

Anvar Zabirov

**LIDAPARĀTU TEHNISKĀS EKSPLUATĀCIJAS
PARAMETRU OPTIMIZĀCIJA LIDOJUMU
REGULARITĀTES PAAUGSTINĀŠANAI**

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības un mašīnzinību fakultāte
Mašīnbūves, aerokosmisko tehnoloģiju un transporta institūts

Anvar Zabirot

Doktora studiju programmas “Transports” doktorants

**LIDAPARĀTU TEHNISKĀS EKSPLUATĀCIJAS
PARAMETRU OPTIMIZĀCIJA LIDOJUMU
REGULARITĀTES PAAUGSTINĀŠANAI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. habil. sc. ing.
VLADIMIRS ŠESTAKOVŠ

RTU Izdevniecība
Rīga 2026

Zabirov, A. Lidaparātu tehniskās ekspluatācijas parametru optimizācija lidojumu regularitātes paaugstināšanai. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. – 36 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “P-06” 2026. gada 8. maija lēmumu, protokols Nr. 04030-9.6/9.

Vāka attēla autors Anvar Zabirov.

<https://doi.org/10.7250/9789934373206>
ISBN 978-9934-37-320-6 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2026. gada 25. septembrī plkst. 10 Rīgas Tehniskajā universitātē, P. Valdena ielā 1, 309. kabinetā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Vitālijs Pavelko,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Zbigniew Koruba,
Kelces Tehnoloģiju universitāte, Polija

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Igors Kabaškins,
Transporta un sakaru institūts, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Anvar Zabirov: _____ (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā. Tas ietver anotāciju, ievadu, četras nodaļas, kopsavilkumu, secinājumus, izmantotās literatūras sarakstu ar 75 literatūras avotiem, pielikumus, 42 attēlus, septiņas tabulas, kopā 146 lappuses, ieskaitot pielikumus.

SATURS

ANOTĀCIJA	5
IEVADS	5
1. Faktoru, kas ietekmē lidojumu regularitāti un operatīvās vadības efektivitāti gaisa kuģu tehniskajā apkopē, analīze	12
1.1. Lidojumu regularitātes stāvokļa analīze civilajā aviācijā	13
1.2. Operatīvā plānošana un vadība aviokompāniju darbības sistēmās	14
1.3. Izlidošanas aizkavēšanās gaisa kuģa sagatavošanas ciklā.....	14
1.4. Maršrutu līmeņa operatīvā vadība un lidmašīnu tehniskie stāvokļi	15
1.5. Lidmašīnas stāvokļi un pārejas tās ekspluatācijas procesa posmos operatīvās vadības cikla līmenī.....	16
1.6. Lidmašīnas tehniskā apkope uz zemes pirmslidojuma sagatavošanas laikā	16
1.7. Lidmašīnas visaptverošās sagatavošanas procesa plūsmas shēma izlidošanai tranzīta lidostā	17
1.8. Lidmašīnas stāvokļi un pārejas	19
1.9. Varbūtiskie rādītāji, kas izmantoti atteices stāvokļu kvalitatīvajā un kvantitatīvajā analīzē	20
2. Lidmašīnas tehniskās apkopes procesa modeļa izstrāde operatīvās vadības cikla līmenī	22
2.1. Grafiskais modelis	22
2.2. Lidmašīnas stāvokļa izmaiņu matemātiskais modelis viena lidojuma ietvaros	24
2.3. Lidmašīnas stāvokļa izmaiņu matemātiskais modelis maršruta ietvaros	25
2.4. Lidmašīnas stāvokļa izmaiņu matemātiskais modelis maršrutu secībā	25
2.5. Lidmašīnas atjaunošanas procesu un izlidošanas aizkavēšanās modeļi.....	26
2.6. Lietojumprogrammatūras rīka realizācija lidojumu regularitātes novērtēšanas modelim.....	26
3. Ieteikumu izstrāde un pamatojums lidmašīnu tehniskās ekspluatācijas procesu operatīvās vadības pilnveidošanai aviokompānijas apstākļos	28
3.1. Lidmašīnu stāvokļu dinamikas analīze lidostās aviokompānijas tīklā.....	28
3.2. Operatīvo faktoru nozīmīguma novērtējums attiecībā uz lidojumu regularitātes laika rādītājiem.....	29
3.3. Ieteikumi lidmašīnu tehniskās apkopes procesu operatīvās vadības pilnveidošanai RAF-AVIA aviokompānijas tīklā	30
4. Operatīvo lēmumu optimizācija AOG kritisku tehnisko defektu gadījumā	32
4.1. Izstrādāto modeļu praktiskā lietošana un mērķfunkcijas aprēķins RAF-AVIA aviokompānijas maršrutam	32
4.2. Vadības pasākumu analīze	33
4.3. Galasecinājumi, balstoties gadījuma analīzē.....	34
PĒTĪJUMA REZULTĀTI.....	35
SECINĀJUMI	36

