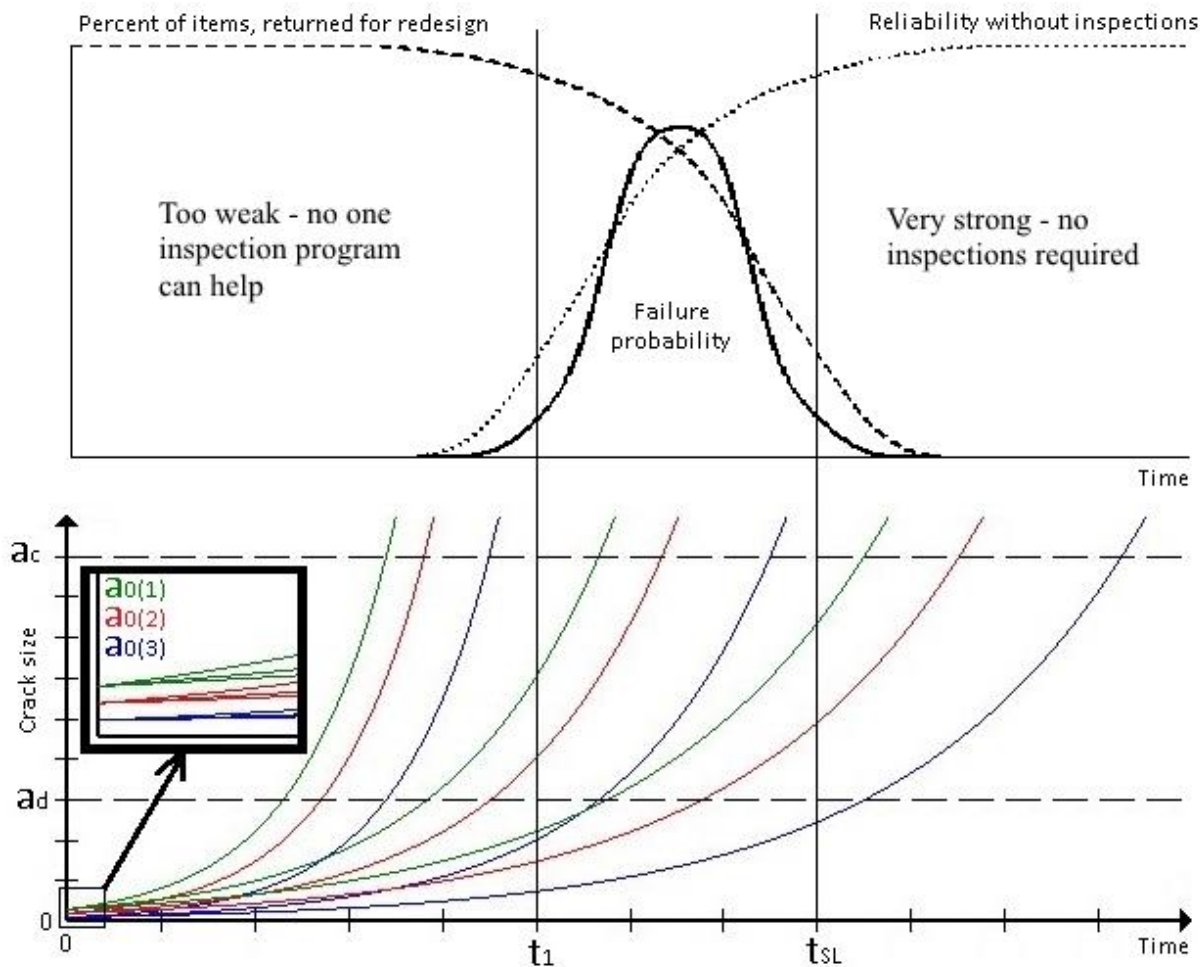
### 3.5. Noguruma atteices varbūtība gaisa kuģu parkā, ja parametrs $\theta$ ir nezināms

Pirmkārt, apskatīsim noguruma atteices varbūtības ierobežojuma problēmu vienam gaisa kuģim ekspluatācijā, ja atklāšanas varbūtība ir definēta ar formulu (3.2),  $a_{d0} = a_{d1}$  un cilvēciskais faktors  $w_0 = 1$ . Tas nozīmē, ka, ja pastāv atklājama noguruma plaša, tad inspekcijas laikā pēc  $T_d$  mēs to atklājam ar varbūtību 1, un gaisa kuģa noguruma atteices ierobežojums tiek nodrošināts ar specifiskas  $p$ -set funkcijas izvēli. Atgādinām, ka, ja jauna tipa gaisa kuģa noguruma laboratorijas testu rezultāti ir “pārāk slikti”, tas netiks nodots ekspluatācijā (iepriekš ir jāveic jauna tipa gaisa kuģa pārprojektēšana). Uzskatām, ka šajā gadījumā  $\hat{\theta} \notin \Theta_0$ ,  $\Theta_0 \subset \Theta$  (piemēram,  $\hat{\theta} \notin \Theta_0$ , ja noguruma dzīves ilgums  $T_c$  ir mazāks nekā kāds no ierobežojumiem vai  $n(p, \hat{\theta})$  ir pārāk liels). Definēsim funkciju

$$S(\Theta_0, n) = \begin{cases} \bigcup_{i=1}^{n+1} S_i(n) & \text{if } \hat{\theta} \in \Theta_0, \\ \emptyset, & \text{if } \hat{\theta} \notin \Theta_0. \end{cases} \quad (3.17)$$

kur  $S_i = \{(t_d, t_c) : t_{i-1} < t_d, t_c \leq t_i\}$ ,  $t_i = it_{SL} / (n+1)$ ,  $i = 1, \dots, n+1$ ;  $\emptyset$  ir tukša kopa.

$p$ -set funkcija ir norādīta 4. attēlā.



5. att. Minimaksa pieeja.

Var pierādīt, ka ļoti plašā lokā noteiktās  $\Theta_0$  kopas definīcija un prasības ierobežot gaisa kuģa noguruma atteices varbūtību ar lielumu  $p^*$ , kur  $(1 - p^*)$  ir nepieciešamais drošums, pastāv sākotnējā “projekta” gaisa kuģa noguruma atteices atļautas varbūtības izvēle  $p_{FD}$ , atbilstošā funkciju kopa  $S(\Theta_0, n(p_{FD}, \hat{\theta}))$  ir  $p$ -set funkcija  $p^*$  līmenim, vektoram  $Z = (T_d, T_c)$ , Vērtību  $p_{FD}$  definē vienādojums

$$\sup_{\theta} \sum_{i=1}^{n+1} P(Z \in S_i(n(p_{FD}, \theta))) = p^* \quad (3.18)$$

Šī  $p_{FD}$  gadījumā gaisa kuģa noguruma atteices varbūtību ierobežo vērtība  $p^*$  attiecībā pret jebkuru nezināmo  $\theta \in \Theta$ .

Tagad varam apsvērt  $N$  gaisa kuģu parka drošumu, kad pastāv informācijas apmaiņa un visu gaisa kuģu ekspluatācija tiks pārtraukta, ja tiks atklāta noguruma plaisa kāda gaisa kuģa inspekcijas laikā, un, kā jau tika teikts iepriekš, lai novērstu gaisa kuģu parka atteici, ir

pietiekami atrast vismaz vienu noguruma plaisu, pirms notiek kāda gaisa kuģa atteice parkā. Definēsim funkciju:

$$S^+(\Theta_0, n) = \bigcup_{k \in K_{SL}} S_k^+(\Theta_0, n), \quad (3.19)$$

kur

$$S_k^+(\Theta_0, n) = \begin{cases} \bigcup_{i=1}^{n+1} S_{i,k}^+(n) & \text{if } \hat{\theta} \in \Theta_0, \\ \emptyset, & \text{if } \hat{\theta} \notin \Theta_0, \end{cases} \quad (3.20)$$

$$S_{ik(n)}^+ = \{(t_{dk}^+, t_{ck}^+) : t_{(i-1)k} < t_{dk}, t_{ck} \leq t_{ik}\}, \quad t_{ik}^+ = t_k^+ + t_i, \quad t_i = it_{SL} / (n+1), \quad i = 1, \dots, n+1,$$

$k = 1, 2, \dots, N$ . Atkal var pierādīt, ka ļoti plašā lokā noteiktās  $\Theta_0$  kopas definīcija un prasības ierobežot gaisa kuģa noguruma atteices varbūtību  $p^*$ , kur  $(1 - p^*)$  ir nepieciešamais drošums, pastāv sākotnējā “projekta” gaisa kuģa noguruma atteices atļautas varbūtības izvēle  $p_{fD}$ , atbilstošā funkcija  $S(\Theta_0, n(p_{fD}, \hat{\theta}))$  ir  $p$ -set funkcija  $p^*$  līmenim, vektoram  $\{Z_k^+, k \in K_{SL}\}$ , kur  $Z_k^+ = (T_{dk}^+, T_{fk}^+)$ :

$$v(p_{fD}) = p^*, \quad (3.21)$$

kur

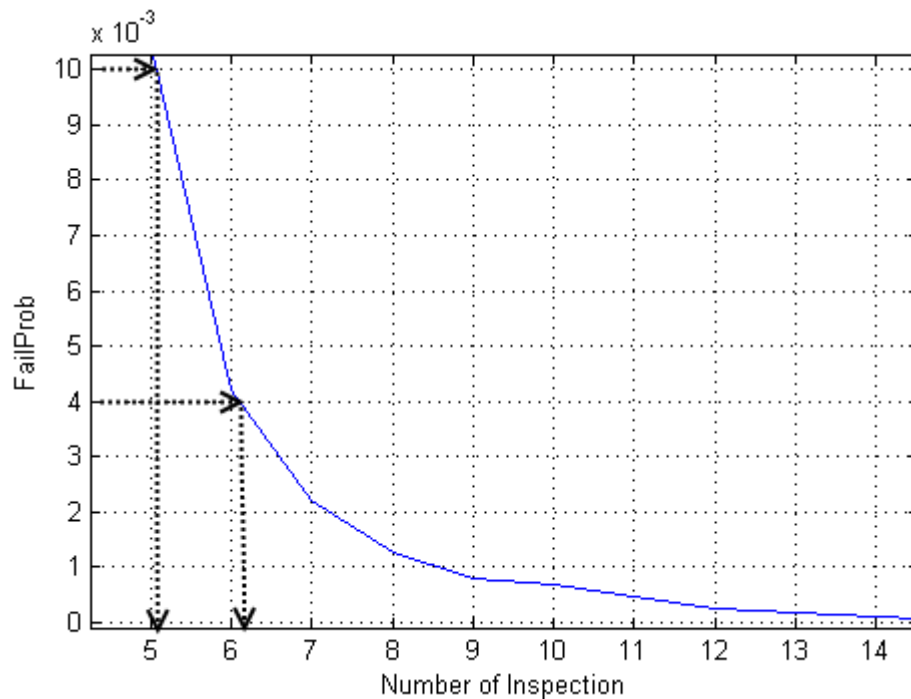
$$v(p) = \sup_{\theta} v(\theta, p) \quad (3.22)$$

$$v(\theta, p) = E \left\{ \sum_{k \in K_{SL}} \sum_{i=1}^{n+1} P(Z_k^+ \in S_{ik}^+(n(p, \hat{\theta}))) \right\}. \quad (3.23)$$

Tas nozīmē, ka gaisa kuģu parka noguruma atteices varbūtību ierobežo vērtība  $p^*$  attiecībā pret jebkuru nezināmo  $\theta$ .

