

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Māris HAUKA

**GAISA KUĢU KONSTRUKCIJAS INSPEKCIJAS
PLĀNOŠANA**

Promocijas darba kopsavilkums

2015

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Transporta un mašīnzinību fakultāte
Aeronautikas institūts

Māris HAUKA

Doktora studiju programmas “Transports” doktorants

**GAISA KUĢU KONSTRUKCIJAS
INSPEKCIJAS PLĀNOŠANA**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr.habil.sc.ing., profesors
J. Paramonovs

**RTU Izdevniecība
Rīga 2015**

Hauka M. Gaisa kuģu konstrukcijas inspekcijas plānošana. Promocijas darba kopsavilkums.
Rīga: RTU Izdevniecība, 2015. – 29 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes RTU- P-22 2014 gada 3. novembra lēmumu,
protokols Nr. 2/2014.



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

ISBN 978-9934-10-664-4

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. gada 19. martā, plkst. 14.30 Rīgas Tehniskās universitātes Aeronautikas institūtā Lomonosova ielā 1A, k-1, 218. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Prof., Dr.habil.sc.ing. Vladimirs Šestakovs,
Rīgas Tehniskā universitāte

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

Prof. 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.

Māris Hauka(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 7 pielikumus, 58 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 152 lappuses. Literatūras sarakstā ietverti 47 nosaukumi.

SATURS

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	5
Tēmas aktualitāte	5
Pētījuma mērķis	5
Pētījuma uzdevumi	6
Pētījumā izmantotās metodes un līdzekļi.....	6
Aizstāvamās tēzes	6
Pētījuma novitāte	7
Darba rezultāti.....	7
Praktiskā vērtība	8
Darba rezultātu aprobācija	8
Uzstāšanās konferencēs	8
Publikācijas periodiskajos izdevumos:	9
Darba struktūra	10
DARBA SATURS	11
1. nodaļa. Civilās aviācijas konstrukcijas un drošuma filozofijas attīstības vēsture	11
2. nodaļa. Apskates programmas	12
3. nodaļa. Atjaunošanas teorija	12
4. nodaļa. Inspekcijas programmas izvēles loģika un metodes	14
5. nodaļa. Aprēķina piemērs	25
Secinājumi	29

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Metāla noguruma veidotie dažādu tipu un izmēra bojājumi ietekmē gaisa kuģu drošumu. Noguruma plaisu veidošanas riskam nereti ir pakļauti primārie konstrukcijas elementi. Noguruma plaisu nekontrolēta augšana var izraisīt pilnīgu bojātās konstrukcijas atteici, kas var radīt visa gaisa kuģa atteikumu. Šī problēma kļūst aktuāla gadījumos, kad gaisa kuģis tiek aktīvi un ļoti ilgstoši ekspluatēts. Ir divi veidi, kā cīnīties ar šo problēmu. Pirmais ir ierobežot ekspluatācijas laiku, balstoties uz nogurumu pētījumiem laboratorijā. Un otrs ir izveidot inspekciju programmu, ar kuras palīdzību būtu iespējams atrast plaisu, pirms tā ir spējusi atslābināt konstrukciju zem bīstamā līmeņa. Līdz šim daudz zinātnisko pētījumu ir veltīts apskašu intervālu noteikšanai, bet šīm metodēm ir vesela virkne trūkumu, kas neļauj vai padara nepiespējamu tās lietot tādu aviācijas konstrukciju apskates programmu izveidē, kas ņemtu vērā noguruma plaisu veidošanos, kā arī šajos pētījumos netiek ņemtas vērā noguruma plaisas augšanas īpatnības. Esošajās metodikās tiek ņemts vērā tikai laika sadalījuma likums līdz remontam un laika sadalījuma likums līdz atteikumam, kas tiek uzskatīts kā zināms, ļaujot risināt varbūtības uzdevumu. Piedāvātajā metodikā tiek ņemtas vērā noguruma plaisas augšanas procesa īpatnības. Attiecīgās plaisas parametri tiek iegūti no pieņemšanas pārbažu rezultātiem, un tiek ņemta vērā iespēja atgriezt konstrukciju pārstrādei, ja izmēģinājuma rezultāti ir slikti. Tas ļauj galējā lēmuma pieņemšanā izmantot *minmax* kritēriju. Izstrādātās metodikas nosaukums ir *MinMax*. Esošās metodikas balstās uz zināmu nejauša procesa parametru, kas tiek izmantots, lai modelētu noguruma plaisu veidošanos un noteiktu iespējamus defektus. Aprēķinos nepieciešams izmantot matemātiskās statistikas paņēmienus, kur papildus vienādojuma parametriem tiek izmatots arī korelācijas koeficients. Reālās situācijās gaisa kuģa korpusa noguruma eksperimentu skaits ir ļoti limitēts un noguruma plaisas augšanas trajektorijas parametri ir ļoti nejauši. Plānojot GK inspekcijas intervālus, ir jāņem vērā ne tikai drošuma prasības, bet arī ekonomiskie parametri.

Pētījuma mērķis

Izstrādāt nogurumu plaisu veidošanās procesam atbilstošu gaisa kuģu konstrukciju apskašu intervālu izvēles metodiku, un izveidot uz metodiku balstītu datorprogrammu, nodrošinot gaisa kuģu ekspluatācijas drošumu.

Pētījuma uzdevumi

Pētījuma mērķa sasniegšanai izvirzītie darba uzdevumi:

- 1) izstrādāt inspekcijas programmas metodiku, kas balstās uz ļoti ierobežotu noguruma plaisas statistisko informāciju par tās nejaušu attīstības procesu un ekonomiskajiem parametriem.
- 2) izveidot datorprogrammu šī uzdevuma risināšanai.

Pētījumā izmantotās metodes un līdzekļi

- Aviācijas konstrukciju noguruma plaisas augšanas teorija
- Varbūtības teorija
- Matemātiskā statistika
- Markova ķēžu teorija un pusmarkova process ar ienākumiem
- Vizuālorientētā programmēšana

Darbā ir izmantota datu matemātiskā apstrāde un matemātiskā modelēšana, izmantojot *MathWorks MatLab* programmatūru. Aprēķinu veikšanai tiek lietotas AERTI zinātniskās darba stacijas.

Aizstāvamās tēzes

- Apskašu periodiskuma plānošanas metodē, kas balstās uz atjaunošanas teoriju, tiek ņemta vērā noguruma plaisas augšanas trajektorija.
- Dotajā darbā plaisas augšanas likuma parametri tiek novērtēti, izmantojot pieņemšanas pārbaudes rezultātus.
- Piedāvātā statistiskā lēmuma funkcija nodrošina nepieciešamo drošumu, pat ņemot vērā nezināmos parametrus.
- Pēc piedāvātās metodikas izvēlēts apskašu periodiskums nodrošina augstus iespējamus ienākumus, saglabājot noteiktos drošuma ierobežojumus.

Pētījuma novitāte

Mūsdienīgās metodēs balstītās apskašu periodiskuma plānošanas metodēs, kas balstās uz atjaunošanas teoriju, kā likums tiek ņemta vērā tikai izstrādājuma ilgmūžība. Savukārt piedāvātajā metodē tiek ņemta vērā noguruma plaisas augšanas trajektorija.

Esošajās metodikās izstrādājuma ilgmūžības sadalījuma likums tiek pieņemts kā zināms un tiek risināts varbūtības teorijas uzdevums. Dotajā darbā plaisas augšanas likuma parametri tiek novērtēti pēc pieņemšanas pārbažu rezultātiem.

Izstrādātajā metodikā noteikts, ka izstrādājuma prototips netiek pieņemts ekspluatācijā un tiek nodots uz pārstrādi, ja pieņemšanas pārbažu rezultāti neatbilst uzstādītajām prasībām. Tas ļauj apskašu intervālu noteikšanas uzdevumu risināt izmantojot *minmax* pieeju. Šajā gadījumā ražojuma drošums ekspluatācijā tiek nodrošināts pie jebkādiem plaisas augšanas parametriem un sadalījuma īpatnībām, jo pie ekspluatācijas tiek pielaisti tikai ražojumi, kas atbilst noteiktajām prasībām un neatbilstošie ražojumi tiek nosūtīti uz pārstrādi.

Uzdevumu risināšanā tiek izmantota pusmarkova ķēžu procesu teorija ar ienākumu parametriem. Tas ļauj risināt divus kritiskus uzdevumus:

- 1) primārais uzdevums — nodrošināt drošumu,
- 2) sekundārais uzdevums — kontrolēt ekspluatācijas izdevumus.

Pareizi izvēlēts apskašu periodiskums nodrošina maksimālos iespējamos ienākumus, saglabājot noteikto drošumu.

Darba rezultāti

1. Tiek piedāvāts drošuma prasībām atbilstošs gaisa kuģu un avioliņijas inspekcijas programmas izvēles risinājums.

2. Specifiskais statistiskais risinājums ietver:

- a) specifisku noguruma plaisu augšanas modeļa lietojumu, kura daži parametri tiek noteikti, ņemot vērā reālus pilna diapazona noguruma plaisu veidošanās pārbažu rezultātus;
- b) Markova ķēžu un pusmarkova procesa ar ienākumiem teorija tiek izmantota gaisa kuģa drošuma atteikuma intensitātes un ienākumu noteikšanai;
- c) piedāvātā statistiskā lēmuma funkcija nodrošina nepieciešamo drošumu, pat ņemot vērā nezināmos parametrus. Tas tiek panākts, pielietojot *MinMax* metodi, kas gadījumā, ja pieņemšanas testu rezultāti neatbilst uzdotajām prasībām, paredz gaisa kuģa atgriešanu pārprojektēšanai.