ANOTĀCIJA

Promocijas darba pētījums vērsts uz gaisa kuģu tehniskās apkopes procesu operatīvās vadības pilnveidošanu, lai paaugstinātu lidojumu regularitāti. Tēmas aktualitāti nosaka pieaugošās prasības attiecībā uz uzticamību un punktualitāti gaisa pārvadājumos, īpaši ierobežotu resursu un intensīvas flotes ekspluatācijas apstākļos. Pētījuma objekts ir aviokompānijas RAF-AVIA darbība, kas nodrošina reģionālo lidojumu tīklu ar dažādu tipu lidostām un tehniskās apkopes organizācijas formām.

Pirmajā nodaļā sniegta ar gaisa kuģu tehnisko stāvokli saistīto lidojumu aizkavēšanās cēloņu analīze, kā arī apskatītas operatīvās tehniskās apkopes vadības īpatnības, lidostu klasifikācija un galvenie faktori, kas ietekmē lidojumu regularitāti. Papildus izmantoti publiski pieejamie dati lidojumu punktualitātes statistikas analīzei.

Otrajā nodaļā aprakstīts izstrādātais matemātiskais modelis aizkavēšanās veidošanās procesam, balstoties gaisa kuģu tehnisko stāvokļu dinamikā un atjaunošanas procesu varbūtiskajos raksturlielumos. Modelī ņemtas vērā stāvokļu pāreju varbūtības, lidojumu tīkla struktūra un konkrēti lidostu parametri. Izstrādātais lietojumprogrammatūras rīks, kas realizē piedāvātos matemātiskos modeļus, nodrošina galveno lidojumu regularitātes rādītāju aprēķinu un ļauj novērtēt dažādu ekspluatācijas parametru ietekmi.

Trešajā nodaļā veikta padziļināta gaisa kuģu stāvokļu dinamikas analīze gan bāzes, gan ārpusbāzes lidostās, piedāvāta metode operatīvo faktoru ietekmes nozīmīguma novērtēšanai uz izlidošanas aizkavēšanās ilgumu, kā arī sniegtas praktiskas rekomendācijas RAF-AVIA tehniskās apkopes procesu optimizācijai un sagaidāmā lidojumu aizkavēšanās ilguma samazināšanai.

Ceturtajā nodaļā aprakstīts izstrādātais optimizācijas ietvars, kas balstīts mērķfunkcijā un piemērots AOG kritisko defektu scenārijiem, sasaistot varbūtisko stāvokļu dinamiku ar atjaunošanas un loģistikas parametriem, lai novērtētu un izvēlētos aizkavēšanās samazināšanas stratēģijas maršrutu līmeni.

Darba mērķis ir paaugstināt gaisa kuģu tehniskās apkopes vadības efektivitāti, izmantojot modelēšanu, kvantitatīvo analīzi un datus balstītu lēmumu pieņemšanu, kas pielāgota konkrētas aviokompānijas operacionālajam kontekstam. Izstrādātais lietojumprogrammatūras rīks darbojas, izmantojot tikai aviokompānijas sniegtos ievades parametrus un uzkrāto operatīvo statistiku, nodrošinot to, ka visi aprēķini balstīti reālos empīriskos datos.