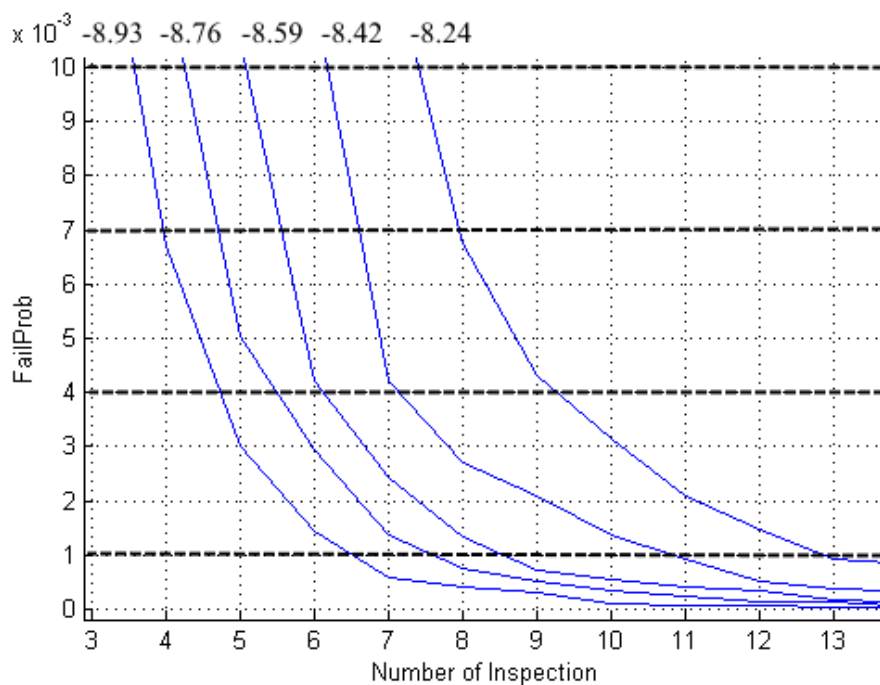
### Skaitliskais piemērs

Šajā skaitliskajā piemērā pieņemam, ka  $t_{SL} = 50\,000$ ,  $w_0 = 0,95$ . Apstrādājot noguruma testa visaptverošos rezultātus, tika iegūts noguruma plaisas parametru novērtējumus  $\hat{\theta} = -8,5885$ ,  $\alpha = 0,286$  mm,  $\log(Q)$  standarta novirze ir vienāda ar 0, un atklāšanas varbūtība  $p_d$  ir definēta ar (4.5) un  $a_{d0} = 10$  mm,  $a_{d1} = 20$  mm,  $a_c = 237$  mm. Gaisa kuģu parkā atrodas 10 gaisa kuģi, intervāls starp gaisa kuģu nodošanu ekspluatācijā ir  $\Delta = 1000$ ; pieļaujamā atteices varbūtība  $p^* = 0,01$ , kopu  $\Theta_0$  definē nosacījums: ja  $\hat{n} = n(0,01, \hat{\theta}) > 20$ , tad būtu jāveic gaisa kuģu pārprojektēšana. Izmantojot Montekarlo aprēķinu, iegūstam  $\hat{n} = n(0,01, \hat{\theta}) = 6$ , skatīt 6. att.



**6. att. Inspekciju skaits.**

Šis aprēķins ir pareizs tikai tad, ja apkopē tiek konstatēta tā pati vērtība  $\theta_0 = -8,5885$ . Realitātē  $\theta_0$  nav zināms. Ja  $\theta_0$  vērtība mainās, tad izvēlētais inspekciju skaits, kas nodrošina nepieciešamo drošuma līmeni, mainīsies līdz ar to. Šo ietekmi var aplūkot 7. attēlā.

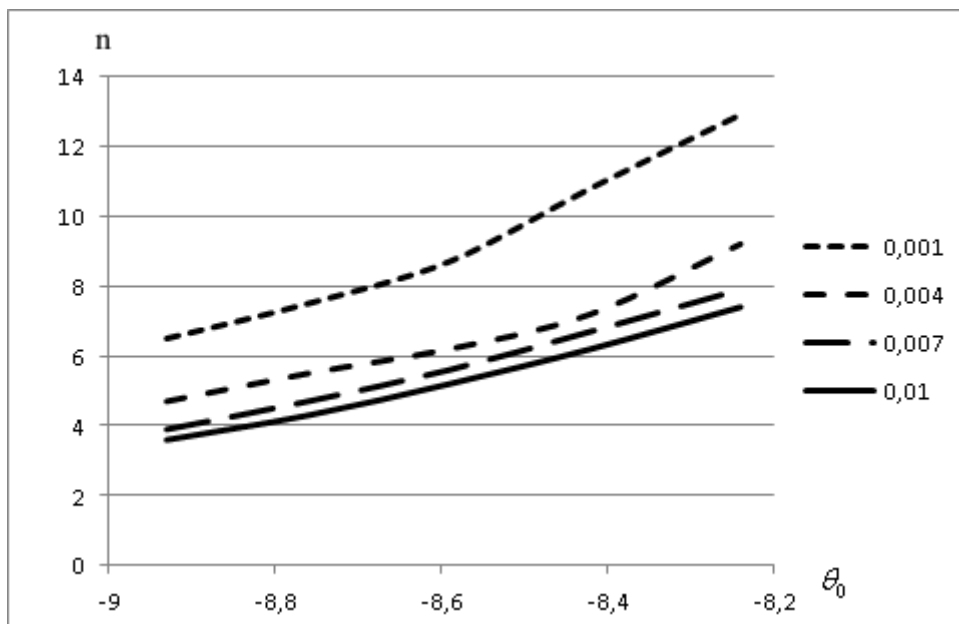


**7. att. Varbūtības funkcijas piemērs pie dažādām  $\theta_0$  vērtībām.**

Tas nozīmē, ka izvēlēta inspekcijas programma  $\hat{n} = n(0,01, \hat{\theta}) = 6$  nebūs optimāla visām  $\theta_0$  vērtībām. Eksploatācijā pastāv iespējas, ka kādai no noguruma plaisām ir nepieciešams



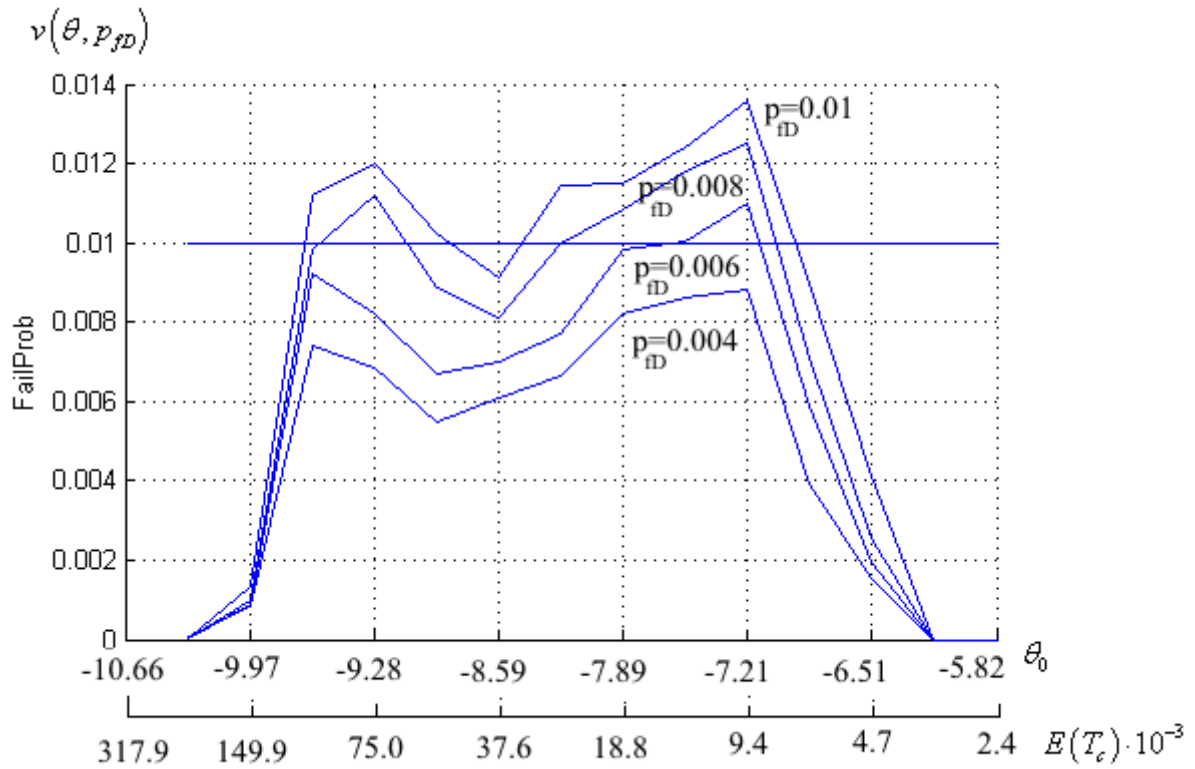
lielāks inspekciju skaits. Inspekciju skaita atkarību no  $\theta_0$  vērtības dažādiem  $p^*$  var apskatīt 8. attēlā.