Praktiskā vērtība

Balstoties uz pilna spektra gaisa kuģa konstrukcijas noguruma plaisu augšanas pārbaudēm, var tikt izveidota inspekciju programma, ko var lietot gan gaisa kuģu, gan avioliņijas izstrādes modeļos, ņemot vērā:

- noguruma plaisu augšanas pārbaudes rezultātus, kas paredz iespēju atgriezt konstrukciju pārstrādei, ja prasības nav ievērotas;
- gaisa kuģu uzdoto drošumu un avioliņijas atteikumu intensitātes ierobežojumus;
- inspekcijas tehnoloģijas efektivitāti;
- ekonomiskos parametrus; inspekcijas, plaisas atklāšanas, noguruma atteikuma un jauna gaisa kuģa iegādes izmaksas;
- *MatLab* programmēšanas vides ierobežojumus un iespējas.

Darba rezultātu aprobācija

Uzstāšanās konferencēs:

1. The 4th International Conference On Scientific Aspects Of Unmanned Aerial Vehicle, “Inspection program development for stationary operation of fatigue-prone aircraft park”, Maris Hauka, Yuri Paramonov
2. 10th International Vilnius Conference on Probability Theory and Mathematical Statistics) 28/06/2010-02/07/2010, “RELIABILITY OF PARK OF AIRCRAFT AT MINIMUM COST “, Maris Hauka; Yuri Paramonov.
3. Reliability and Statistics in Transportation and Communication (RelStat 10) 20/10/2010-23/10/2011, Reliability of Aircraft and Airline; M.Hauka, Yu. Paramonov , Transport and telecommunication, Rīga.
4. 9th Tartu Conference on MULTIVARIATE STATISTICS & the 20th International Workshop on Matrices and Statistics. 26.06.2011 - 1.07.2011, Tartu, Estonia; Minimax decision for solution of the problem of aircraft and airline reliability processing results of acceptance full-scale fatigue test of airframe; M.Hauka, Yu. Paramonov;
5. International Conference on Stochastic Modeling Techniques and Data Analysis (SMTDA 2012) 5.June-8. July, 2012 Greece, Chania, MinMax Choice of Inspection Program of Fatigue-Prone Airplane Structure //, M.Hauka, Yu. Paramonov;
6. International Conference "Probability Theory and Its Applications", Russia, Moscow, 26.-30. June, 2012 Reliability of Aircraft and Airline; J. Paramonovs, M.Hauka

7. Intelligent transport systems 2012 (ITS'12), 18. - 20. July, 2012, Latvia, Riga. MinMax approach for aircraft inspection program interval selection in order to ensure airline safety; M. Hauka, J. Paramonovs.
8. RIGA TECHNICAL UNIVERSITY 53rd INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE, 11-12 October, 2012, Latvia, Rīga, Minmax approach for aircraft inspection program interval selection in order to ensure airline safety; M. Hauka, J. Paramonovs.
9. Seventh International Workshop on Simulation, May 21-25, 2013, Rimini, Italy, Minimax decision for reliability of aircraft fleet and airline J. Paramonovs, M. Hauka, S. Tretjakovs.
10. 8th IMA International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability (MIMAR) 10 - 12 July 2014, Wadham and St Catherine's Colleges, University of Oxford, Minimax inspection program for reliability of aircraft fleet and airline; M. Hauka, S. Tretjakovs, and J. Paramonovs.

Publikācijas periodiskajos izdevumos:

1. Hauka, M., Paramonovs, J. Semi-Markov Model of Aircraft and Airline Reliability with Minimax Decision in Case of Unknown Parameter of Fatigue Crack Growth // International Review of Aerospace Engineering. - Vol.6, No.3. (2010) pp. 329-336.
2. Hauka, M., Paramonovs, J. Reliability of Aircraft and Airline // Transport and Telecommunication. - Vol.11, No.4. (2010) pp. 59-65.
3. Hauka, M., Paramonovs, J. Inspection Program Development for Stationary Operation of Fatigue-Prone Aircraft Park // Scientific Aspects of Unmanned Mobile Vehicle, : Kielce University of Technology, 2010. – pp. 559-572.
4. Hauka M., Paramonovs J. Reliability of Park of Aircraft at Minimum Cost // 10th International Vilnius Conference on Probability Theory and Mathematical Statistics, Lithuania, Vilnius, 28. June-2. July, 2010. – pp. 161-161.
5. Hauka, M., Paramonovs, J. Inspection Program Development for Stationary Operation of Fatigue-Prone Aircraft Park // 4th International Conference on Scientific Aspects of Unmanned Aerial Vehicle (SAUAV-2010), Poland, Kielce, 5.-7. May, 2010. – pp. 276-284.
6. Hauka, M., Paramonovs, J. Minimax Decision for Solution of the Problem of Aircraft and Airline Reliability Processing Results of Acceptance Full-Scale Fatigue Test of Airframe // 9th Tartu Conference on Multivariate Statistics & the 20th International Workshop on Matrices and Statistics, Estonia, Tartu, 26. June-1. July, 2011. – pp. 29-29.

7. Hauka, M., Paramonovs, J. Inspection program development using minimax method // 11th International Conference “Reliability and Statistics in Transportation and Communication -2011, Riga, Latvia, 19–22. October 2011, pp 105-114.
8. Hauka, M., Paramonovs, J. MinMax Choice of Inspection Program of Fatigue-Prone Airplane Structure // International Conference on Stochastic Modeling Techniques and Data Analysis (SMTDA 2012), Greece, Chania, 5.June-8. July, 2012. – pp. 47-48.
9. Hauka, M., Paramonovs, J. Minimax Reliability of Aircraft and Airline // International Conference "Probability Theory and Its Applications", Russia, Moscow, 26.-30. June, 2012. – pp. 282-283.
10. Hauka, M., Paramonovs, J. Inspection program for the case of two random parameters of fatigue crack // 12th International Conference “Reliability and Statistics in Transportation and Communication -2012, Riga, Latvia, 17–20. October 2012, pp. 78-84.
11. Paramonovs, J., Hauka, M., Tretjakovs, S. Planning of Inspection Interval to Provide Reliability of Fatigue-Prone Aircraft Using Result of Acceptance Fatigue Test . No: *Reliability and Statistics in Transportation and Communication: The 13th International Conference (RelStat'13)*, Latvija, Rīga, 16.-19. oktobris, 2013. Riga: TSI, 2013, 39.-47.lpp. ISBN 9789984818597.
12. Hauka, M., Paramonovs, J. Airline and Aircraft Reliability. *Transport and Aerospace Engineering*. Nr.1, 2014, 9.-14.lpp. ISSN 2255-968X. Pieejams: doi:10.7250/tae.2014.002
13. M. Hauka, S. Tretjakovs, and J. Paramonovs, Minimax inspection program for reliability of aircraft fleet and airline; Proceedings for 8thIMA International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability (MIMAR)10 - 12 July 2014, Wadham and St Catherine's Colleges, University of Oxford, pp 125-130;

Darba struktūra

Darbs satur ievadu, piecas nodaļas, nobeigumu, 7 pielikumus, 58 ilustrācijas, 7 tabulas, 131 lapa, 47 literatūras atsauces.

- Ievadā sniegts pārskats par metāla noguruma veidotajiem atteikumiem un metodēm, kā cīnīties ar iespējamajiem metāla noguruma izraisītajiem atteikumiem.
- 1. nodaļā tiek apskatītas civilās aviācijas konstrukcijas drošuma filozofijas attīstības vadlīnijas un ar to saistītie atgadījumi. Attīstības vēsturi, saistībā ar aviokatastrofām, kuras izraisīja metāla noguruma radīti atteikumi, var iedalīt vairākos posmos.

- 2. nodaļā tiek izskaidrota vienkāršota apskates programmas izveide, uzbūve un iedalījums, lai noskaidrotu gaisa kuģu apskašu programmu būtību un īpatnības.
- 3. nodaļā tiek aplūkotas dažādas atjaunošanas funkcijas. Katrai no aplūkotajām pieejām ir saskatāmi dažādi trūkumi un priekšrocības. Doto teoriju apskats ļauj izdarīt nozīmīgus secinājumus, kas rada iespēju pilnveidot gaisa kuģu (GK) konstrukcijas apskašu programmu.
- 4. nodaļā ir aprakstīta inspekcijas programmas izvēles ideoloģija. Tā ļauj izvēlēties optimālu inspekciju programmu, izsverot gan iespējamos riskus, gan dažādas izmaksas, turklāt saglabājot augstu ticamību arī pie maza reāli veikto pilna spektra noguruma plaisu augšanas eksperimentu skaita. Nodaļā ir iekļauti izmantoto un piedāvāto matemātisko modeļu apraksti.
- 5. nodaļā tiek aplūkoti aprēķinu piemēri ar rezultātiem, izmantojot ceturtajā nodaļā aprakstīto metodiku. Galvenā atšķirība no citām metodikām ir iespēja vienlaicīgi ar atteikuma varbūtības vai atteikuma intensitātes aprēķinu noteikt ekonomisko efektivitāti. Pielietojot *MinMax* metodi noviržu ietekmes uz parametriem novērtējumā, rodas iespēja apstrādāt plaisas parametrus, kas pamatoti ar neliela skaita reālu eksperimentu rezultātiem.
- nobeigumā tiek apskatītas izstrādātās metodikas priekšrocības un apstiprināta darba uzdevumu izpilde.
- pielikumā ievietota paplašinātā atjaunošanas teorijas paskaidrojošā nodaļa un izstrādātās datorprogrammas skriptu izdrukas.