IEVADS

Mūsdienu aviokompānijas darbojas stingru drošības prasību apstākļos un pieaugoša spiediena ietekmē nodrošina augstu lidojumu grafika izpildes regularitāti. Reģionālo aviokompāniju tīklos tehniskie traucējumi bieži izplatās pa vairākiem maršrutiem, radot kumulatīvas aizkavēšanās un operacionālu nestabilitāti. Neskatoties uz operatīvās gaisa kuģu tehniskās apkopes vadības nozīmīgumu, kvantitatīvie rīki atjaunošanas procesu novērtēšanai un tehniskās aizkavēšanās veidošanās prognozēšanai joprojām ir ierobežoti.

Promocijas darbā izstrādāts varbūtisks gaisa kuģu tehnisko stāvokļu attīstības un atjaunošanas procesu modelis aviokompānijas maršrutu tīkla ietvaros. Modelī integrēta defektu rašanās varbūtība, *MEL (Minimum Equipment List)* balstīti ekspluatācijas ierobežojumi, lidostu tehniskās iespējas un atjaunošanas laika parametri. Piedāvātā pieeja nodrošina tehniskās aizkavēšanās veidošanās kvantitatīvu novērtējumu un atbalsta datus balstītu operatīvu lēmumu pieņemšanu. Modelis ir realizēts lietojumprogrammas rīkā *FlightSync* un validēts, izmantojot reālos Latvijas aviokompānijas RAF-AVIA operatīvos datus.

Darba aktualitāte

Darba aktualitāti nosaka nepieciešamība paaugstināt lidojumu regularitāti, izmantojot gaisa kuģu tehniskās apkopes operatīvās darbības kvantitatīvu optimizāciju aviokompāniju tīklos:

- lidojumu regularitāte ir tieši atkarīga no tā, cik efektīvi tiek organizēta gaisa kuģu tehniskā apkope un tehniskā ekspluatācija;
- aviokompānijas tīklā tehniskās aizkavēšanās izraisa ne tikai atteices un tehniski bojājumi, bet arī organizatoriskie faktori, piemēram, atjaunošanas laiks, resursu loģistika, personāla pieejamība un rezerves daļu nodrošinājums;
- aviokompānijas atšķiras pēc flotes struktūras, pieejamajiem resursiem un tehniskās apkopes organizācijas, tādēļ standartizēti risinājumi nespēj nodrošināt stabilu darbību;
- lidojumu regularitātes paaugstināšanai nepieciešama sistemātiska pieeja, kas balstīta matemātiskajā modelēšanā un gaisa kuģu tehniskās ekspluatācijas parametru optimizācijā, ņemot vērā resursu pieejamību.

Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir paaugstināt lidojumu regularitāti, optimizējot gaisa kuģu tehniskās apkopes operatīvos parametrus, balstoties matemātiskajos modeļos, kas raksturo atjaunošanas procesus aviokompānijas maršrutu tīklā.

Lai sasniegtu darba mērķi, noteikti šādi uzdevumi:

- 1) analizēt lidojumu regularitātes problēmas pašreizējo stāvokli civilajā aviācijā un tās ietekmi uz aviokompānijas maršrutu tīkla darbību;
- 2) analizēt gaisa kuģu atteices un tehniskos bojājumus ekspluatācijas laikā, novērtēt atjaunošanas iespējas aviokompānijas tīklā un noteikt operatīvos faktorus, kas ietekmē tehniskās aizkavēšanās varbūtību;
- 3) izstrādāt matemātiskos modeļus gaisa kuģu stāvokļa novērtēšanai un atjaunošanas procesiem atbilstoši *MEL* prasībām aviokompānijas tīkla lidostās, lai samazinātu gan izlidošanas aizkavēšanās varbūtību, gan tās ilgumu;
- 4) izstrādāt lietojumprogrammatūras rīku piedāvāto matemātisko modeļu ieviešanai operatīvās tehniskās apkopes vadībā;
- 5) pārbaudīt un validēt izstrādāto lietojumprogrammatūras rīku, izmantojot RAF-AVIA aviokompānijas operatīvos un statistiskos datus.

Izpētes metodes

Darbā izmantotas šādas metodes:

- 1) varbūtību teorijas metodes matemātisko modeļu izstrādei;
- 2) matricu analīzes un modelēšanas metode;
- 3) statistiskā metode;
- 4) gaisa kuģu tehniskā stāvokļa identifikācijas metode.