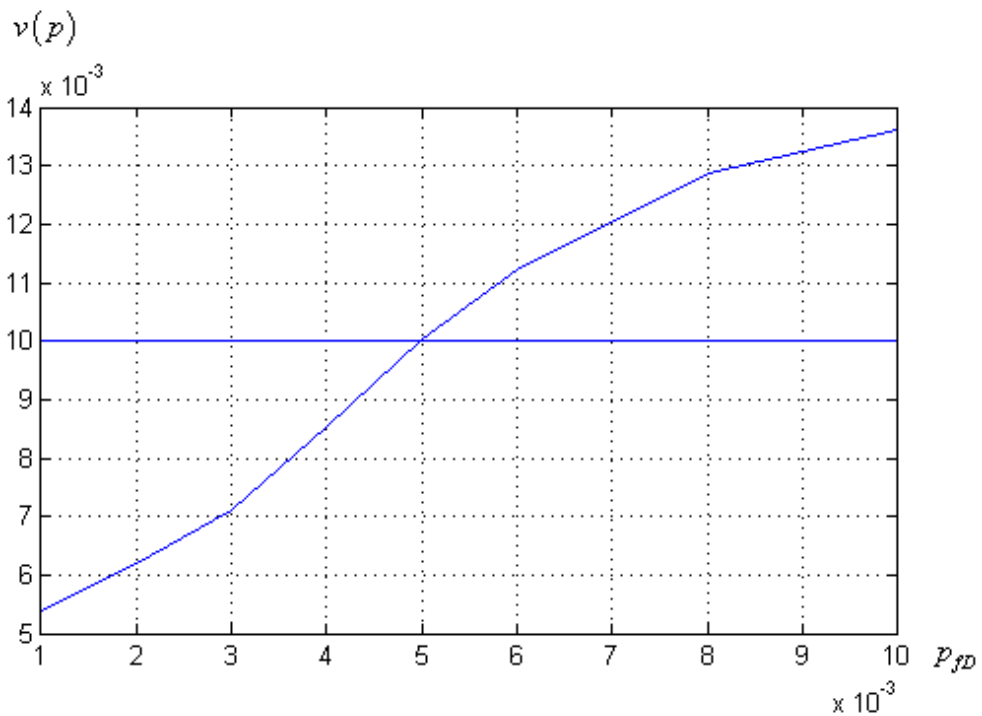
**8. att. Funkcijas  $n(p^*, \theta)$  piemērs pie dažādām  $p^*$  vērtībām.**

Jāierobežo maksimālā atteices varbūtība pie jebkuras  $\theta_0$ . To var izdarīt ar speciāla “projekta” atteices varbūtības izvēli. Funkciju kopums  $v(\theta, p)$  pie dažādām  $p$  vērtībām ir redzams 9. attēlā, kur paralēlās ass aprēķini ir izveidoti atbilstošās “vidējās izturības”  $= \frac{C_c}{Q}$ , kur

$$C_c = \ln a_c - \ln \alpha, \quad Q = \exp(\theta_0).$$



9. att. Funkcija  $v(\theta, p)$  pie dažādām  $p_{fd}$  vērtībām.



10. att. Funkcija  $v(p)$ .

10. attēla funkcijā  $v(p)$  ir attēloti piemēra dati. Redzams, ka, lai ierobežotu gaisa kuģu parka atteices varbūtību par vērtību  $p^* = 0,01$ , ir jāizvēlas  $p_{fd} = 0,004$ . Funkcijā  $p_{fnw}(n, \theta)$ ,

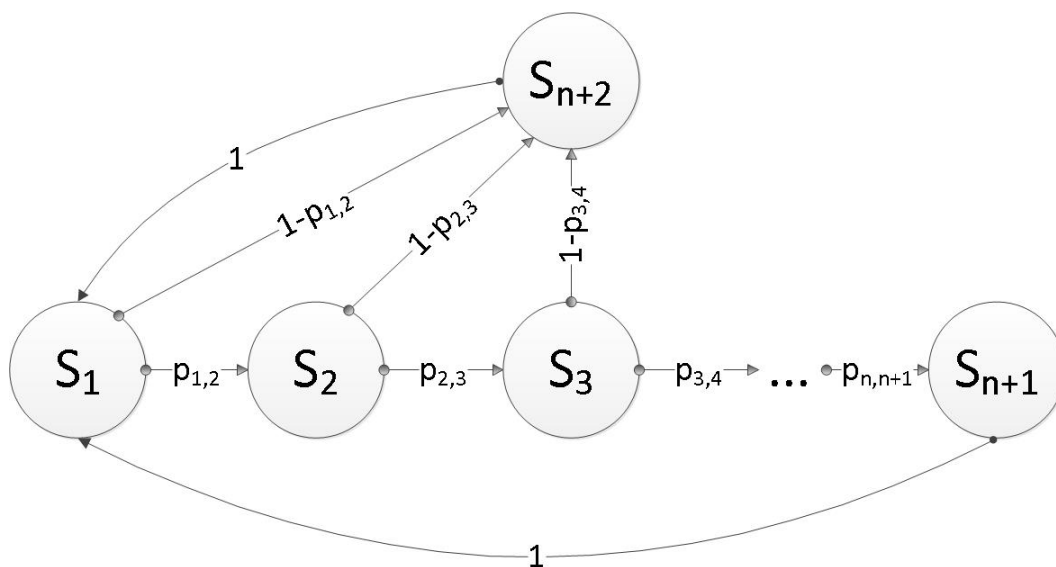
kura ir attēlota 6. attēlā (kur  $N = 10$ ) noguruma plaisas parametru aplēsēm —  $\hat{\theta}_0 = -8,5885$ , par inspekciju skaitu ir jāizvēlas numurs, kurš ir vienāds ar  $\hat{n} = n(0,004, \theta) = 7$ .

#### 4. nodaļa. Drošuma aizstāšanas problēma

Šajā nodaļā tiek apsvērta iespēja nodrošināt sistēmas (sauktu arī par aviolīniju) ar bezgalīgu ekspluatācijas ilgumu un ar nepieciešamību nodrošināt šīs sistēmas drošumu. Literatūrā ir atrodamas metodes, kas risina mūsu izvirzīto problēmu, bet autors veic šo metožu attīstību. Šajā uzdevumā tika apsvērtas noguruma atteices seku izmaksas un atrisināts uzdevums, kā izvēlēties optimālāko novecojušo gaisa kuģu aizstāšanu ar gaisa kuģi, kura ekspluatācijas laiks ir īsāks. Šī opcija netika piedāvāta pašreizējā darba uzdevuma iepriekšējā risinājumā (ko piedāvāja Hovards). Darba uzdevuma otrajā risinājumā netiek ņemti vērā noguruma atteices intensitātes ierobežojumi. Var uzskatīt, ka tiek prezentēta Hovarda uzdevuma attīstība.

Ja ir zināma gaisa kuģa noguruma dzīves kumulatīvā sadalījuma funkcija un gaisa kuģa ekspluatācijas laika cenu funkcija, var atrisināt šādas problēmas: ja ir gaisa kuģis ar konkrētu ekspluatācijas laiku un nav skaidrs, vai vajadzētu to turpināt ekspluatēt vai labāk pārdot; ja to pārdod, ar cik ilgu gaisa kuģa ekspluatācijas laiku vajadzētu iegādāties jauno gaisa kuģi? Gaisa kuģa ekspluatācijas laiks ir ierobežots ar noteiktu dzīves ilgumu  $t_{SL}$  tehnisku iemeslu dēļ. Intervāls  $[0, t_{SL}]$  ir iedalīts  $n$  intervālos, viens intervāls ir vienāds ar ekspluatācijas laiku

$$\Delta = \frac{t_{SL}}{n} \text{ (skatīt 11. att.)}$$



11. att. Pārejas diagramma.

Sākam risināt problēmu, izmantojot Markova ķēdes lēmumu-iterācijas metodi. Aplūkosim Markova ķēdi ar  $n + 2$  stāvokļiem. Priekš  $1 \leq i \leq n + 1$ , mēs uzskatām, ka ķēde ir  $i$  stāvoklī, ja gaisa kuģa ekspluatācijas laiks ir  $\Delta(i - 1)$ . Pirmais stāvoklis atbilst jaunam gaisa kuģim, kurš vēl nav ekspluatēts. Nākamais stāvoklis atbilst gaisa kuģim, kurš ir izmantots vienu intervālu ar atbilstošo ekspluatācijas laiku  $\Delta$ . Ķēde ir  $n + 1$  stāvoklī, ja gaisa kuģa ekspluatācijas laiks ir  $\Delta n$ . Pāreja no  $n$  stāvokļa uz  $n + 1$  stāvokli nozīmē gaisa kuģa ekspluatācijas beigas, jo ir beidzies periods bez kapitālremonta (sasniežot norādīto ekspluatācijas laiku  $t_{SL}$ ). Pastāv vēl viens Markova ķēdes stāvoklis –  $n + 2$  stāvoklis. Noguruma atteice var notikt gaisa kuģa ekspluatācijas laikā. Gadījumā, ja gaisa kuģa ekspluatācijas laikā notiek noguruma atteice, Markova ķēde pāriet  $n + 2$  stāvoklī – atteices stāvoklī.

Ikvienā tehniskajā stāvoklī pastāv vairāki lēmumi. Pieejamās alternatīvas stāvokļos  $i = 1, 2, \dots, n$  ir šādas: nulles lēmums, kur  $k = 0$ , ir turpināt gaisa kuģa ekspluatāciju. Citi lēmumi, kur  $0 < k \leq n$ , ir pārdot pastāvošo gaisa kuģi un iegādāties gaisa kuģi, kura stāvoklis ir  $k$ . Gadījumā, ja  $t_{SL}$  ir sasniegts (Markova ķēde ir  $n + 1$  stāvoklī) vai noguruma atteices gadījumā (Markova ķēde ir  $n + 2$  stāvoklī), turpmāka gaisa kuģa ekspluatācija ir neiespējama, un nulles lēmumu vairs nedrīkst pieņemt. Stāvokļos  $i = n + 1$  un  $i = n + 2$  pieejamā alternatīva ir iegādāties gaisa kuģi, kura stāvoklis ir  $k$  ( $0 < k \leq n$ ). Atsaucoties uz katru stāvokli, var izvēlēties citu lēmumu. Katra stāvokļa  $k_{1(n+1)} = \{k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_{n-1}, k_n, k_{n+1}\}$  lēmumu kopu sauc par stratēģiju. Ir jāuzzina gaisa kuģa optimālā stratēģija no drošuma un ekonomiskās efektivitātes viedokļa. Šīs problēmas risinājumus var atrast, izmantojot vadītu Markova ķēdi un Hovarda algoritmu.