DARBA SATURS

1. nodaļa. Civilās aviācijas konstrukcijas un drošuma filozofijas attīstības vēsture

Nodaļā aprakstīta problēmas vēsture un sniegts pārskats par pamatdarbiem šajā pētījumā. Balstoties uz rakstā "A survey of aircraft accidents involving fatigue fracture" *G.S. Cambell, R. Lahey* (1981) sniegto informāciju, laika posmā no 1927. gada līdz 1981. gadam ir identificēti 1885 aviācijas negadījumi, kurus radīja struktūras noguruma plaisu bojājumi. Šajā laikā avārijās zaudēja dzīvību 2240 cilvēki. *Dornier Merkur* spārna atteikums bija reģistrēts 1927. gada 23. septembrī, vidēji tika fiksēti 67 atteikumi gadā. Tragiskākās katastrofas saistītas ar lidmašīnām *Comet* (1953,1954), *Fokker F-27* (1968), *F-111* (1969), *Hawker Siddeley* (1976) un *Boeing 707 - 321C* (1977). Vismasīvākie strukturālie bojājumi veiksmīgas nosēšanās

gadījumā reģistrēti lidmašīnai B-737 (1988) (89 000. lidojumā). Pēdējais plaši izskanējušais reģistrētais plaisu atklāšanas gadījums notika 2011. gada decembrī ar lidmašīnu *Airbus A380*, kad tika atklātas plaisas spārna ribu struktūrā. Šis gadījums vēlreiz pierādīja, ka nepieciešams turpināt lidmašīnu metāla noguruma plaisu veidošanās izpēti un prognozēšanu.

Nodaļā minēti vairāki darbi, kas ir veltīti Gaisa kuģu inspekcijas programmas izvēlei, kuras uzdevums ir atklāt noguruma plaisu, kamēr tās izmērs nav sasniedzis kādu kritisko izmēru, kā to apraksta *B. Lundberg, F. H. Hook, D. N. Young, V.Y. Sennik, V.V. Nikonov, N.N. Smirnov, V.S. Streljaev, I. Nesterenko* un citi autori. Liela nozīme šīs problēmas risināšanā ir *H.B. Kordonsky* un *J.A. Martynovam*, ko viņi ir izklāstījuši savos darbos. Tomēr šajos darbos nav ņemts vērā tas, ka atteikuma varbūtība ir atkarīga ne tikai no nejaušas noguruma plaisas augšanas dabas un inspekcijas metodikas, bet arī no beigu lēmuma pieņemšanas procedūras, kā arī nav ņemts vērā fakts, ka gaisa kuģa konstrukcija var tikt pārstrādāta.

Matemātisko modeļu izstrādi šajā pētījumā apskatītajā jomā var atrast *Y.M. Paramonov* un *P.M. Soboleva* darbos, kurus turpināja *N.M. Kimlik, A. Kuznetsov* un *K. Nechval*.

Šis darbs ir iepriekšējo darbu turpinājums un modeļa modifikācija, lai padarītu gaisa kuģi ne tikai drošāku, bet arī uzzinātu atteikumu intensitāti un aviolīniju ekonomiskos ienākumus.

2. nodaļa. Apskates programmas

Nodaļā tiek aprakstīts GK apskašu programmas izveides process un vienkāršotas apskašu programmas uzbūve, lai izskaidrotu GK apskašu programmas būtību un īpatnības. Nodaļā ir pamatota laika aprēķinu cikliskā specifika.

Aviācijas attīstības sākumposmā apskašu programmu izstrādāja galvenokārt piloti un mehāniķi, balstoties uz savu pieredzi un iespējām. Kad aviācija izveidojās par atsevišķu jaunu satiksmes veidu, sāka parādīties dažādas apskašu un remonta regulas, piemēram, *Msg-I, Msg-II, Msg-III* apskašu programmas izstrādes vadlīnijas.

3. nodaļa. Atjaunošanas teorija

Nodaļā aprakstītas matemātiskās metodes, kuras var izmantot apskašu programmas izvēlē.

Atjaunošanas teorija ir saistīta ar vienkāršāko remonta moduli, kad pēc katra remonta sistēma atgriežas darba stāvoklī. Ar remontu ir jāsaprot process, kad pilnībā tiek atjaunotas sistēmas darbaspējas.

Šī loģika ļoti labi sader ar moduļu remonta metodi, kad bojātais mezgls pilnībā tiek aizvietots ar jaunu. Tādos gadījumos šī teorija iegūst reālajiem apstākļiem ļoti tuvus rezultātus.

Neskatoties uz to, ka šī teorija ir paredzēta vienkāršiem modeļiem, mēs to varam izmantot arī sarežģītu remonta sistēmu gadījumos, it īpaši tehniskās apkopes teorijā.

Periodiskā atjaunošana jeb metode pazīstama kā atjaunošana pēc nostrādes.

Sistēmas atjaunošana pēc atteices. Ja sistēma ir nostrādājusi bez atteices uzdoto intervālu τ , tad tiek veikta operatīvā nomaiņa. Atjaunošanu, kas tiek veikta pēc atteices, sauc par avārijas atjaunošanu. Avārijas un profilaktiskās apkopes ir pilnīgas (tiek nomainīts viss agregāts).

Ja lieto tikai periodiskās atjaunošanas stratēģiju, tad momenti, kad tiek veikta profilaktiskā darbība, nav zināmi. Tas ir tādēļ, ka nākamā apkope tiek veikta pēc laika τ , ko nosaka varbūtība $\bar{F}(\tau)$. Šis fakts apgrūtina metodes lietošanu tehniskajā ekspluatācijā.

Atjaunošana blokos veikto apkopju moments tiek noteikts jau iepriekš. Metode tiek lietota situācijās, kad remonta vai apkopes veikšanai ir nepieciešams apjomīgs sagatavošanās darbs un ilgstošs sistēmas darbības pārtraukums nav pieļaujams.

Atteikuma gadījumā sistēma tiek pakļauta avārijas atjaunošanai. Neatkarīgi no sistēmas vecuma laika momentos $\tau, 2\tau, \dots$ tiek veikta atjaunošana. Sistēmai var būt dažādi tipi. Piemēram, ja notiek atteikums, tad sistēma tiek atgriezta ekspluatācijā tikai nākošajā plānotajā apkopē u. c.

Pēc iepriekšminētajām metodēm tiek pieņemts, ka sistēmas atjaunošana notiek pilnībā gan avārijas, gan profilaktiskajā atjaunošanā. Tomēr reālajā dzīvē remonta veikšana ne vienmēr to nodrošina. *Minimāla avārijas atjaunošana ar periodisku pilnīgu nomaiņu* paredz, ka sistēma tiek atjaunota pilnībā tikai periodiskajās apkopēs un daļēji avārijas jeb neplānotajās apkopēs.

- *Atjaunošana pie dažādiem atteikumu veidiem* — nereti neplānotā vai daļējā atjaunošana nav lietojama praksē. Ja bojājums ir pārāk nopietns, tad sistēmai ir jāveic pilnīgā atjaunošana.

Tehnisko sistēmu drošuma palielināšanai, palielinot to elementu drošumu, piemīt gan tehniski, gan ekonomiski ierobežojumi. Tāpat apkopes programmas izmantošana ne visos gadījumos ļauj sasniegt nepieciešamos drošības rādītājus. Tātad bieži vien, lai sasniegtu nepieciešamo drošumu, ir jāizmanto struktūras ar palielinātu drošumu un apkopes programmas jeb *dublēta sistēmu atjaunošana*.

Kontrole ar atjaunošanu paredz, ka process nebeidzas ar bojājumu atklāšanu. Sistēma pilnībā atjauno savas darbības spējas pēc atjaunošanas. Šis process kontrole-atjaunošana turpinās bezgalīgi.

Tiek ņemtas vērā gan atjaunošanas izmaksas, gan atjaunošanas laiks.

Iepriekš aplūkotās metodes neņem vērā noguruma plaisas augšanas specifiskās īpašības, kas var parādīties gaisa kuģa konstrukcijā.

4. nodaļa. Inspekcijas programmas izvēles loģika un metodes

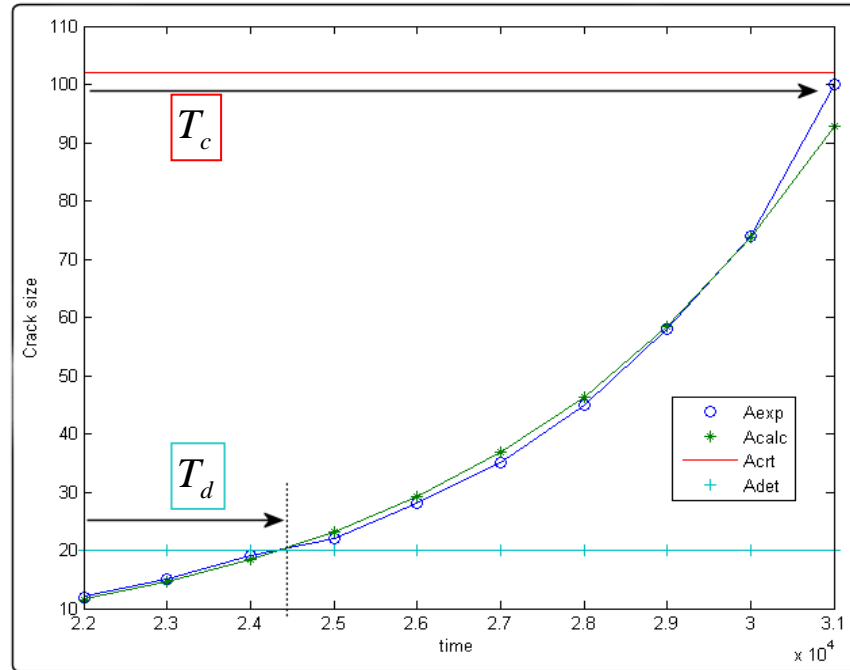
Nodaļā aprakstīta optimālas inspekciju programmas izvēles ideoloģija, ņemot vērā iespējamos riskus un ienākumus, kā arī sniegta matemātiskā modeļa pamatinformācija.