Zinātniskā novitāte

Promocijas darba zinātniskā novitāte izpaužas šādos ieguldījumos:

- 1) izstrādāti grafiskie modeļi gaisa kuģu stāvokļiem un stāvokļu pārejām aviokompānijas tīklā, ietverot gan bāzes, gan ārpusbāzes lidostas gaisa kuģu tehniskās ekspluatācijas ietvaros;
- 2) piedāvāti matemātiskie modeļi gaisa kuģu stāvokļa novērtēšanai atbilstoši *MEL* prasībām aviokompānijas tīkla lidostās lidojuma laikā radušos atteižu un turpmākās atjaunošanas gadījumā, lai minimizētu gan izlidošanas aizkavēšanās varbūtību, gan tās ilgumu un paaugstinātu lidojumu regularitāti;
- 3) izstrādāts un ieviests lietojumprogrammatūras rīks *FlightSync*, kas balstīts piedāvātajos matemātiskajos modeļos un kumulatīvajos tehniskās aizkavēšanās aprēķina algoritmos; rīks nodrošina galveno lidojumu regularitāti ietekmējošo faktoru analīzi un paaugstina gaisa kuģu tehniskās ekspluatācijas efektivitāti aviokompānijas tīklā; testēšana, izmantojot RAF-AVIA reālos operatīvos datus, apstiprināja risinājuma praktisko lietojamību un efektivitāti.

Praktiskā nozīme

Izstrādāto modeļu praktiskā lietošana aviokompānijas darbībā būtiski samazina gan lidojumu aizkavēšanās varbūtību, gan to vidējo ilgumu aviokompānijas tīklā tehnisku atteižu gadījumā. Tas tiek panākts, optimizējot atjaunošanas procesus, nodrošinot efektīvu tehniskās apkopes resursu sadali un prognozējot tehniskās aizkavēšanās gaisa kuģu tehniskās ekspluatācijas ietvaros.

Aizstāvēšanai izvirzītie apgalvojumi

1. Gaisa kuģu stāvokļu un stāvokļu pāreju grafiskie modeļi atteižu un tehnisko defektu gadījumos gan bāzes, gan ārpusbāzes lidostās aviokompānijas tīklā gaisa kuģu tehniskās ekspluatācijas ietvaros.
2. Matemātiskie modeļi gaisa kuģu stāvokļa novērtēšanai atbilstoši *MEL* prasībām aviokompānijas tīkla lidostās atteižu un tehnisko defektu gadījumos, kā arī atjaunošanas modeļi, kas vērsti uz izlidošanas aizkavēšanās varbūtības un ilguma samazināšanu un lidojumu regularitātes paaugstināšanu.
3. Lietojumprogrammatūras rīks, kas realizē izstrādātos matemātiskos modeļus un nodrošina sagaidāmās tehniskās aizkavēšanās aprēķinu un prognozēšanu lidostās aviokompānijas tīklā.

Darba rezultāti

1. Veikta visaptveroša lidojumu regularitātes problēmas pašreizējā stāvokļa analīze civilajā aviācijā un tās ietekmes novērtējums uz aviokompānijas maršrutu tīkla darbību. Analīzē izvērtētas esošās pieejas lidojumu regularitātes vadībai un precizēta operatīvās gaisa kuģu tehniskās apkopes loma stabilas darbības nodrošināšanā aviokompānijas tīklā.
2. Analizētas gaisa kuģu atteices un tehniskie bojājumi ekspluatācijas laikā, izmantojot operatīvos datus, novērtētas atjaunošanas iespējas aviokompānijas tīklā un noteikti operatīvie faktori, kas ietekmē tehniskās aizkavēšanās varbūtību. Pētījumā noteikta savstarpējā saistība starp defektu rašanos, atjaunošanas apstākļiem tīkla lidostās un aizkavēšanās veidošanos aviokompānijas tīklā.
3. Izstrādāti matemātiskie modeļi gaisa kuģu stāvokļa novērtēšanai un atjaunošanas procesiem atbilstoši *MEL* prasībām aviokompānijas tīkla lidostās. Modeļi apraksta gaisa kuģu stāvokļu pārejas atteižu gadījumos un definētos atjaunošanas scenārijos un ir vērsti uz izlidošanas aizkavēšanās varbūtības un ilguma samazināšanu.
4. Izstrādāts lietojumprogrammatūras rīks *FlightSync* piedāvāto varbūtisko matemātisko modeļu ieviešanai operatīvās gaisa kuģu tehniskās apkopes vadībā. Rīks nodrošina kumulatīvo tehniskās aizkavēšanās aprēķinu un izstrādāto modeļu praktisku lietošanu aviokompānijas darbībā.
5. Lietojumprogrammatūras rīks *FlightSync* testēts un validēts, izmantojot RAF-AVIA aviokompānijas operatīvos un statistiskos datus. Validācija apstiprināja ieviesto varbūtisko modeļu korektumu un to lietojamību operatīvās gaisa kuģu tehniskās apkopes vadības atbalstam aviokompānijas tīklā.