Katra lēmuma un katra stāvokļa pāreju var aprēķināt:

$$p_{ij}^k = \begin{cases} p_{i,i+1} & j = i + 1 \\ 1 - p_{i,i+1} & j = n + 2 \\ 0 & \text{other} \end{cases}, \text{ ja } k = 0, 1 \leq i \leq n, \quad (4.1)$$

$$p_{ij}^k = \begin{cases} 1 & j = k \\ 0 & \text{other} \end{cases}, \text{ ja } 0 < k \leq n, i = n + 1 \text{ vai } i = n + 2. \quad (4.2)$$

	$S_1$	$S_2$	$S_3$	...	$S_n$	$S_{n+1}$	$S_{n+2}$
$S_1$	0	$p_{1,2}$	0	...	0	0	$1-p_{1,2}$
$S_2$	0	0	$p_{2,3}$	...	0	0	$1-p_{2,3}$
$S_3$	0	0	0	...	0	0	$1-p_{3,4}$
...	...	...	...	...	...	...	...
$S_{n-1}$	0	0	0	...	$p_{n-1,n}$	0	$1-p_{n-1,n}$
$S_n$	0	0	0	...	0	$p_{n,n+1}$	$1-p_{n,n+1}$

**12. att. Pārejas varbūtību matrica, ja katrā  $i$  stāvoklī, kur  $i = 1, 2, \dots, n$ , ir izvēlēts  $k = 0$  lēmums.**

	$S_1$	...	$S_k$	...	$S_{n+1}$	$S_{n+2}$
$S_1$	0	...	1	...	0	0
...	...	...	...	...	...	...
$S_i$	0	...	1	...	0	0
...	...	...	...	...	...	...
$S_{n+1}$	0	...	1	...	0	0
$S_{n+2}$	0	...	1	...	0	0

**13. att. Pārejas varbūtību matrica, ja katrā  $i$  stāvoklī, kur  $i = 1, 2, \dots, n + 2$ , ir izvēlēts tāds pats lēmums  $k > 0$ .**

Stāvokļa  $S_{n+1}$  vai  $S_{n+2}$  nulles lēmumu ( $k = 0$ ) nevar izmantot, un ir jāizvēlas kāds cits lēmums ( $k > 0$ ). Tā tas ir, jo nevar turpināt gaisa kuģa ekspluatāciju, kad tā ekspluatācijas dzīve ir vienāda ar norādīto dzīvi  $t_{SL}$  vai kad gaisa kuģis ir atteices stāvoklī. Katrā pārejā no stāvokļa  $i$  līdz stāvoklim  $j$  tiek iegūts apbalvojums  $r_{i,j}^k$ :

$$\text{ja } k = 0, i = 1, 2, \dots, n+1 \text{ — pāreja no stāvokļa } i \text{ uz stāvokli } i+1: r_{i,i+1}^1 = -e_i + b_s,$$

$$\text{ja } k = 0, i = 1, 2, \dots, n \text{ — pāreja no stāvokļa } i \text{ uz stāvokli } n+2: r_{i,n+1}^1 = -e_i - t_i - f,$$

ja  $k > 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, n+1$  — pāreja no stāvokļa  $i$  uz stāvokli  $k$ :  $r_{i,k}^k = t_i - c_k$ ,

ja  $k > 0$ ,  $i = n+2$  — pāreja no stāvokļa  $i$  uz stāvokli  $k$ :  $r_{i,k}^k = -c_k$ ,

kur  $b_s$  ir peļņa no veiksmīgas ekspluatācijas vienā intervālā;

$e_i$  — ekspluatācijas izmaksas;

$t_i$  — pārdošanas vērtība gaisa kuģim ar ekspluatācijas laiku  $i-1$ ;

$f$  — atteices radītie zaudējumi;

$c_k$  — cena gaisa kuģim ar ekspluatācijas laiku  $k-1$ .

Pēc tam izvēlas lēmumu, kurš sniedz vislielāko sagaidāmo ieguvumu. Paredzamo ieguvumu var aprēķināt saskaņā ar formulu (4.3).

$$q_i^k = \sum_{i=1}^{n+2} p_{ij}^k r_{ij}^k. \quad (4.3)$$

Saskaņā ar izvēlēto lēmumu mēs izveidojam katra stāvokļa vienādojumu. Ar  $v_i$  apzīmēsim relatīvās lēmumu vērtības un ar  $g$  — paredzamo sistēmas ieguvumu no izvēlētās stratēģijas viena soļa. Pamata vienādojumi, kas reglamentē sistēmu, ja tā stāvoklis ir  $i$ , ir šādi:

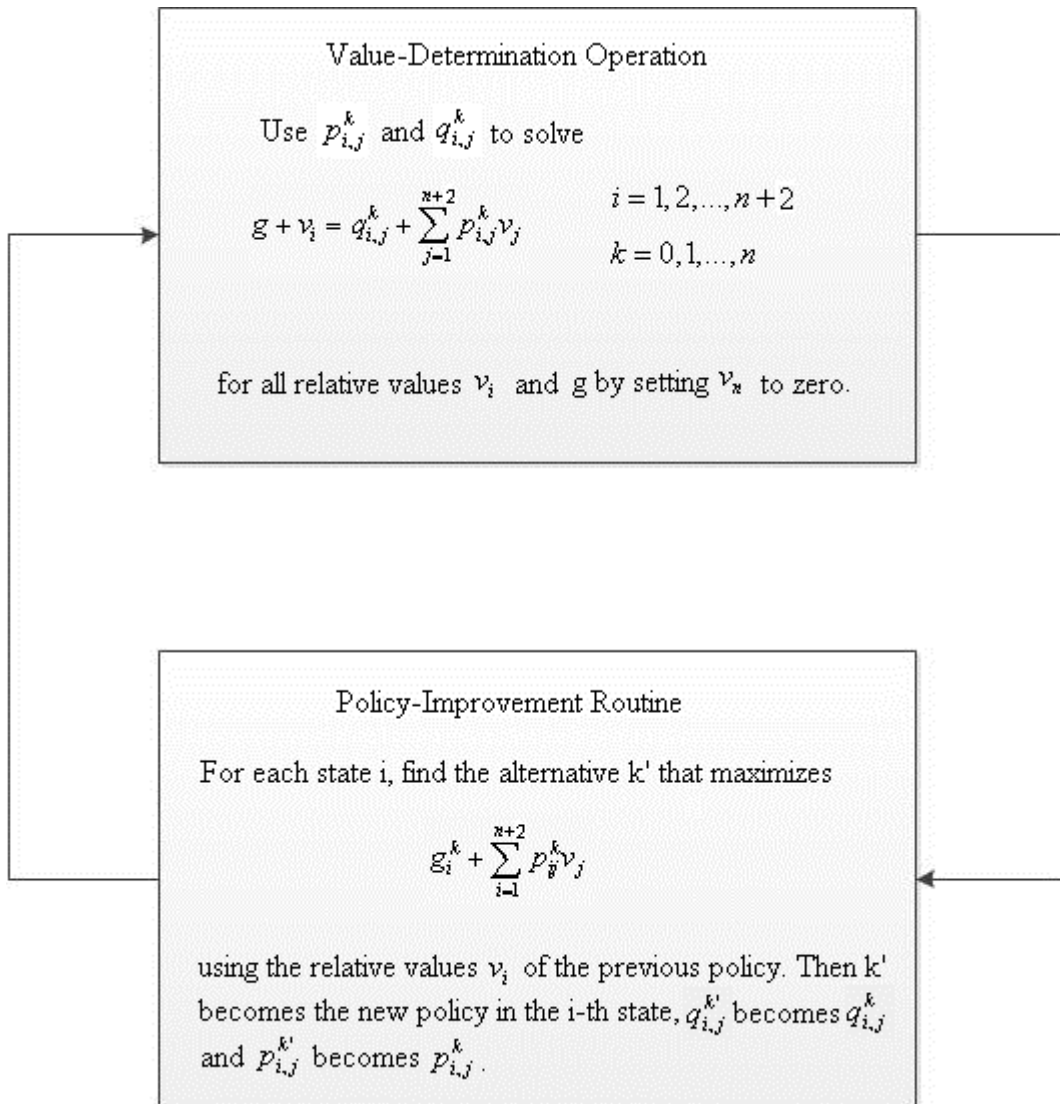
$$g + v_i = q_{i,i+1}^k + p_{i,i+1}^k v_{i+1} + (1 - p_{i,i+1}^k) v_{n+2}, \quad (4.4)$$

ja izvēlas  $k = 0$  (gaisa kuģu ekspluatācijas turpināšana),

$$g + v_i = q_{i,i+1}^k + v_k, \quad (4.5)$$

ja izvēlas  $k > 0$  (mēs pārdodam  $i$  stāvoklī esošo gaisa kuģi un iegādājamies gaisa kuģi  $k$  stāvoklī).

Pēc tam aprēķinām vienādojumu, pieņemot, ka  $v_{n+2} = 0$ , tiek aprēķināta katra stāvokļa un katra lēmuma testa kvantitātes vērtība, kura ir  $g_i^k + \sum_{i=1}^{n+2} p_{ij}^k v_j$ . Šeit mēs apskatām  $k$ , kas atbilst katra stāvokļa augstākās kvantitātes vērtībai, lai atklātu jaunu, labāku lēmumu, kura palielinās šo kvantitāti. Mēs atkārtojam šo iterāciju, līdz tiks atrasti vislabākie lēmumi.



**14. att. Iterāciju cikls.**

Izmantojot Hovarda algoritmu, mēs varam atklāt optimālo ekspluatācijas beigu stāvokli  $S_e$  un optimālo ekspluatācijas sākšanas stāvokli  $S_b$ .

Lai ierobežotu noguruma atteices varbūtību, mums jāuzzina, kā to aprēķināt izvēlētajai stratēģijai (katra  $S_b, \dots, S_e$  stāvokļa lēmumu kopums). Vispirms mums ir jāatrod mūsu sistēmas stacionārās varbūtības, kuru definē sistēmas vienādojums:

$$\pi P = \pi, \tag{4.6}$$

kur  $\sum_{i=S_b}^{S_f} \pi_i = 1$ .