Plaisas parametri un ierobežojošie parametri

Šajā apakšnodaļā aplūkots plaisas eksponenciālais modelis, kurā tiek izmantoti pilna spektra noguruma plaisu veidošanās pārbaūžu rezultāti. Lai veiktu aprēķinus, ir nepieciešams plaisas attīstības modelis. Lidmašīnas *Tu-134* nogurumu plaisas pārbaūžu datu aproksimācijas funkciju var izveidot, sk. vienādojumu (4.1).

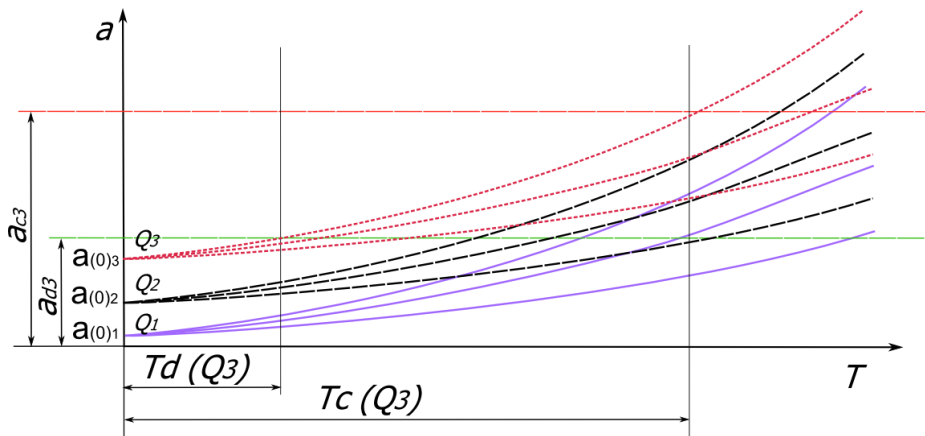
$$a(t) = a(0) \exp(Qt) \quad (4.1)$$

Dotajā matemātiskajā modelī plaisas augšanas ātrums (logaritmiskajā skalā) ir parametrs Q , ekvivalentais plaisas izmērs modelēšanas sākumā ir $a_0 = a(0)$. Šāds dotā vienādojuma lietojums dod iespēju noteikt T_c laika momentu, kad plaisa sasniedz savu kritisko izmēru a_c , un laiku T_d , kad plaisa sasniedz minimālo plaisas pamanāmo izmēru a_d . Tiek izveidots laika periods, kurā vēl ir iespējams plaisu pamanīt un vēl nav noticis atteikums $[T_d; T_c)$. Atteikums notiks, ja plaisa sasniegs savu kritisko izmēru un dotajā laikā netiks veikta neviena inspekcija. Tātad laika periodā $[T_d; T_c)$ nav veikta neviena inspekcija.



1. attēls. Noguruma plaisu apstrāde.

Noguruma plaisu paraugi ar dažādiem a_0 un dažādiem Q ir parādīti 2. attēlā.



2. attēls. Nogurumu plaisu piemērs ar trim dažādiem a_0 un trim dažādiem Q .

Izmantosim vienādojumu $X = \log Q$ un $Y = \log C_c$, kur $C_c = \log a_c - \log \alpha$. No noguruma pārbaužu rezultātiem var pieņemt, ka $\log T_c = \log C_c - \log Q$ ir sadalīts normāli. Tas tiek pamatots ar normālā sadalījuma īpašībām, ja abi parametri $\log C_c$ un $\log Q$ ir normāli sadalīti vai viens no komponentiem ir normāli sadalīts, bet otrs ir konstante, tad $\log T_c$ ir normāli sadalīts.

Pieņemsim, ka pirmajā gadījumā vektors $(X, Y) = (\log(Q), \log(C_c))$ pieder divdimensiju normālajam sadalījumam ar vektora parametru $\theta = (\mu_x, \mu_y, \sigma_x, \sigma_y, r)$. Gadījumos, kad a_c un a_d ir konstantes, tad C_d sadalījuma likums ir pilnībā noteikts ar C_c sadalījumu, jo $C_d = C_c - \delta$, kur $\delta = \log(a_c / a_d)$.

Atteikuma varbūtības noteikšana

Ņemot vērā gaisa kuģa noguruma kļūdu, varbūtības noteikšanu (FFP) var veikt, izmantojot Montekarlo metodi, FFP specifisko vienādojumu un Markova ķēžu teoriju.

Ja tiek lietota Montekarlo metode, tad nejaušo mainīgo X un Y modelēšana notiek, izmantojot formulu (4.2), kur η_1 un η_2 pieder standarta normālam sadalījuma likumam.

$$Y = \eta_1 \sigma_Y + \mu_Y, \quad X = \eta_1 \sigma_X r + \eta_2 \sigma_X \sqrt{1-r^2} + \mu_X, \quad (4.2)$$

kur σ – parametru kvadrātiska standartnovirze,
 μ – parametru vidējā vērtība,
 r – korelācijas koeficients.

Ja novērojumu skaits ir pietiekami liels, tad ir iespējams atrast nepamanīto plaisu skaitu starp visām plaisām dotajā kopā, kas savukārt rada iespēju noteikt atteikumu varbūtību specifiskai pārbaudes programmai (4.3), kur N_{missed} ir nepamanīto plaisu daudzums un N_{total} ir kopējais plaisu skaits, t.i., $N_{\text{total}} = N_{\text{missed}} + N_{\text{discovered}}$.

$$\hat{P}_f \xrightarrow{N_{\text{total}} \rightarrow \infty} P_f = \lim_{N_{\text{total}} \rightarrow \infty} \left(\frac{N_{\text{missed}}}{N_{\text{total}}} \right), \quad (4.3)$$

Dotā pārbaudes programma ir definēta ar pārbaūžu momentu secību, $t = (t_1, t_2, \dots, t_n)$, kur t_i ir laika periods no i -tās pārbaudes, $i = 1, 2, \dots, n$, n ir pārbaudes numurs $t_{n+1} = t_{SL}$. Lai noteiktu atteikuma varbūtību, visai inspekciju programmai ir jānosaka atteikumu varbūtība visos intervālos (4.4).

$$p_f = \sum_{i=1}^{n+1} q_i \quad (4.4)$$

$$q_i = P(t_{i-1} < T_d \leq T_c \leq t_i) = P\left(t_{i-1} < \frac{C_d}{Q} \leq \frac{C_c}{Q} \leq t_i\right), \quad (4.5)$$

kur

q_i – i -tās apskates atteikumu varbūtība

t_{i-1} – $i-1$ apskate

t_i – i -tā apskate

T_c – laiks līdz plaisa sasniegs kritisko izmēru

T_d – laiks līdz plaisa sasniegs pamanāmo izmēru

C_d – plaisas pamanāmais izmērs

C_k – plaisas kritiskais izmērs

Q – plaisas augšanas ātrums.

Vienkāršākajā gadījumā tiek pieņemts, ka C_c un C_d ir konstantes, $C_c \geq C_d$, tad (4.6), kur $X = \log Q$ ir nejaušs, normāli sadalīts, mainīgais lielums (4.7).

$$q_i = \begin{cases} 0, & \text{if } t_i \leq t_{i-1} \frac{C_c}{C_d}, \\ q_i^+, & \text{if } t_i > t_{i-1} \frac{C_c}{C_d}, \end{cases} \quad (4.6)$$

$$q_i^+ = P\left(\frac{C_c}{t_i} \leq Q < \frac{C_d}{t_{i-1}}\right) = \Phi\left(\frac{\ln(C_d/t_{i-1}) - \theta_0}{\theta_1}\right) - \Phi\left(\frac{\ln(C_c/t_i) - \theta_0}{\theta_1}\right). \quad (4.7)$$

Divu parametru modeļa gadījumā normāli ir sadalīts $X = \log Q$ un $Y = \log C_c$, tad jāņem vērā, ka (4.8), kur δ ir kāda konstante. Tad atteikumu varbūtību var aprēķināt, izmantojot vienādojumu (4.9).

$$C_c - C_d = \log(a_c) - \log(a_d) = \log(a_c / a_d) = \delta, \quad (4.8)$$

$$q_i^+ = P\left(\log C_c - \log t_i \leq \log Q < \log(C_c - \delta) - \log t_{i-1}\right) = \int_{\ln \delta}^{+\infty} (g_i^+(y)) d\Phi\left(\frac{y - \mu_Y}{\sigma_Y}\right), \quad (4.9)$$

kur

$\Phi(\cdot)$ – normālā sadalījuma funkcija.

$$g_i^+(y) = \max\left(0, \Phi\left(\frac{(\log(e^y - \delta) - \log t_{i-1}) - \mu_{X/Y}}{\sigma_{X/Y}}\right) - \Phi\left(\frac{(y - \log t_i) - \mu_{X/Y}}{\sigma_{X/Y}}\right)\right), \quad (4.10)$$

$$\mu_{X/Y} = \mu_X + r \frac{\sigma_X}{\sigma_Y} (y - \mu_Y), \quad \sigma_{X/Y} = \sigma_X \sqrt{1 - r^2}. \quad (4.11)$$

Pieņemsim, ka parametri σ_X, σ_Y un r ir atkarīgi no tehnoloģijas, kura ekspluatācijas laikā nemainās (jaunam gaisa kuģim). Šādus parametrus var noteikt, izmantojot informāciju par iepriekšējām izstrādēm. Pieņemsim, ka tie ir pastāvīgi un zināmi lielumi. Tad nezināmajam parametram θ (4.12) ir tikai divas komponentes.

$$\theta = (\mu_X, \mu_Y) \quad (4.12)$$

Gaisa kuģu (AC) inspekciju procesu var attēlot, izmantojot absorbējošās Markova ķēdes teoriju (MC) ar $(n + 4)$ stāvokļiem. Šie stāvokļi E_1, E_2, \dots, E_{n+1} atbilst AC darbības laika periodiem $[t_0, t_1), [t_1, t_2), \dots, [t_n, t_{SL})$. Stāvokļi E_{n+2}, E_{n+3} , un E_{n+4} ir absorbējošie stāvokļi: AC tiek noņemts no ekspluatācijas, kad noteiktais resurss (SL) tiek izsmelts, iestājas noguruma atteikums (FF) vai tiek atrasta plaisa (CD).