Pētījuma rezultātu ticamība

Visi pētījuma rezultāti balstīti autora veiktajos praktiskos izstrādes darbos, tostarp normatīvajā, tehniskajā un organizatoriskajā dokumentācijā, kā arī reālos operatīvajos datos un sadarbībā ar lidostām RAF-AVIA aviokompānijas tīklā.

Aprobācija

Pētījuma rezultāti publicēti sešos zinātniskajos rakstos un prezentēti deviņās starptautiskajās zinātniskajās konferencēs Latvijā un Polijā, tostarp publikācijā, kas indeksēta *SCOPUS* datubāzē.

Publikācijas

1. Recovery Model for Aircraft at Airports Within the Airline Network of the Airline Company (2025). A. Zabirov, V. Šestakovs, J. Maklakovs, N. Krontals, I. Blumbergs. International Review of Aerospace Engineering (IREASE) – SCOPUS. DOI: <https://doi.org/10.15866/irease.v18i1.25566>.
2. Operational Management of Technological Processes for Preparing Aircraft for Departure at the Airport as a Multi-Criteria Task (2024). A. Zabirov, J. Soldatova, Z. Zabirov, V. Šestakovs. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences – SCOPUS. DOI: <https://doi.org/10.2478/lpts-2024-0047>.

3. Solving Technological Problems of Flight Services at Airport Involving Composite Materials (2024). M. Romele, A. Zabirov, R. Chatys, V. Šestakovs. Composites Theory and Practice – SCOPUS. DOI: <https://doi.org/10.62753/ctp.2024.07.2.2>.
4. Modelling a Quantitative Assessment Method of Pilots' Performance in Evidence-Based Training (2022). Z. Zabirov, A. Zabirov, V. Šestakovs. Aviation - SCOPUS. DOI: <https://doi.org/10.3846/aviation.2022.18037>.
5. Analysis of Approaches to Assessing Flight Delays Due to Technical Issues at Airline Network Airports Within the Operational Management Framework (2024). A. Zabirov, Z. Zabirov, V. Shestakov. DOI: <https://doi.org/10.2478/tar-2024-0008>.
6. Analysis of the Strapdown Inertial Navigation System (SINS) Error Genesis (2018). A. Zabirov, P. Trifonovs-Bogdanovs. Transport and Aerospace Engineering. DOI: <https://doi.org/10.1109/MAES.2005.1499250>.