Vidējais laiks starp atteicēm

$$L_f = \frac{1}{\pi_{S_f}} \Delta \tag{4.7}$$

( $\pi_{S_f}$  ir atteices stacionārā varbūtība), un atteices intensitāte ir

$$\lambda_f = \frac{1}{L_f} = \frac{\pi_{S_f}}{\Delta}. \quad (4.8)$$

Pēc tam ir jāatrod visi atļautie risinājumi visiem  $S'_b \leq S_b$  un  $S'_e \leq S_e$ . No šiem dažādajiem risinājumiem mums ir jāatrod pāris ( $S_b, S_e$ ), kas atbilst maksimālajai  $g_{b,e}$  vērtībai saskaņā ar  $\lambda_f \leq \lambda_{fa}$  ierobežojumu. To var pierakstīt šādā veidā: pāris ( $\lambda_f, g$ ) ir vektora-argumenta pāra ( $S_b, S_e$ ) vektora funkcija,

$$(\lambda_f, g) = G_\lambda(S_b, S_e). \quad (4.9)$$

Labāko pāri ( $S_b^*, S_e^*$ ) definē vienādojums

$$(S_b^*, S_e^*) = \arg \max_{S_b, S_e} (G_\lambda(S_b, S_e) : \lambda_f \leq \lambda_{fa}). \quad (4.10)$$

### Skaitlisks piemērs

Šajā piemērā mēs pieņemam, ka  $\theta_0 = 11,6354$  un  $\theta_1 = 0,346$ . Šīs vērtības atbilst prognozējamajai gaisa kuģa ilgizturībai  $E(X) = \exp\left(\theta_0 + \frac{\theta_1^2}{2}\right) = 120\,000$  lidojuma stundas. Šajā skaitliskajā piemērā norādītais ekspluatācijas laiks tiek definēts kā viena trešdaļa no gaisa kuģa paredzamās ilgizturības:  $t_{SL} = \frac{E(X)}{3} = 40\,000$  lidojuma stundas. Šajā skaitliskajā piemērā ir sniegta šāda papildu informācija: gaisa kuģa ekspluatācijas izmaksas līdz stāvoklim  $n$  ir augstākas nekā jauna gaisa kuģa ekspluatācijas izmaksas  $e_{\text{increase}} = \frac{e_n}{e_1}$  par  $e_{\text{increase}} = 2$ , gaisa kuģa tirdzniecības ieguvums ir mazāks nekā gaisa kuģa cena par  $t_i = c_i(1 - t_L)$ , ar tirdzniecības zaudējuma vērtību  $t_L = 0,1$  un akcelerācijas faktoru, kas pielāgojas cenas pazeminājuma ātrumam  $a = 2$ , stundas maksas faktors  $h_c = 0,3$ , stundas izmaksu faktors  $h_e = 0,4$ , stundas atteices faktors  $h_f = 50$ . Markova ķēdes solis (intervāls starp stāvokļiem) ir  $\Delta = 1000$  lidojuma stundas, tas nozīmē, ka veiksmīga viena soļa ekspluatācija sniedz  $b_s = 1000$  lidojuma stundu ienākumus. Izmantojot šo informāciju, mēs aprēķinām šādus datus: jauna gaisa kuģa cena  $c_1 = h_c t_{SL} = 12\,000$  lidojuma stundas, kopējās ekspluatācijas izmaksas  $e = h_e t_{SL} = 16\,000$  lidojuma stundas, atteices zaudējumi  $f = h_f t_{SL} = 2 \cdot 10^6$  lidojuma stundas. Pieļaujamā noguruma atteices intensitāte ir  $\lambda_{fa} = 1 \cdot 10^{-10}$ .



Pēc Hovarda algoritma lietošanas mēs iegūstam  $S_b = 14, S_e = 31$ . Izmantojot šo stratēģiju, vidējie viena soļa ienākumi ir  $g = 320$  lidojuma stundas; šie ir maksimālie iespējamie vidējie viena soļa ienākumi no dotās, sākotnējās informācijas. Var novērot, ka mēs turpinām ekspluatāciju, līdz tiek sasniegt 31. stāvoklis, pēc tam mēs izmantojam 14. lēmumu ( $k = 14$ ), tas ir, pārdot esošo gaisa kuģi, kura ekspluatācijas laiks ir 30 000 lidojuma stundas un iegādāties gaisa kuģi, kurš ir 14. stāvoklī (ekspluatācijas laiks – 13 000 lidojuma stundu). 14. stāvoklis ir optimālākais ekspluatācijas sākuma stāvoklis  $S_b$  un 31. stāvoklis ir optimālākais ekspluatācijas beigu stāvoklis  $S_e$ . Atteices gadījumā mēs arī izmantojam 14. lēmumu.

Tagad varam atrast atteices stacionāro varbūtību  $\pi_{S_f} = 5,13 \cdot 10^{-6}$ , vidējo laiku starp atteicēm  $L_f = 1,95 \cdot 10^8$ , lidojuma stundas un noguruma atteices intensitāti  $\lambda_f = 5,13 \cdot 10^{-9}$ . Novērojam, ka šī stratēģija neatbilst  $\lambda_f \leq \lambda_{fa}$  prasībām.

Lai samazinātu atteices intensitāti, mums ir jāuzzina visi  $(S_b, S_e)$  pāri, kas atbilst maksimālajam  $g_{(b,e)}$  saskaņā ar  $\lambda_{f(b,e)} \leq \lambda_{fa}$  ierobežojumu, šie pāri ir redzami 15. attēlā līdz 18. attēlā.

Tika konstatēts, ka ienesīgākā stratēģija, kas apmierinātu  $\lambda_f \leq \lambda_{fa}$  ierobežošanu, ir

$(S_b = 10, S_e = 22)$   $\lambda_{10,22} = 8,63 \cdot 10^{-11}$ ,  $g_{10,22} = 275$  lidojuma stundas un  $L_{f10,22} = 1,16 \cdot 10^{10}$ .

Varbūtība beigt ekspluatāciju  $S_e$  stāvoklī vai  $S_f$  stāvoklī saskaņā ar esošo stāvokli ir attēlota 1. tabulā.

**1. tabula**

**Atteices varbūtības**

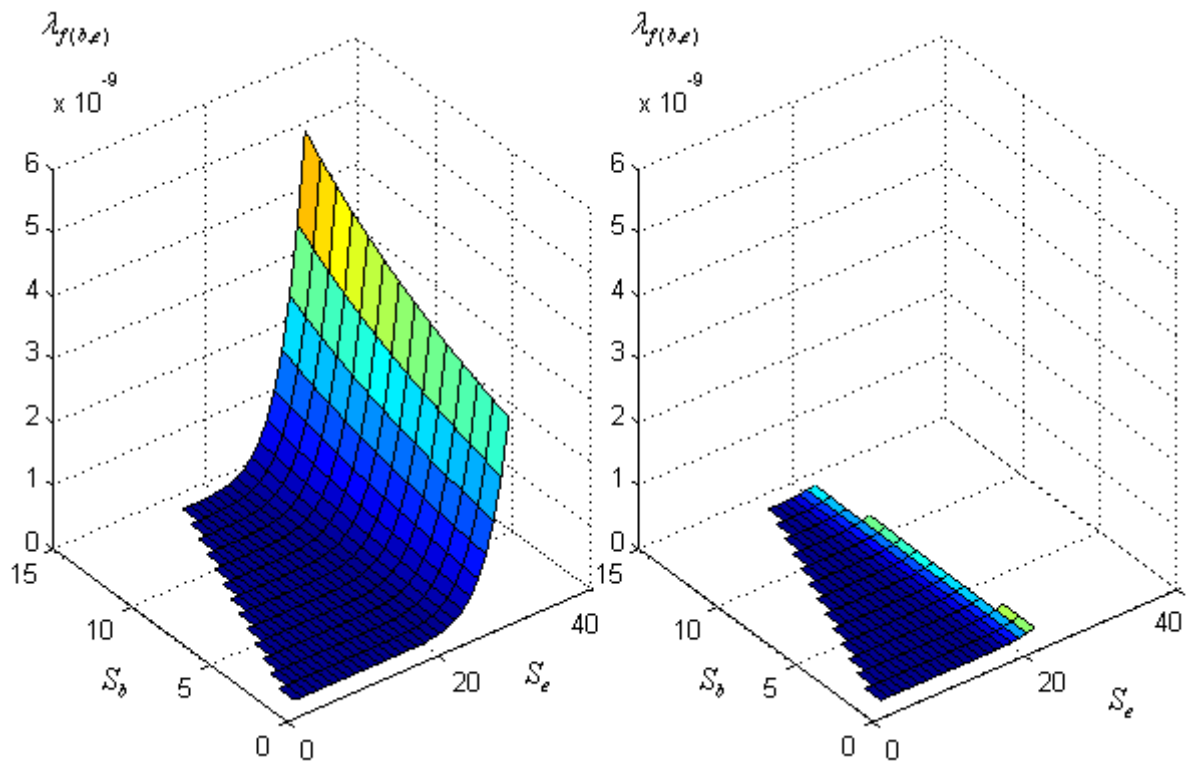
	$S_e$	$S_f \cdot 10^{-7}$
10	0,999998877582	11,22418
11	0,999998877590	11,22410
12	0,999998877627	11,22373
13	0,999998877786	11,22214
14	0,999998878369	11,21631
15	0,999998880240	11,19760
16	0,999998885584	11,14416
17	0,999998899432	11,00568
18	0,999998932392	10,67608
19	0,999999005251	9,94749
20	0,999999156173	8,43827
21	0,999999451361	5,48639