Uz dažādiem AC notikumiem atsilstošas pārejas varbūtību matricas P_{AC} plaisas pamanīšanas varbūtību apzīmējam ar $v_i, v_i = 1 - u_i - q_i$; atteikuma varbūtība servisa laika periodā $t \in (t_{i-1}, t_i]$ ir q_i (4.14) un veiksmīgas pārejas varbūtība nākošajā stāvoklī ir u_i (4.13). Šajā modelī tiek pieņemts, ka gaisa kuģi izņem no servisa, sākot no t_{SL} , pat ja tiek atrastas plaisas inspekcijas laika momentā t_{SL} . Inspekcijas intervāla $(n + 1)$ beigu stāvoklis (E_{n+1}) neparāda palikušo izturību, bet attēlo gaisa kuģa stāvokli (ar vai bez plaisām), jo $\ln(Q)$ pieder normālajam sadalījuma likumam $N(\theta_0, \theta_1^2)$ (4.15, 4.16).

$$u_i = P(T_d > t_i | T_d > t_{i-1}) = P(Q < C_d / t_i) / P(Q < C_d / t_{i-1}) = a_i / a_{i-1} \quad (4.13)$$

$$q_i = P(t_{i-1} < T_d < T_c < t_i | T_d > t_{i-1}) = \begin{cases} 0, & \text{if } t_{i-1} C_c / C_d > t_i, \\ b_i / a_{i-1}, & \text{if } t_{i-1} C_c / C_d \leq t_i, \end{cases} \quad (4.14)$$

$$i = 1, \dots, n + 1,$$

$$a_i = \Phi(\ln(C_d / t_i) - \theta_0) / \theta_1, \quad (4.15)$$

$$b_i = \Phi(\ln(C_c / t_i) - \theta_0) / \theta_1, \quad (4.16)$$

kur

u_i – varbūtība, ka process veiksmīgi nonāks nākamajā intervālā,

q_i – varbūtība, ka notiks atteikums,

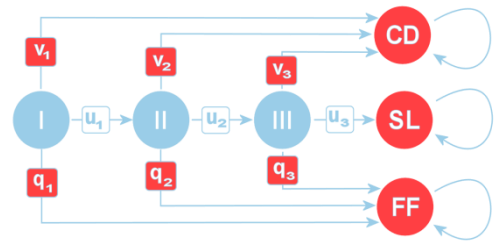
v_i – varbūtība, ka tiks atklāta plaisa,

$b_i, a_i - \Phi(\cdot)$ — standarta normāla sadalījuma funkcijas.

Pāreju varbūtības matricu P_{AC} var izveidot šādā veidā (skat. 3. att.). Pāreju diagrammu tikai divām inspekcijām var atrast 4. attēlā.

	E_1	E_2	E_3	...	E_{n-1}	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	0	q_1	v_1
E_2	0	0	u_2	...	0	0	0	0	q_2	v_2
E_3	0	0	0	...	0	0	0	0	q_3	v_3
...
E_{n-1}	0	0	0	...	0	u_{n-1}	0	0	q_{n-1}	v_{n-1}
E_n	0	0	0	...	0	0	u_n	0	q_n	v_n
E_{n+1}	0	0	0	...	0	0	0	u_{n+1}	q_{n+1}	v_{n+1}
E_{n+2} (SL)	0	0	0	...	0	0	0	1	0	0
E_{n+3} (FF)	0	0	0	...	0	0	0	0	1	0
E_{n+4} (CD)	0	0	0	...	0	0	0	0	0	1

3. attēls. Matrica P_{AC} .



4. attēls. Pārejas diagramma.

Matricu lietošana padara iespējamu noteikt absorbcijas varbūtību absorbcijas stāvokļos. Matricas struktūra labākai uzskatāmībai var tikt sadalīta kā redzams 5. attēlā,

	E_1	E_2	E_3	...	E_{n-1}	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	0	q_1	v_1
E_2	0	0	u_2	...	0	0	0	0	q_2	v_2
E_3	0	0	0	...	0	0	0	0	q_3	v_3
...
E_{n-1}	0	0	0	...	0	u_{n-1}	0	0	q_{n-1}	v_{n-1}
E_n	0	0	0	...	0	0	u_n	0	q_n	v_n
E_{n+1}	0	0	0	...	0	0	0	u_{n+1}	q_{n+1}	v_{n+1}
E_{n+2} (SL)	0	0	0	...	0	0	0	1	0	0
E_{n+3} (FF)	0	0	0	...	0	0	0	0	1	0
E_{n+4} (CD)	0	0	0	...	0	0	0	0	0	1

5. attēls. Varbūtību pārejas matricas apakšmatricas.

kur I ir identitātes matricas atbilstošiem absorbcijas stāvokļiem, 0 ir nulļu matrica. Tad absorbcijas varbūtība dažādos absorbcijas stāvokļos ir definēta vienādojumā (4.17).

$$B = (I - Q)^{-1} R \quad (4.17)$$

Pirmā B matricas rinda nosaka absorbcijas varbūtību stāvokļos SL, FF, CD; it īpaši intervāli $B(1, 2)$ nosaka atteikuma varbūtību jaunam gaisa kuģim, kas sāk savu darbību pirmajā intervālā.

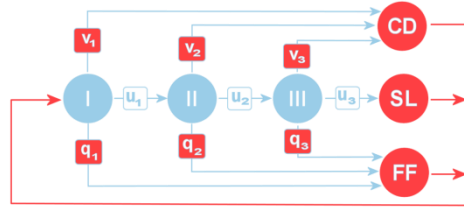
Atteikuma intensitātes noteikšana

Noguruma atteikuma intensitātes aprēķināšana (FFR) un aviolīniju (AL) ienākumu noteikšana.

Jāņem vērā, ka matricā P_{AC} ir trīs absorbējošas laika vienības pēdējās trīs rindās, un kolonnas novietotas pa diagonāli tāpēc, ka stāvokļi E_{n+2} , E_{n+3} un E_{n+4} ir absorbējošie stāvokļi: AC ir izņemts no servisa, kad SL ir sasniegts vai ir noticis noguruma atteikums (FF) vai notikusi noguruma plaisas atrašana (CD). Atbilstošā matricas darbības procesā AL, P_{AL} , stāvokļi E_{n+2} , E_{n+3} un E_{n+4} , neabsorbē, bet atgriežas MC stāvoklī E_1 (AL darbība atgriežas pirmajā intervālā). Citas rindas P_{AC} un P_{AL} ir tādas pašas. Pārejas varbūtību matricas P_{AL} paraugs un pāreju diagrammas paraugs divu inspekciju gadījumam ir parādīts 6. un 7. attēlā.

	E_1	E_2	E_3	...	E_{n-1}	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	0	q_1	v_1
E_2	0	0	u_2	...	0	0	0	0	q_2	v_2
E_3	0	0	0	...	0	0	0	0	q_3	v_3
...
E_{n-1}	0	0	0	...	0	u_{n-1}	0	0	q_{n-1}	v_{n-1}
E_n	0	0	0	...	0	0	u_n	0	q_n	v_n
E_{n+1}	0	0	0	...	0	0	0	u_{n+1}	q_{n+1}	v_{n+1}
E_{n+2} (SL)	1	0	0	...	0	0	0	0	0	0
E_{n+3} (FF)	1	0	0	...	0	0	0	0	0	0
E_{n+4} (CD)	1	0	0	...	0	0	0	0	0	0

6. attēls. Matrica P_{AL} .



7. attēls. Pārejas diagramma.

Lietojot pusmarkova procesa teoriju (SMPW), matricā parādīta pāreju varbūtība P_{AL} un ienākumi R (skat. 8. att.).

	E_1	E_2	E_3	...	E_{n-1}	E_n	E_{n+1}	E_{n+2} (SL)	E_{n+3} (FF)	E_{n+4} (CD)
E_1	0	a_1	0	...	0	0	0	0	b_1	c_1
E_2	0	0	a_2	...	0	0	0	0	b_2	c_2
E_3	0	0	0	...	0	0	0	0	b_3	c_3
...
E_{n-1}	0	0	0	...	0	a_{n-1}	0	0	b_{n-1}	c_{n-1}
E_n	0	0	0	...	0	0	a_n	0	b_n	c_n
E_{n+1}	0	0	0	...	0	0	0	a_{n+1}	b_{n+1}	c_{n+1}
E_{n+2} (SL)	d_{n+2}	0	0	...	0	0	0	0	0	0
E_{n+3} (FF)	d_{n+3}	0	0	...	0	0	0	0	0	0
E_{n+4} (CD)	d_{n+4}	0	0	...	0	0	0	0	0	0

8. attēls. Ienākumu matrica R .