Starptautiskās zinātniskās konferences

1. Development of Theoretical and Methodological Assessment Approaches of Airline Safety Culture as a Risk Factor (2023). A. Zabirov, J. Maklakovs, V. Šestakovs, N. Kuleshov. Instytut Lotnictwa Warszawa – SEMINARIUM V.
2. Ensuring Flight Safety Based on Improved Accuracy Rnav (Regional Navigation) Performance-Based Navigation Systems in Airspace Republic of Uzbekistan (2023). A. Zabirov, Z. Zabirov, V. Šestakovs. Instytut Lotnictwa Warszawa – SEMINARIUM V.
3. An Approach to Improving the Accuracy of Determining the Parameters of a Strap Down Inertial Navigation System (2022). A. Zabirov, Z. Zabirov, V. Šestakovs. Instytut Lotnictwa Warszawa – SEMINARIUM IV.
4. Methodological Approach of Management by a Human Factor in the System of Technical Exploitation (2022). A. Suharev, K. Stanisław Szafran, V. Šestakovs, A. Zabirov. Instytut Lotnictwa Warszawa – SEMINARIUM IV.
5. Error Formation in a Human Operator Decision-Making Process in Flight (2020). A. Zabirov, Z. Zabirov, V. Šestakovs. Transport Means.
6. Modelling a Quantitative Assessment Method of Pilots' Performance in Evidence-Based Training (2020). A. Zabirov, Z. Zabirov, V. Šestakovs. Riga Aviation Forum.
7. Analysis Of The Strapdown Inertial Navigation System Structure (2020). A. Zabirov, Z. Zabirov, V. Šestakovs, Pjotrs Trifonovs-Bogdanovs, T. Rogalski. READ – Research & Education in Aircraft Design.
8. Optimization of the Strapdown Inertial Navigation System Structure of Aircrafts (2020). A. Zabirov, Z. Zabirov, V. Šestakovs. 61ST INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE OF RTU.
9. Error Analysis of the Modern Aircraft Navigation Systems (2019). A. Urbahs, P. Trifonovs-Bogdanovs, A. Zabirov, K. Mamay. The 2nd Aviation and Space Congress.

Saīsinājumu saraksts

- *MCC – Maintenance Control Center*
- *CAMO – Continuing Airworthiness Management Organization*

- *OCC – Operations Control Centre*
- *MEL – Minimum Equipment List*
- *AOG – Aircraft on Ground*
- *MPD – Maintenance Planning Document*
- *AMP – Approved Maintenance Program*
- *IATA – International Air Transport Association*
- *ICAO – International Civil Aviation Organization*
- *EASA – European Union Aviation Safety Agency*
- *FAA – Federal Aviation Administration*
- *A/C – Aircraft*
- *TO – Technical Operation*

Darba struktūra

Darbs ietver anotāciju, ievadu, četras nodaļas, kopsavilkumu, secinājumus, izmantotās literatūras sarakstu ar 75 literatūras avotiem, pielikumiem, 42 attēlus, septiņas tabulas, kopā 146 lappuses.

Darba galvenās daļas

1. **Anotācija.** Tiek kopsavilkta pētījuma būtība – lidojumu regularitātes paaugstināšana, pilnveidojot gaisa kuģu tehniskās apkopes operatīvo vadību, izceļot varbūtiskās modelēšanas pieeju un lietojumprogrammatūras rīka izmantošanu, balstoties RAF-AVIA operatīvajos datos.
2. **Ievads.** Raksturota tehnisku iemeslu izraisīto lidojumu aizkavēšanās aktualitāte, definēts pētījuma mērķis, uzdevumi, metodes un darba praktiskā nozīme reģionālo aviokompāniju darbībā.
3. **Pirmā nodaļa.** Analizēti ar gaisa kuģu tehnisko stāvokli un operatīvo vadību saistītie aizkavēšanās cēloņi. Aprakstīta lidostu klasifikācija, aviokompānijas tīkla struktūra un ieviests gaisa kuģu tehnisko stāvokļu pāreju jēdziens.
4. **Otrā nodaļa.** Izklāstīts varbūtiskais modelis gaisa kuģu stāvokļu degradācijai un atjaunošanai. Ieviesta divu līmeņu *MEL* loģika, atjaunošanas un piegādes laika modelēšana, kā arī to integrācija lietojumprogrammatūras rīkā *FlightSync* scenāriju analīzei.
5. **Trešā nodaļa.** Modelis piemērots RAF-AVIA operatīvajai darbībai. Identificēti galvenie operatīvie faktori, kas ietekmē aizkavēšanos, un sniegtas prioritāras rekomendācijas tehniskās apkopes procesu uzlabošanai, balstoties modelēšanas rezultātos.
6. **Ceturtnā nodaļa.** Formulēta pieeja gaisa kuģu tehniskās apkopes operatīvās vadības optimizācijai, balstoties mērķfunkcijā. Ieviests kvantitatīvs kritērijs, kas raksturo sagaidāmās kopējās tehniskās aizkavēšanās maršrutā, analizēta vadības pasākumu ietekme, mainot varbūtiskos un laika parametrus, kā arī demonstrēta kombinēto stratēģiju efektivitāte, izmantojot detalizētu maršruta līmeņa gadījuma analīzi RAF-AVIA tīklā.