	$S_{\delta 1}$	$S_{\delta 2}$	$S_{\delta 3}$	$S_{\delta 4}$	$S_{\delta 5}$	$S_{\delta 6}$	$S_{\delta 7}$	$S_{\delta 8}$	$S_{\delta 9}$	$S_{\delta 10}$	$S_{\delta 11}$	$S_{\delta 12}$	$S_{\delta 13}$	$S_{\delta 14}$	
$S_{e1}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
$S_{e2}$	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	$\lambda_f = \frac{1}{L_f} = \frac{\pi S_f}{\Delta}$		1	
$S_{e3}$	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1			1	
$S_{e4}$	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
$S_{e5}$	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
$S_{e6}$	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
$S_{e7}$	6,E-20	7,E-20	9,E-20	1,E-19	1,E-19	2,E-19	1	1	1	1	1	1	1	1	
$S_{e8}$	1,E-18	1,E-18	2,E-18	2,E-18	2,E-18	3,E-18	5,E-18	1	1	1	1	1	1	1	
$S_{e9}$	1,E-17	2,E-17	2,E-17	2,E-17	3,E-17	3,E-17	4,E-17	6,E-17	1	1	1	1	1	1	
$S_{e10}$	1,E-16	1,E-16	2,E-16	2,E-16	2,E-16	2,E-16	3,E-16	4,E-16	5,E-16	1	1	1	1	1	
$S_{e11}$	8,E-16	8,E-16	9,E-16	1,E-15	1,E-15	1,E-15	2,E-15	2,E-15	3,E-15	4,E-15	1	1	1	1	
$S_{e12}$	4,E-15	4,E-15	5,E-15	5,E-15	6,E-15	6,E-15	8,E-15	9,E-15	1,E-14	1,E-14	2,E-14	1	1	1	
$S_{e13}$	2,E-14	2,E-14	2,E-14	2,E-14	2,E-14	3,E-14	3,E-14	3,E-14	4,E-14	5,E-14	7,E-14	8,E-14	1	1	
$S_{e14}$	6,E-14	6,E-14	7,E-14	7,E-14	8,E-14	9,E-14	1,E-13	1,E-13	1,E-13	2,E-13	2,E-13	2,E-13	3,E-13	1	
$S_{e15}$	2,E-13	2,E-13	2,E-13	2,E-13	2,E-13	3,E-13	3,E-13	3,E-13	4,E-13	4,E-13	5,E-13	7,E-13	8,E-13	9,E-13	
$S_{e16}$	5,E-13	5,E-13	6,E-13	6,E-13	7,E-13	7,E-13	8,E-13	9,E-13	1,E-12	1,E-12	1,E-12	2,E-12	2,E-12	2,E-12	
$S_{e17}$	1,E-12	1,E-12	1,E-12	2,E-12	2,E-12	2,E-12	2,E-12	2,E-12	2,E-12	2,E-12	3,E-12	3,E-12	4,E-12	4,E-12	5,E-12
$S_{e18}$	3,E-12	3,E-12	3,E-12	4,E-12	4,E-12	4,E-12	5,E-12	5,E-12	5,E-12	6,E-12	7,E-12	8,E-12	9,E-12	1,E-11	
$S_{e19}$	7,E-12	7,E-12	8,E-12	8,E-12	9,E-12	9,E-12	1,E-11	1,E-11	1,E-11	1,E-11	1,E-11	1,E-11	2,E-11	2,E-11	2,E-11
$S_{e20}$	1,E-11	1,E-11	2,E-11	2,E-11	2,E-11	2,E-11	2,E-11	2,E-11	2,E-11	2,E-11	3,E-11	3,E-11	3,E-11	3,E-11	4,E-11
$S_{e21}$	3,E-11	3,E-11	3,E-11	3,E-11	3,E-11	4,E-11	4,E-11	4,E-11	4,E-11	5,E-11	5,E-11	6,E-11	6,E-11	7,E-11	
$S_{e22}$	5,E-11	5,E-11	6,E-11	6,E-11	6,E-11	7,E-11	7,E-11	7,E-11	8,E-11	9,E-11	9,E-11	1,E-10	1,E-10	1,E-10	
$S_{e23}$	9,E-11	1,E-10	1,E-10	1,E-10	1,E-10	1,E-10	1,E-10	1,E-10	1,E-10	1,E-10	1,E-10	2,E-10	2,E-10	2,E-10	2,E-10
$S_{e24}$	2,E-10	2,E-10	2,E-10	2,E-10	2,E-10	2,E-10	2,E-10	2,E-10	2,E-10	2,E-10	3,E-10	3,E-10	3,E-10	3,E-10	3,E-10
$S_{e25}$	3,E-10	3,E-10	3,E-10	3,E-10	3,E-10	3,E-10	3,E-10	4,E-10	4,E-10	4,E-10	4,E-10	4,E-10	5,E-10	5,E-10	5,E-10
$S_{e26}$	4,E-10	4,E-10	5,E-10	5,E-10	5,E-10	5,E-10	5,E-10	6,E-10	6,E-10	6,E-10	7,E-10	7,E-10	8,E-10	8,E-10	
$S_{e27}$	6,E-10	7,E-10	7,E-10	7,E-10	8,E-10	8,E-10	8,E-10	9,E-10	9,E-10	1,E-09	1,E-09	1,E-09	1,E-09	1,E-09	
$S_{e28}$	1,E-09	1,E-09	1,E-09	1,E-09	1,E-09	1,E-09	1,E-09	1,E-09	1,E-09	1,E-09	1,E-09	2,E-09	2,E-09	2,E-09	2,E-09
$S_{e29}$	1,E-09	2,E-09	2,E-09	2,E-09	2,E-09	2,E-09	2,E-09	2,E-09	2,E-09	2,E-09	2,E-09	2,E-09	2,E-09	2,E-09	3,E-09
$S_{e30}$	2,E-09	2,E-09	2,E-09	2,E-09	2,E-09	3,E-09	3,E-09	3,E-09	3,E-09	3,E-09	3,E-09	3,E-09	3,E-09	4,E-09	4,E-09
$S_{e31}$	3,E-09	3,E-09	3,E-09	3,E-09	3,E-09	4,E-09	4,E-09	4,E-09	4,E-09	4,E-09	4,E-09	4,E-09	5,E-09	5,E-09	5,E-09

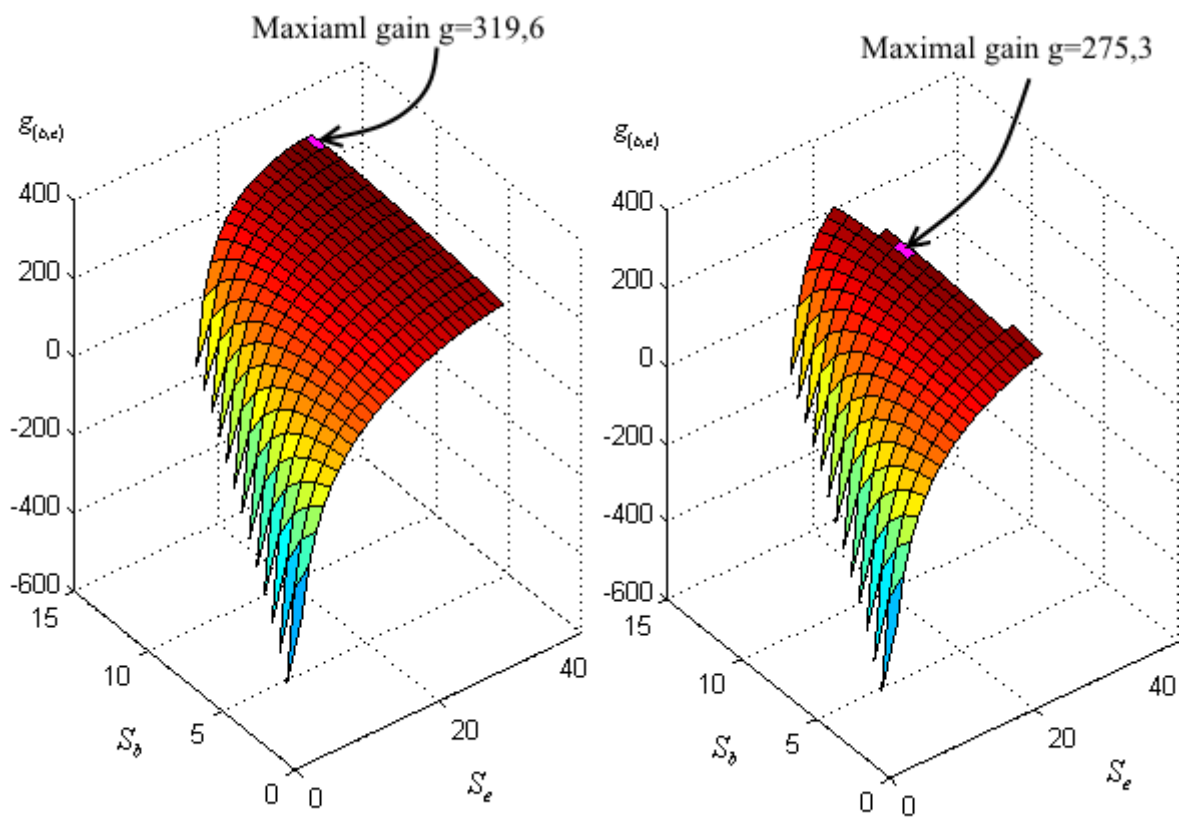
15. att.  $\lambda_{f(b,e)}$  kopa.

	$S_{\delta 1}$	$S_{\delta 2}$	$S_{\delta 3}$	$S_{\delta 4}$	$S_{\delta 5}$	$S_{\delta 6}$	$S_{\delta 7}$	$S_{\delta 8}$	$S_{\delta 9}$	$S_{\delta 10}$	$S_{\delta 11}$	$S_{\delta 12}$	$S_{\delta 13}$	$S_{\delta 14}$
$S_{e1}$	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf
$S_{e2}$	-507	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	$g_{\delta,e} = \sum_{i=1}^e \pi_i q_i$	.-inf	.-inf
$S_{e3}$	-269	-467	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf		.-inf	.-inf
$S_{e4}$	-146	-236	-429	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf
$S_{e5}$	-68,1	-117	-205	-393	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf
$S_{e6}$	-13,8	-41,8	-89,6	-176	-360	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf
$S_{e7}$	27,1	10,6	-17,2	-64,1	-149	-328	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf
$S_{e8}$	59,5	50,0	33,4	6,0	-40,1	-123	-298	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf
$S_{e9}$	86,2	81,1	71,4	54,8	27,7	-17,6	-98,9	-269	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf
$S_{e10}$	108,6	106,6	101,3	91,4	74,9	48,0	3,5	-76,1	-243	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf
$S_{e11}$	127,9	128,1	125,7	120,1	110,1	93,6	67,1	23,3	-54,7	-217	.-inf	.-inf	.-inf	.-inf
$S_{e12}$	144,9	146,6	146,3	143,6	137,7	127,5	111,1	84,9	41,8	-34,6	-194	.-inf	.-inf	.-inf
$S_{e13}$	159,9	162,7	163,9	163,2	160,2	154,1	143,8	127,4	101,5	59,1	-15,7	-171	.-inf	.-inf
$S_{e14}$	173,4	177,0	179,3	180,1	179,0	175,7	169,4	159,0	142,6	117,0	75,3	2,0	-150	.-inf
$S_{e15}$	185,5	189,7	192,9	194,7	195,1	193,7	190,1	183,6	173,1	156,8	131,4	90,4	18,5	-130
$S_{e16}$	196,6	201,2	205,0	207,6	209,0	209,0	207,3	203,4	196,7	186,1	169,9	144,8	104,5	34,0
$S_{e17}$	206,7	211,7	215,9	219,1	221,3	222,3	221,9	219,9	215,8	208,9	198,2	182,1	157,3	117,6
$S_{e18}$	216,0	221,2	225,7	229,4	232,2	233,9	234,6	233,9	231,6	227,2	220,2	209,4	193,3	168,8
$S_{e19}$	224,5	229,9	234,7	238,7	241,9	244,2	245,6	245,9	244,9	242,3	237,7	230,5	219,7	203,7
$S_{e20}$	232,4	237,9	242,9	247,1	250,7	253,4	255,4	256,4	256,3	255,0	252,2	247,4	240,0	229,2
$S_{e21}$	239,7	245,3	250,4	254,8	258,6	261,7	264,1	265,6	266,3	265,9	264,3	261,2	256,2	248,7
$S_{e22}$	246,4	252,1	257,2	261,8	265,8	269,1	271,8	273,8	274,9	275,3	274,6	272,7	269,4	264,2
$S_{e23}$	252,6	258,4	263,5	268,2	272,3	275,8	278,7	281,0	282,6	283,4	283,4	282,4	280,3	276,7
$S_{e24}$	258,3	264,1	269,3	274,0	278,2	281,8	284,9	287,4	289,3	290,5	291,0	290,7	289,4	287,0
$S_{e25}$	263,6	269,3	274,5	279,2	283,5	287,2	290,4	293,1	295,2	296,7	297,6	297,8	297,1	295,6
$S_{e26}$	268,4	274,0	279,2	283,9	288,2	292,0	295,3	298,0	300,3	302,1	303,2	303,7	303,6	302,6
$S_{e27}$	272,6	278,2	283,4	288,1	292,3	296,1	299,5	302,3	304,7	306,6	307,9	308,7	308,9	308,4
$S_{e28}$	276,3	281,9	287,0	291,6	295,9	299,6	303,0	305,9	308,3	310,3	311,8	312,7	313,1	313,0
$S_{e29}$	279,5	284,9	290,0	294,6	298,7	302,5	305,8	308,7	311,1	313,1	314,7	315,8	316,3	316,4
$S_{e30}$	282,0	287,3	292,3	296,8	300,9	304,5	307,8	310,7	313,1	315,1	316,7	317,8	318,5	318,6
$S_{e31}$	283,8	289,0	293,8	298,2	302,2	305,8	309,0	311,8	314,1	316,1	317,7	318,8	319,4	319,6

16. att.  $g_{(b,e)}$  kopa.