Ir iespējams noteikt aviolīniju ienākumus, izmantojot vienādojumus (4.18), kur $\pi = (\pi_1, \dots, \pi_{n+4})$ ir stacionāro varbūtību vektors, kurš ir definēts vienādojuma (4.19) sistēmā.

$$g(n) = \sum_{i=1}^{n+4} \pi_i g_i(n) \quad (4.18)$$

$$\pi P = \pi, \quad \sum_{i=1}^{n+4} \pi_i = 1 \quad (4.19)$$

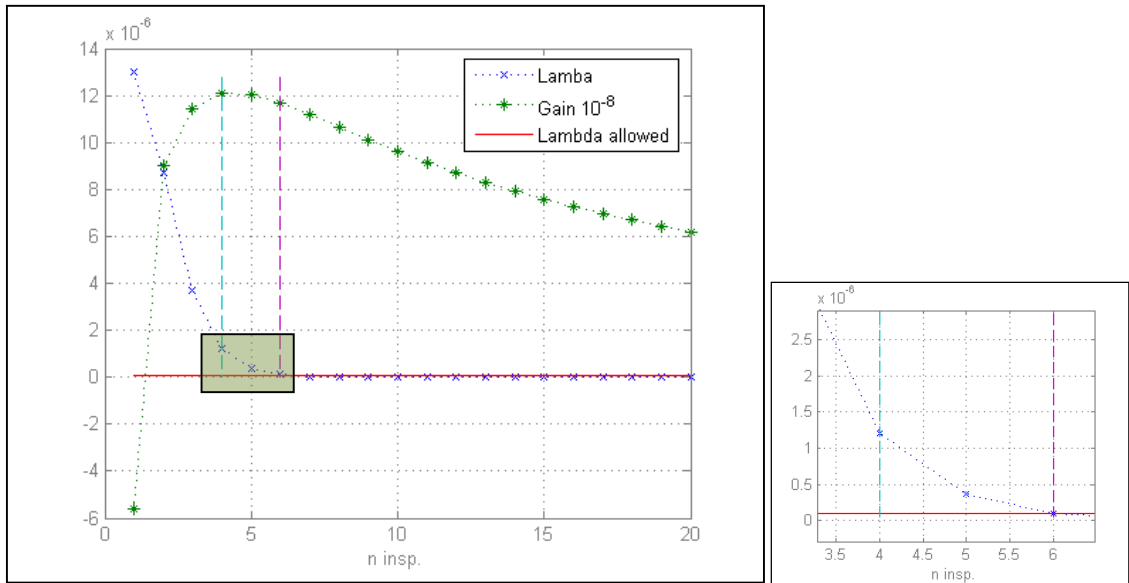
AL ienākumi ir definēti ar vienādojumu (4.20), kur a_i ir atalgojums, kas atbilst veiksmīgai pārejai no vienas darbības intervāla otrā, bet ienākumi b_i , c_i un d_i atbilst stāvokļu pārejām E_{n+3} (FF), E_{n+4} (CD) un E_1 .

$$g_i(n) = \begin{cases} a_i \cdot u_i + b_i \cdot q_i + c_i \cdot v_i, & i = 1, \dots, n+1, \\ d_i, & i = n+2, \dots, n+4, \end{cases} \quad (4.20)$$

Piebildīsim, ka, ja $a = b = c = 1$, $d = 0$ un laika pāreja uz stāvokli E_1 ir vienāda ar nulli, tad $\pi_{ij} = \pi_j g_j(n) / g(n)$ definē laiku, kurš ir izlietots SMP stāvoklī E_j , $j = 1, \dots, n+1$; $L_j = g(n) / \pi_j$ definē vidējo atgriešanās laiku stāvoklī E_j . It īpaši, ja L_{n+3} ir vidējais atgriešanās laiks starp FF, tātad $\lambda_F = 1 / L_{n+3}$ ir noguruma atteikuma intensitāte FFR.

Ir jāmin, ka FFR var izteikt arī savādāk. Šī vērtība ir vienāda ar gaisa kuģa kļūdas varbūtības P_F dalījumu ar vidējo jauna gaisa kuģa dzīves laiku $L_1 = g(n) / \pi_1$.

Ir divas ļoti līdzīgas pieejas, ko var lietot, lai nodrošinātu drošuma prasības: prasība (A) atbilst visiem ierobežojumiem FFR no AL, prasība (B) atbilst ierobežojumiem FFR no AC. Vienas versijas atrisinājums dod nepārprotamu risinājumu otram. Vispirms ir jāņem vērā prasība (A). Ja θ ir zināms, tad nosaka ienākumus n , $g(n, \theta)$ un izvēlas inspekciju skaitu n_g , kas atbilst maksimālajiem ienākumiem: $n_g(\theta) = \arg \max_n g(n, \theta)$. Tad nosaka FFR kā funkciju no n , $\lambda_F(n, \theta)$ un n_λ , tādā veidā, ka ikvienai $n \geq n_\lambda$ funkcijai $\lambda_F(n, \theta)$ būs vienāda vai mazāka vērtība ar λ_{FD} (FFR) ierobežojumiem: $n_\lambda(\lambda_{FD}, \theta) = \min\{n: \lambda_F(n, \theta) \leq \lambda_{FD}, \text{ for all } n \geq n_\lambda(\lambda_{FD}, \theta)\}$. Visbeidzot izvēlas inspekciju programmu $n = n_{g\lambda}(\lambda_{FD}, \theta) = \max(n_g, n_\lambda)$, skat. 9. attēlu.



A	B
9. attēls. Izvēle $n = n_{g\lambda}(\lambda_{FD}, \theta) = \max(n_g, n_\lambda)$ (a), precīzāk (b).	

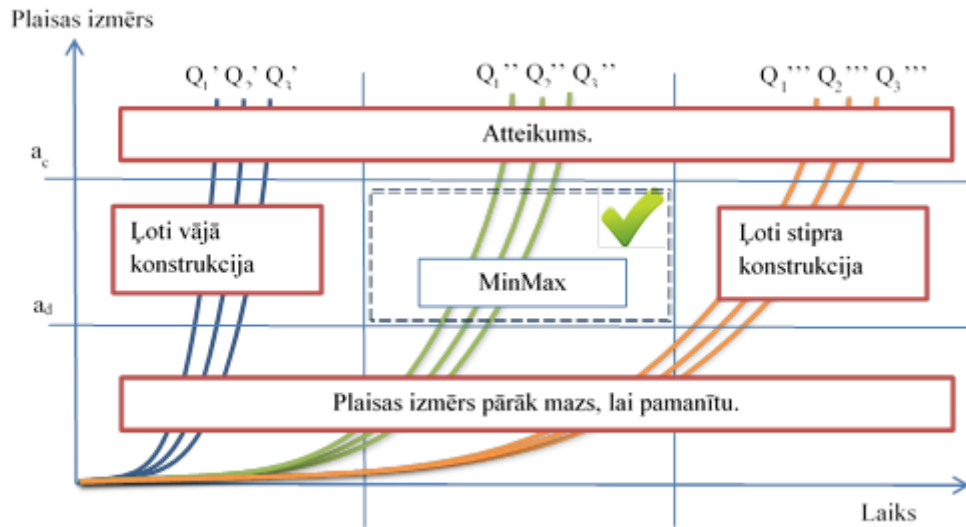
Apskašu intervāla skaita izvēle, ja plaisas parametri nav zināmi

Pieņemsim, ka nav zināms reālais θ un var tikai novērtēt parametru $\hat{\theta}$, lietojot pieņemšanas eksperimenta rezultātus. Vispirms ir jādefinē parametra θ_0 laukums tādā veidā, ka jābūt veiktai AC atkārtotai pārbūvei, ja $\hat{\theta} \notin \Theta_0$. Ja $n_{g\lambda}(\lambda_{FD}, \theta)$ vietā lieto $n_{g\lambda}(\lambda_{FD}, \hat{\theta})$, tad reālā atteikuma intensitāte FFR būs funkcija no nejauša mainīgā, $\lambda_F(n_{g\lambda}(\lambda_{FD}, \hat{\theta}), \theta)$. Definēsim (4.21) un (4.22).

$$\lambda_F(\hat{\theta}, \lambda_{FD}, \Theta_0) = \lambda_F(n_{g\lambda}(\lambda_{FD}, \hat{\theta}), \theta), \text{ ja } \hat{\theta} \in \Theta_0 \quad (4.21)$$

$$\lambda_F(\hat{\theta}, \lambda_{FD}, \Theta_0) = 0, \text{ ja } \hat{\theta} \notin \Theta_0. \quad (4.22)$$

Sagaidāmā FFR vērtība $w(\theta, \lambda_{FD}, \Theta_0) = E\{\lambda_F(\hat{\theta}, \lambda_{FD}, \Theta_0)\}$ kā funkcija no θ ir maksimums, tāpēc ka “sliktajam $\hat{\theta} \notin \Theta_0$ ” ir nepieciešams veikt GK pārstrādi, bet gadījumā, ja “ļoti labs $\hat{\theta}$ ”, tad nav nepieciešama pārbaude (skat. 10 att.).



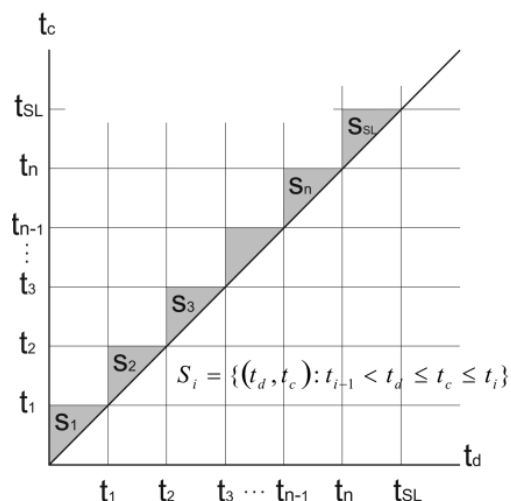
10. attēls. Noguruma atteikuma varbūtība kā funkcija no vidējā noguruma dzīves un nogurumu plaisu grupas: nepieciešama pārprojektēšana, drošums tiek nodrošināts ar inspekcijas programmu, drošums tiek nodrošināts bez apskatēm.

Pieļaujamā atteikuma intensitāte λ^* FFR ir noteikta ar speciālām aviācijas regulām.

Apskatīsim $\lambda_{FD}^*(\Theta_0)$ risinājumu vienādojumam $w(\theta, \lambda_{FD}, \Theta_0) = \lambda^*$, ja atrisinājums šim vienādojumam eksistē specifiskam Θ_0 . Ja pēc pieņemšanas pārbaudes redzams, ka $\hat{\theta} \in \Theta_0$, tad nepieciešamo inspekciju skaits ir $n = n_{g\lambda}(\lambda_{FD}^*, \hat{\theta})$; pretējā gadījumā ir jāveic pārprojektēšana.

Apskatīsim prasību (B). Šajā gadījumā vektoru \vec{t} definē p -set funkcija, kas dotajā gadījumā ir definēta sekojoši. Ļausim Z un X būt nejaušiem nejaušu lielumu vektoriem, un pieņemsim, ka kopa $\{P_\theta, \theta \in \Theta\}$ ir zināma, kurā varbūtības sadalījums tiek uzskatīts par piederošu vektoram $W = (Z, X)$. Zināmais parametrs θ , kas nosaka sadalījumu, atrodas kopas Θ parametru laukumā. Vienādojums $S_Z(x) = \bigcup_{i=1}^r S_{Z,i}(x)$ nosaka kādu kopu no sašķeltās kopas z vērtībām kā funkciju no x . Ja (4.23), tad statistiskā lēmuma funkcija $S_Z(x)$ ir uz vektoru x balstīta p -set funkcija nejaušam lielumam Z .

$$\sup_{\theta} \sum_{i=1}^r P(Z \in S_{Z,i}(X)) = p \quad (4.23)$$



11.attēls. Piemērs p-kopas funkcijai $S_{Z,i}, i = 1, \dots, n+1$.

Šajā gadījumā Z ir vektors (T_d, T_c) , kas ir saistīts ar gaisa kuģa darbību, X ir saistīts ar parametru θ , t.i., $x = \hat{\theta}$. Šo pieņēmumu var iegūt, lietojot GK konstrukcijas noguruma laboratorijas eksperimenta rezultātus vienāda veida gaisa kuģiem (t.i., noguruma plaisas novērojums: pāri $\{(laiks, \text{noguruma plaisas izmērs}) i, i = 1, \dots, k\} = \{(t_i, a_i), i = 1, \dots, k\}$, kur k ir noguruma plaisu novērojumu skaits. Katra kopa $S_{Z,i}$ ir AC punktu kopa, $\{(t_d, t_c)\}$, kas noteikta šādā veidā: $S_{Z,i} = \{(t_d, t_c): t_{i-1} < t_d, t_c \leq t_i\}$, $i = 1, \dots, n+1$, $t_{n+1} = t_{SL}$. Inspekciju laika punktu vektors \vec{t} ir funkcija no novērojumiem un pieņemtajiem parametriem θ , t.i., funkcija no $\hat{\theta}$, skat. 11. attēlu.

Pieņemsim, ka $E(T_A)$ ir vidējais novērojuma laiks (sasaucoties ar matricu P_{AC}), AC sāk servisu pirmajā intervālā un atteikuma varbūtība p_f saistīta ar funkciju $\vec{t}(x)$.

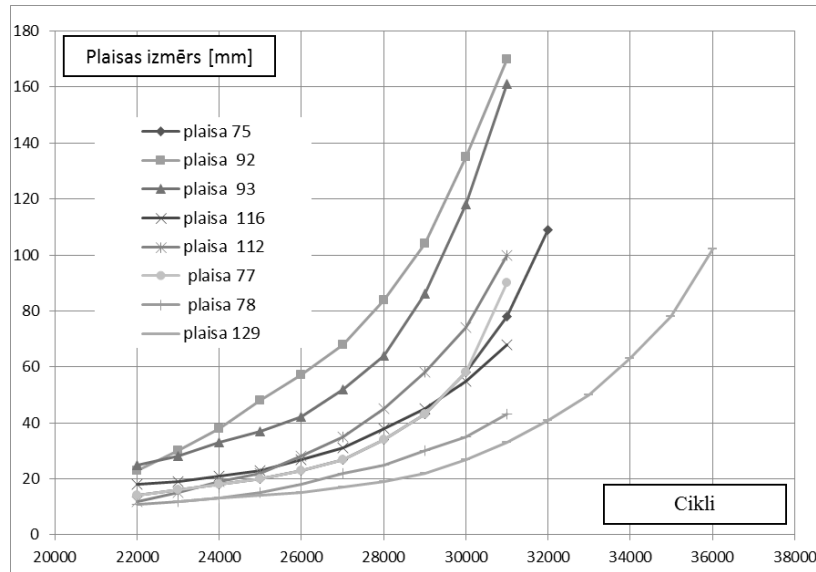
$$\lambda = p_f / E(T_A) \quad (4.25)$$

Tad FFR un FFP piemīt nepārprotama saite (4.25).

5. nodaļa. Aprēķina piemērs

Nodaļā ir aprakstīts aprēķina piemērs ar viena un divu dimensiju nezināmā parametra gadījumiem.

Desmit pilna diapazona noguruma plaisu augšanas eksperimentu rezultāti GK ir doti 12. attēlā, noguruma plaisas parametru novērtējums apkopots 1. tabulā.



12. attēls. Desmit noguruma plaisu novērošanas rezultāti, veicot kāda gaisa kuģa pilna diapazona noguruma plaisas augšanas eksperimentu.

1. tabula

GK noguruma plaisu parametri

<i>N</i>	<i>Crack #</i>	<i>Ln (a0)</i>	<i>Q</i>	<i>X=Ln(Q)</i>	<i>Y=lnCc</i>
1	75	-1.2513	1.86E-04	-8.58976	1.905519
2	92	-1.8768	1.95E-04	-8.54251	1.994482
3	93	-1.2445	1.61E-04	-8.73411	1.904507
4	116	-1.697	2.20E-04	-8.42188	1.96971
5	112	-1.5102	2.07E-04	-8.48279	1.943306
7	77	-2.5329	2.28E-04	-8.38616	2.080003
8	78	-0.6479	1.54E-04	-8.77856	1.81148
1	129	-1.4226	1.57E-04	-8.75926	1.93068
Average		-1.5229	0.000189	-8.58688	1.942461
StdDev		0.548084	2.9E-05	0.15512	0.077889
CORREL r				0.796	

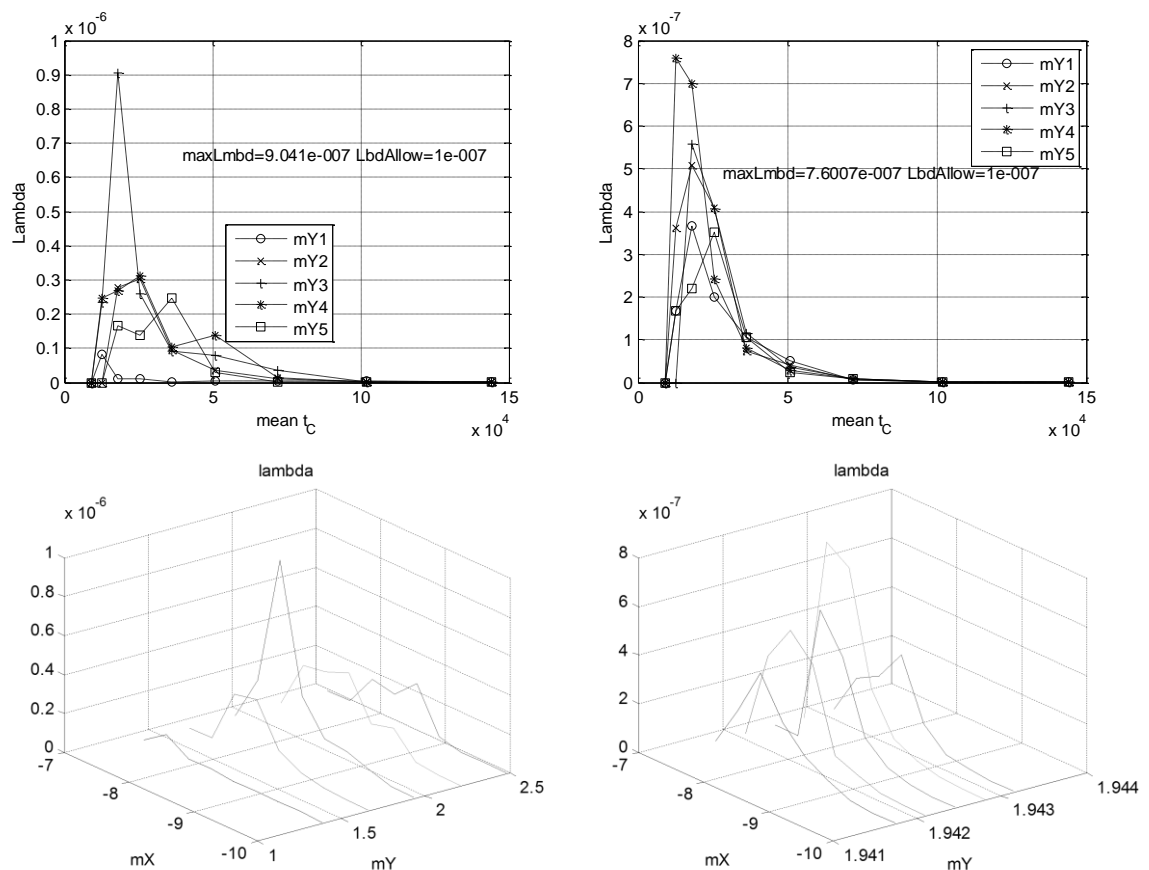
Pieņemsim, ka mums ir šādi parametra novērtējumi $\theta = (\mu_x, \mu_y, \sigma_x, \sigma_y, r)$ $\hat{\theta} = (-8,587; 1,942; 0,346; 0,0779; 0,796)$ (lai iegūtu vieglāk saprotamu demonstrāciju $\sigma = 0.155128668$, tiek aizvietots $\sigma = 0.346$)

Pieņemam, ka visu inspekciju laikā $a_c = 237,8$ mm un $a_d = 20$ mm. Lietosim šādus avioliņijas AL ekonomiskos koeficientus, visiem $i = 1, \dots, n+1$ $a_i = a(n) = a_0(n) + d_{insp} t_{SL}$, kur $a_0(n) = a_{01} t_{SL} / (n + 1)$ ir ienākumi, pārejot no viena intervāla uz otru.