17. att.  $\lambda_{f(b,e)}$  pilnā un ierobežotā kopa.



18. att.  $g(b,e)$  pilnā un ierobežotā kopa.

## Pielikums

Darba pielikumā ir apskatīts īpašs gadījums, kad ilgizturības sadalījuma funkcijai ir normāls sadalījums. Tāda veida aproksimācija var būt izmantota, kad rezultējošā atteice ir nelielo defektu summēšanas rezultāts un laiks līdz rezultējošajai atteicei ir laika intervālu starp nelieliem defektiem summa. Uzskatām, ka gadījuma lielumiem  $T_d$  un  $T_c$  ir viena tipa sadalījuma funkcija ar to pašu mēroga parametru, bet ar dažādiem nobīdes parametriem. Šajā gadījumā kopējais inspekciju skaits  $R_k$  pirms pirmās atteices izvēlētai inspekciju programmai var būt atrasts kā turpmāk minēto parametru funkcija:  $\theta_1$  — mēroga parametrs,  $\delta = \frac{\theta_{c0} - \theta_{d0}}{\theta_1}$  koeficients,  $T_d$ ,  $T_c$ ,  $\theta_{0c}$  parametru sadalījuma funkcijas,  $n_f$  gaisa kuģu skaits parkā,  $\frac{1}{a\theta_1}$  — gaisa kuģu ekspluatācijas sākšanas intensitāte un  $b\theta_1$  – inspekciju intervāls, kur  $a$  un  $b$  ir mainīgas vērtības.

Pielikuma otrajā daļā ir parādīti *Matlab* skripti, kas tika izstrādāti aprakstītajām metodikām. Skriptu saraksts ir parādīts 2. tabulā.

## 2. tabula

### Matlab skripti

Nr.	Moduļa nosaukums	Tips	Apraksts
1	Fleet_Reliability.m	Programma	Šī programma ļauj izveidot inspekciju programmu gaisa kuģu parkam. Var iegūt dažādas sakarības
2	Fleet_Reliability.fig	Interfeiss	Programmas interfeiss, kas atvieglo darbību
3	f_Fleet_Pf	Funkcija	Funkcija, kas veic atteices varbūtības aprēķinu izvēlētajai programmai
4	f_PfInt	Funkcija	Funkcija, kas veic ekstrapolāciju
5	Safe_Life_Approach.m	Programma	Programma, kas veic izdevīgāko <i>safe-life</i> aprēķinu zem atteices intensitātes ierobežojuma
6	Safe_Life_Approach.fig	Interfeiss	Tas ir programmas interfeiss, kas atvieglo darbību
7	f_AC_Step	Funkcija	Funkcija, kas aprēķina izdevīgākos lēmumus pēc Hovarda algoritma

## SECINĀJUMI

Galvenie šī darba secinājumi.

- Tiek uzskaitīti divu veidu uzdevumi: nogurumam pakļauto gaisa kuģu inspekcijas programmas plānošana; gaisa kuģa aizstāšanas laika noteikšana, ievērojot avioliņijas nogurumu atteices intensitātes ierobežojumus, ņemot vērā ekonomisko efektivitāti.
- Pirmajā uzdevumā pretēji pastāvošajam analogajam uzdevuma risinājumam tiek uzskatīts, ka informācijas apmaiņa par jebkādu noguruma plaisas atklāšanu parkā ir ņemta vērā, lai nodrošinātu nepieciešamo drošumu visā gaisa kuģu parkā. Tiek arī ņemta vērā gaisa kuģa eksploatācijas uzsākšanas intensitāte, it īpaši svarīgi jauna tipa gaisa kuģa eksploatācijas uzsākšanai (pašreizējā darba grafiskā atšķirība no iepriekšējiem darbiem [33, 34, 35, 36, 37, 38] ir attēlota promocijas darba 4.8. attēlā atšķirībā no 4.6. attēla). Vērā tika ņemts arī cilvēciskais faktors (precīzāk, tiek ņemta vērā plānotās inspekcijas varbūtība).
- Pirmo reizi tiek prezentēta visu gaisa kuģu parka drošuma *p-set* funkcijas definīcija. Tādējādi ļaujot izmantot minimāksa paņēmieni, lai nodrošinātu gaisa kuģu parka drošumu pie nezināmiem izturības sadalījuma parametriem. Parametri tiek novērtēti, izmantojot pieņemšanas testa rezultātus. Tas nozīmē, ka gaisa kuģis, kurš neatbilst pieņemšanas prasībām, nedrīkst tikt eksploatēts, un tas tiek nosūtīts uz pārprojektēšanu. Šajā gadījumā tiek garantēta gaisa kuģa drošums eksploatācijā attiecībā uz visiem plaisu izplešanās parametriem, jo eksploatācijā tiek izmantoti tikai tie gaisa kuģi, kuri atbilst pieņemšanas prasībām.
- Galvenais šīs problēmas risinājums šajā darbā tiek nodrošināts, izmantojot risinājumu, kad atteicēm ir lognormalais sadalījums, kas visbiežāk tiek izmantots, lai aprakstītu noguruma ilgizturību. Tiek arī apskatīts normāla sadalījuma gadījums. Gadījumā, ja gala atteice ir konkrētas atteices summas rezultāts, var pieņemt ilgizturības normāla sadalījuma novērtējumu. Šis modelis ļauj vienkāršot detaļu inspekcijas programmas izstrādi, samazinot vērā ņemamo parametru daudzumu.
- Otrajā uzdevumā tiek apskatīta neierobežotas eksploatācijas laika sistēmas drošums un aizstāšanās laika noteikšana. Atteices gadījumā eksploatācijā tiek ieviesta jauna detaļa, kas ir analogiska iepriekšējai. Pretstatā piedāvātajam risinājumam, piemēram, ar Hovarda algoritmu, sistēmas (nosacīti sauktas par avioliņiju)

ekonomiskās efektivitātes optimizēšana tiek apskatīta, ievērojot sistēmas atteices intensitātes (iekārtas atteices skaits laika vienībā) ierobežojumus.

- Tika radīta modulārās programmatūras pakete, lai realizētu iepriekš norādīto modeli. Šī programmatūras pakete ir ērts, elastīgs un funkcionāls pētījumu instruments. Specializētais izmēģinājuma modulis ļauj aprēķināt inspekcijas parametrus vai noteikt *safe-life* parametrus. Modelēšanas rezultātus var uzglabāt vēlākai izmantošanai.

### **Turpmākās izpētes virziens**

Aprakstītais modelis ir vienkāršots reālo procesu atspoguļojums. Ir iespējams uzlabot modeli, iekļaujot papildu mainīgos, kas var nodrošināt uzticamākus aprēķinus, un tā rezultātā būs retākas inspekcijas programmas ar tādu pašu drošuma līmeni. Pirmais solis varētu būt pirmās inspekcijas laika specificēšana un inspekcijas intervāls, ko ar laiku varētu samazināt.

Ir arī iespējams izstrādāt individuāli pielāgotu inspekcijas programmu katram gaisa kuģim gaisa kuģu parkā, izmantojot gaisa kuģa ekspluatācijas uzsākšanas kalendāra laiku un esošo gaisa kuģu ekspluatācijas informāciju. Tas var novest pie iespējamās visu parka gaisa kuģu dinamiskas inspekcijas programmas, kas var mainīties, palielinoties inspektējamo gaisa kuģu konstrukciju skaitam.

Ir nepieciešams atrast *safe-life* risinājumu un noteikt nomaiņas laiku, ja ir nezināmi plaisas izplatības parametri. Šādai metodikai var izmantot minimaksa pieeju. To var pieņemt kā turpmāku pētījuma attīstību.

### Izmantotās literatūras un avotu saraksts

1. Campbell G.S., Lahey R. A Survey of Serious Aircraft Accidents Involving Fatigue Fracture. *Int. J. Fatigue*, Vol. 6, No. 1, 1984, pp. 25–30.
2. Torkington C. Fatigue Problems Old and New, *Aircraft*, 1980, pp. 8–11.
3. The Comet Inquiry. *Flight*. 29 October, 1954: 638-639, 652-654; 5 November, 1954: 725-728; 19 November, 1954: 731-732, 740-742; 26 November, 1954: 787–789.
4. Нормы летной годности гражданских самолетов СССР. Издание 2-е, М., 1974, 343 с.
5. U. S. Sets Pattern for Fatigue Standards. *Aviation Week and Space Technology*, March 28, 1977, 32 p.
6. Лундберг Б. Количественный статистический подход к проблеме усталостной прочности. *Усталостная прочность и долговечность летательных конструкций*, М., 1965, pp. 499–520.
7. Hooke F.H. *Aircraft Structural Reliability and Risk Theory. A Review*. 1977, 50 p. (ARL STRUC. TM-253).
8. Hooke F.H. A New Look at Structural Reliability and Risk Theory. *AIAA Journal*, Vol 17, No. 9, pp. 980–987.
9. Yang J.N., Trapp W.J. Reliability Analysis of Aircraft Structures under Random Loading and Periodic Inspection. *AIAA Journal*, 1974, Vol. 12, No. 12, pp. 1623–1630.
10. Yang J.N., Trapp W.J. Inspection Frequency Optimization for Aircraft Structures Based on Reliability Analysis. *Journal of Aircraft*, Vol. 12, No. 5, 1975, pp. 494–496.
11. Yang J.N. Reliability Analysis of Structures Under Periodic Proof Tests in Service. *AIAA Journal*, Vol. 14, No. 9, 1976, pp. 1225–1234.
12. Yang J.N. Optimal Periodic Proof Test Based on Cost-Effective and Reliability Criteria. *AIAA/ASME/SAE. Proceedings of 17<sup>th</sup> Conference on Structures, Structural Dynamics and Materials*, 1976, pp. 567–576.
13. Yang J.N., Trapp W.J. Joint Aircraft Loading / Structure Statistics of Time to Service Crack Initiation. *Journal of Aircraft*, Vol. 13, No. 4, 1976, pp. 270–278.
14. Yang J.N. Statistical Estimation of Economic Life for Aircraft Structures. *Journal of Aircraft*, Vol. 17, No. 7, 1980, pp. 528–535.
15. Yang J.N. Statistical Crack Growth in Durability and Damage Tolerant Analysis. *AIAA/ASME/ASCE/AHS. Proceedings of 22nd Conference on Structures, Structural Dynamics and Materials*, Vol. 1, 1980, pp. 38–44.



16. Yang J.N., Manning S.D. Distribution on Equivalent Initial Flaw Size. *Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, San Francisco, California, 1980, pp. 112–120.
17. Зимонт Е.Л. *Определение сроков осмотров авиационных конструкций с учетом двухстадийности усталостного повреждения*. Ученые записки ЦАГИ, 1977, т. У111-1, с. 79–86.
18. Зимонт Е.Л., Сенник В.Я. *Модель определения надежности конструкции крыла самолета*. Ученые записки ЦАГИ, 1982, т. У111-5, с. 118–124.
19. Никонов В.В. Расчет надежности силовых элементов с учетом периодической дефектоскопии. В сб.: *Динамика, выносливость и надежность авиационных конструкций и систем*. М., МИИГА, 1980, с. 107–111.
20. Никонов В.В., Байков В.М. Численная оценка параметров уравнения роста трещин с учетом зоны пластичности. *Информационный листок № 87—3*. М.: МГЦ НТИ 1987. с. 1–3.
21. Стреляев В.С., Никонов В.В., Байков В.М. Экспериментальное исследование циклической трещиностойкости при случайном нагружении на установках с управляющими ЭВМ. *Заводская лаборатория*, № 12, 1987, с. 62–67.
22. Никонов В.В. Шапкин В.С. Влияние положительной перегрузки на кинетику развития усталостной трещины. *Прочность элементов авиационных конструкций: Межвуз. научн. сборник*. Уфа УАИ, 1987, с. 62–67.
23. Никонов В.В., Стреляев В.С. *Расчетно экспериментальная оценка циклической трещиностойкости при эксплуатационных режимах нагружения*. М.: Машиностроение, 1991, 68 с.
24. Смирнов В.С., Стреляев В. С. *Методика построения программы технического обслуживания и ремонта планера транспортного самолета гражданской авиации*. М.: МИИ ГА, 1983, Том 1, 54 с.
25. Нестеренко Г.И. Живучесть самолетных конструкций. *Межвузовский сборник научных трудов*. Вып. 2, КИИГА, 1976, с. 60–70.
26. Нестеренко Б.Г., Нестеренко Г.И. Живучесть самолетных конструкций. *Научный вестник МГТУ ГА*, 2007, ном. 119, 57–69 с.
27. Нестеренко Г.И. Ресурс и живучесть самолетных конструкций. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. М.: Наука, 2005, №1, с. 106–118.

28. Мартынов Ю.А., Макаров В.А. Система анализа качества ремонта и надежности агрегатов авиатехники по данным о досрочных снятиях с эксплуатации. В кн. *Вопросы инженерного обеспечения полетов: Тез. Докладов*. М.: МИИГА, 1985.
29. Heath W.G. Fail Safe? *Tech. Air*. November, 1979; December, 1979.
30. Kirkby W.T., Forsyth P.J.E., Maxwell R.D.J. Design Against Fatigue-current Trends. *Aeronautical Journal*. January, 1980.
31. Hall J, Goranson U.G. Structural Damage Tolerance of Commercial Jet Transports. Reprints from 1984 Boeing AIRLINER. Part 1, Damage Tolerance Concepts. Jan.-Mar., 1984; part 2, 727 / 737 / 747 Supplement Structural Inspection Programs (Apr. –June, 1984); part 3, 757 / 767 Structural Inspection Program. July–Sep., 1984.
32. Yang J.N., Manning S.D. Aircraft Fleet Maintenance Based on Structural Reliability Analysis. *Journal of Aircraft*. March–April, 1994; 31 (2): 419–26.
33. Парамонов Ю.М., Соболев П.М., Кимлик Н.М. и др. *Методические указания (1 редакция) по расчету периодичности осмотров планеров самолетов на основе записей МСРП*. Рига: РКИИГА, 1984, 58 с.
34. Соболев П.М. *Разработка методики выбора графика осмотров конструкции летательного аппарата*. Автореф. дис. – канд. техн. наук. Рига: РКИИГА, 1984, 125 с.
35. Кимлик Н.М. *Разработка метода определений графика осмотров силовых элементов на парке самолетов*. Диссертация на соискания ученой степени канд.тех.н.
36. Kuznetsov A. *Ensuring and Optimising the Safety of the Complex Systems*. Doctoral Thesis. Riga: RTU, 2006.
37. Nechval K. *Ensuring and Checking Reliability and Survivability of Aircraft Structures with Weibull Distribution Law of Fatigue Durability*. Doctoral Thesis. Riga: RTU, 2008.
38. Hauka M. *Airframe Inspection Planning*. Summary of Doctoral Thesis. Riga: RTU, 2015.
39. Ahmed A., Bakuckas J., Awerbuch J., Lau A., Tan T., Evolution of Multiple-Site Damage in the Riveted Lap Joint of a Fuselage Panel. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Joint NASA/FAA/DoD Conference on Aging Aircraft*, 31 January—3 February 2005, Palm Springs, CA.
40. Mosinyi B., Bakuckas J., Awerbuch J., Lau A., Tan T., Ramakrishnan R. Extended Fatigue Testing of High-Usage Aircraft Fuselage Structure. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Joint NASA/FAA/DoD Conference on Aging Aircraft*, 31 January – 3 February 2005, Palm Springs, CA.

41. Khan U. Non-destructive Testing Applications in Commercial Aircraft Maintenance. *Proceedings of 7<sup>th</sup> European Conference on Non-destructive Testing*, Vol. 4. No. 6, 1999.
42. Gertsbakh I. *Reliability Theory with Applications to Preventive Maintenance*. Germany: Springer, 2000, 219 p.
43. Rausand M., Hoylans A. *System Reliability Theory. Models, Statistical Methods and Applications*. New Jersey: Hoboken, 2004, 636 p.
44. Бахельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. М: Радио и связь, 1988.
45. Paramonov Yu., Kuznetsov A., Kleinhofs M. *Reliability of Fatigue-Prone Airframes and Composite Materials*. Riga: RTU, 2011, 121 p.
46. Rummel W. D., Matzkanin G. A. *Nondestructive Evaluation (NDE) Capabilities Data Book*. 1997, 598 p.
47. Howard R. A. *Dynamic Programming and Markov Processes*. Cambridge, 1960, 136 p.
48. Ireland J. *Principles of Accounting*. London, 2005, 280 p.
49. Albert, W.A.J. Über Treibseile am Harz. *Archive für Mineralogie Geognosie Bergbau und Hüttenkunde*. vol. 10, 1838, pp. 215–34.
50. Shannon P.A. *Basics of Aircraft Maintenance Programs for Financiers*. Issue 1, 2010.
51. Mourabay J. *Reliability-Centered Maintenance*. New York: Industrial Press, 1997, 440 p.
52. Tretyakov S., Paramonov Yu. Reliability of Fleet of Aircraft. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication (RelStat 12)*, Riga, Latvia, 2012, pp. 116–121. ISBN 978-9984-818-49-8.
53. Paramonov Yu., Tretyakov S. Reliability of Fleet of Aircraft Taking into Account Information Exchange About the Discovery of Fatigue Cracks and the Human Factor. *AVIATION*. Vol. 16(4), 2012, pp. 103–108. ISSN 1648-7788 DOI: 10.3846/16487788.2012.753680.
54. Tretyakov S., Hauka M., Paramonov Yu. Reliability of Aircraft Fleet and Airline. *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Scientific Aspects of Unmanned Mobile Objects*. Deblin, Poland, 2013, pp. 86–88. ISBN 978-83-63792-28-2.
55. Paramonov Yu., Hauka M., Tretyakov S. Minimax Decision for Reliability of Aircraft Fleet and Airline. *Book of Abstracts of Seventh International Workshop on Simulation*. Rimini, Italy, 2013, pp.285–286. ISSN 1973-9346.
56. Paramonov Yu., Hauka M., Tretyakov S. Planning of Inspection Interval to Provide Reliability of Fatigue-Prone Aircraft Using Result of Acceptance Fatigue Test. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Reliability and Statistics in*

*Transportation and Communication (RelStat 13)*. Riga, Latvia, 2013, pp. 39–47. ISBN 978-9984-818-58-0.

57. Hauka M., Tretyakov S., Paramonov Yu. Minimax Inspection Program for Reliability of Aircraft Fleet and Airline. *Proceedings of 8<sup>th</sup> International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability (MIMAR)*. Oxford, England, 2014, pp. 120–124.
58. Paramonov Yu., Tretyakov S., Hauka M. Inspection Program Development for an Aircraft Fleet and an Airline on the Basis of the Acceptance Fatigue Test Result. *Transport and Telecommunication*, Vol. 16, no 1, 2015, pp. 1–8. DOI 10.1515/ttj-2015-0001.
59. Paramonov Yu., Tretyakov S., Hauka M. Fatigue-Prone Aircraft Fleet Reliability Based on the Use of a P-set Function. *Reliability: Theory & Applications*, #01 (36), Vol. 10, 2015, pp. 40–49. ISSN 1932-2321.
60. Paramonov Yu., Tretyakov S., Hauka M. Binary Lambda-set Function and Reliability of Airline. *Reliability: Theory & Applications*, #03 (38), Vol. 10, 2015, pp. 37–42. ISSN 1932-2321.
61. Paramonov Yu., Tretyakov S., Hauka M. Modelling of Reliability of Aircraft Fleet and Airline. P-set and  $\lambda$ -set Functions. *Submitted to Proceedings of Eighth International Workshop on Simulation*. Vienna, Austria, 2015.