Lielums a_{01} nosaka ienākumus vienā laika vienībā (viena stunda vai viens lidojums); $d_{insp} t_{SL}$ ir inspekcijas izmaksas (negatīvs lielums), kas ir proporcionāls t_{SL} ; $b_i = b_{01} t_{SL}$ un ir saistīts ar

FF (negatīvs lielums), $c_i = c_{01}a_0(n)$ ir pārejas ienākumi no jebkura stāvokļa E_1, \dots, E_{n+1} uz stāvokli E_{n+4} (pieņemam, ka tas ir proporcionāls a_0 , tādēļ ka tā ir daļa no a_0); $d_i = d_{01}t_{SL}$ ir negatīvs ienākums, absolūts lielums, kas raksturo jauna GK izmaksas pēc SL, FF vai CD notikumiem jeb pie pārejas uz E_1 . Skaitliskajā piemērā tiek lietoti šādi lielumi: $b_{01} = -0,3$; $d_{insp} = -0,05$; $a_{01} = 1$; $c_{01} = 0,1$; $d_{01} = -0,3$.

Aprēķini $w(\theta, \lambda_{FD}, \Theta_0) = E\{\lambda_F(\hat{\theta}, \lambda_{FD}, \Theta_0)\}$ tiek veikti datu diapazonam ($7.2029 \leq \mu_X \leq 9.9709$), ($1.3972 \leq \mu_Y \leq 2.4877$) pie $t_{SL} = 40000$. Kopa Θ_0 ietekmē lēmumu veikt pārkonstruēšanu, ja novērtējums neatbilst drošuma prasībām. Aprēķini tiek veikti dažādiem λ_{FD} , pieņemot, ka vektors (σ_X, σ_Y, r) ir zināms un tas sakrīt ar eksperimenta vidējām vērtībām (0,155128668, 0,0778895 un 0,796437). Tiek pieņemts, ka dotais vektors ir nemainīgs pie dažādiem (μ_X, μ_Y) vektoriem.

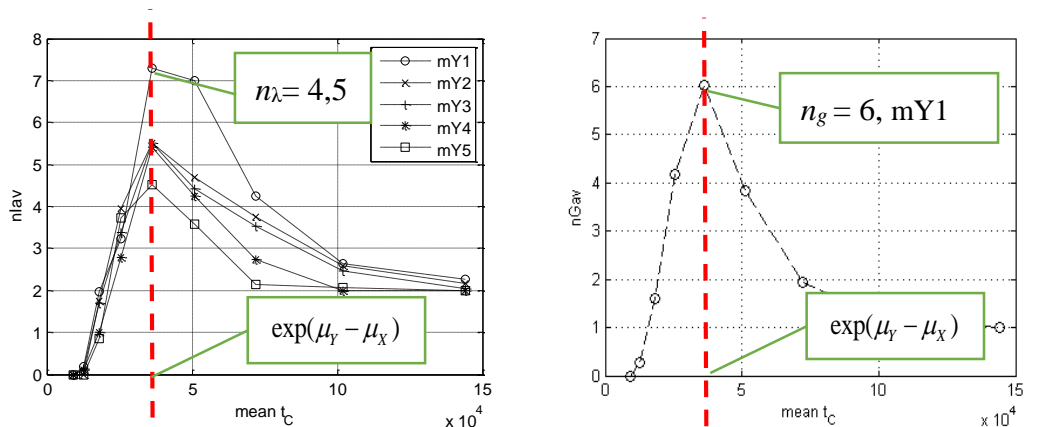


13. attēls. Vērtības $w(\theta, \lambda_{FD}, \Theta_0)$ kā funkcija no $E(T_c)$ dažādiem μ_Y ar $(\sigma_X, \sigma_Y, r) = (0,155128668; 0,0778895; 0,796437)$ (kreisajā pusē) un $0.760 \cdot 10^{-6}$ ar $(\sigma_X, \sigma_Y, r) = (0.346, 0.0001, 0)$ (labajā pusē).

Attēlā 13. mēs redzam $w(\theta, \lambda_{FD}, \Theta_0)$ kā funkciju no ekvivalentā T_C , kas tiek noteikts kā $\exp(\mu_Y - \mu_X)$ pieciem μ_Y , ($1.2415 \leq \mu_Y \leq 2.6435$) lielumiem, $w(\theta, \lambda_{FD}, \Theta_0)$ maksimālā vērtība ir vienāda ar $0,9041 \cdot 10^{-6}$ pie $(\sigma_X, \sigma_Y, r) = (0,155128668; 0,0778895; 0,796437)$ un $0,760 \cdot 10^{-6}$ pie $(\sigma_X, \sigma_Y, r) = (0,346; 0,0001; 0)$ (skat. 1. tabulu).

2. tabula

Rezultāti		
Pieļaujamā atteikuma intensitāte	$\sigma_Y = 0,0778895$	$\sigma_X \sigma_Y = 0,0001$
	$r_{XY} = 0,796$	$r_{XY} = 0$
$0,1 \cdot 10^{-6}$	$0,9041 \cdot 10^{-6}$	$0,760 \cdot 10^{-6}$



14. attēls. Inspekciju skaita vidējā vērtība kā funkcija no ekvivalentā vidējā $T_C = \exp(\mu_Y - \mu_X)$ lieluma.

Dotajā gadījumā izkliede Y (un EIFS, a_0) nešķiet pārāk nozīmīga. Bet šis secinājums ir atkarīgs arī no citiem parametriem. Pieņemsim, ka $(\sigma_X, \sigma_Y, r) = (0,155128668; 0,0778895; 0,796437)$ un lielums $0,9041 \cdot 10^{-6}$ ir pieļaujamais AL FFR. Pieņemam, ka reālā eksperimentā mēs ieguvām $\hat{\mu}_X = -8,5885$; $\hat{\mu}_Y = 1,942460769$, tad ekvivalentā vidējā vērtība $T_C = \exp(\mu_Y - \mu_X) = 37,4574e + 003$. Ja mēs ņemam vērā šos novērtējumus kā reālus parametrus, tad vidējais inspekciju skaits būs vienāds ar 4 (skat. 14. att., pa kreisi), bet ekonomiski rekomendējamais 3 (skat. 14. att., pa labi).

Secinājumi

1. Ir izstrādāta noguruma plaisām pakļauta gaisa kuģa konstrukcijas inspekcijas skaita izvēles programmas metodika. Metodika ņem vērā šādus aspektus:

- nepieciešamo lidmašīnas drošumu un atteikuma intensitātes ierobežojumus;
- atbilstību prasībām, balstoties uz konstrukcijas noguruma pieņemšanas pārbaūžu rezultātiem, pieļaujot konstrukcijas rekonstrukciju neatbilstības gadījumā;
- inspekciju tehnoloģijas efektivitāti;
- inspekciju, plaisu atklāšanas, noguruma atteikuma un jauna gaisa kuģa izmaksas.

2. Specifiskās statistiskās lēmuma funkcijas īpašības ir šādas:

- Tiek lietots Specifisks plaisas augšanas procesa modelis, kas balstās uz parametriem, kas iegūti no reāla pilna diapazona noguruma plaisu augšanas eksperimenta rezultātiem.
- Esošajās apskates intervālu izvēles aprēķina metodikās jau ir zināma plaisas parametru sadalījuma funkcija jeb tiek risināts varbūtības teorijas uzdevums.
- Promocijas darbā dotā uzdevuma risinājumam ir piedāvāta statistiskā lēmuma funkcija, kas nodrošina nepieciešamo drošumu pie jebkādiem noguruma plaisas parametriem, jo tiek lietota *MinMax* metode, kas, balstoties uz gaisa kuģa pieņemšanas pārbaūžu rezultātiem, pieļauj konstrukcijas rekonstruēšanu neatbilstības gadījumā.
- Lai noteiktu gaisa kuģa drošumu, avioliņijas atteikuma intensitāti un avioliņijas ienākumus, tiek izmantota Markova ķēžu teorija un pusmarkova process ar ienākumiem.
- Tiek izveidota programmu pakete *MATLAB* vidē, ko var izmantot gan pētījumiem, gan izglītošanās nolūkiem.

MinMax metodika balstās uz *minmax* principa lietošanu, kas ļauj apiet saskaņošanas varbūtību lietošanu. Saskaņošanas varbūtību izvēle, balstoties uz drošuma vienādojumu, ir aprūtināta un problemātiska.