7. **Secinājumi.** Apstiprināta pētījuma uzdevumu izpilde. Izstrādātais modelis un lietojumprogrammatūras rīks nodrošina datos balstītu lēmumu pieņemšanu tehniskās aizkavēšanās samazināšanai un lidojumu regularitātes paaugstināšanai.
8. **Izmantotās literatūras saraksts.** Strukturēts 67 avotu saraksts, tostarp *ICAO*, *EASA*, *FAA* dokumenti un zinātniskās publikācijas par uzticamību, tehnisko apkopi un aviokompāniju darbību.
9. **Pielikumi.** *FlightSync* lietojumprogrammatūras rīka programmas kods. *AOG* statistikas dati.

1. FAKTORU, KAS IETEKMĒ LIDOJUMU REGULARITĀTI UN OPERATĪVĀS VADĪBAS EFEKTĪVITĀTI GAISA KUĢU TEHNISKAJĀ APKOPĒ, ANALĪZE

Ievads

Šajā nodaļā analizēti operatīvie, tehniskie un varbūtiskie faktori, kas ietekmē lidojumu regularitāti, un izstrādāta strukturēta pieeja tehniskās aizkavēšanās riska novērtēšanai aviokompānijas tīklā.

Lidojumu regularitāte ir viens no galvenajiem aviokompānijas operatīvās darbības efektivitātes rādītājiem. Aizkavēšanās izraisa ķēdes efektus tīklā, samazina pasažieru apmierinātību un rada tiešus finansiālus zaudējumus, kas palielinās līdz ar aizkavēšanās ilgumu. *Airport Collaborative Decision-Making* sistēmas uzlabo pirmsizlidošanas koordināciju, nodrošinot reāllaika informācijas apmaiņu starp aviokompānijām, apkalpojošo personālu uz zemes un gaisa satiksmes vadību. Aviokompānijas, kas ievieš integrētu aizkavēšanās vadību, demonstrē uzlabotus punktualitātes rādītājus. *IATA* standartizē aizkavēšanās uzskaiti, izmantojot vienotas operatīvās kategorijas (1.1. tab.).

1.1. tabula

Visu izlidošanas aizkavēšanās cēloņu procentuālais sadalījums pēc *IATA* kategorijām 2025. gadā

IATA kods	Definīcija
0–9	Citi un aviokompānijas iekšējie kodi
11–18	Pasažieru un bagāžas apkalpošana
21–29	Krava un pasts
31–39	Gaisa kuģu un perona apkalpošana
41–48	Tehniskie iemesli un gaisa kuģa aprīkojums
51–58	Gaisa kuģa bojājumi un automatizēto iekārtu atteices
61–69	Lidojumu izpilde un apkalpes darbs
71–77	Laikapstākļi
81–89	Gaisa satiksmes plūsmas vadība / lidostu un valsts institūciju ietekme
91–96	Sekundārās aizkavēšanās
97–99	Citi iemesli

Traucējumu vadība ir vērsta uz lidojumu grafika atjaunošanu un efektīvu resursu pārdali. Ritošās plānošanas pieeja tehniskajā apkopē un *MEL* saistītās noslodzes prognozēšana uzlabo operatīvo stabilitāti. Aizkavēšanās dati tiek apstrādāti centralizētās *ATM* sistēmās, un *EUROCONTROL* noteiktie plūsmas regulēšanas mehānismi mazina aizkavēšanās izplatīšanos tīkla līmenī.

Gaisa kuģu uzticamība tieši ietekmē lidojumu regularitāti, jo tehniskās atteices rada nepieciešamību pēc atjaunošanas laika un var izraisīt grafika traucējumus. Aizkavēšanās ekonomiskā ietekme pārsniedz 1,25 miljardus eiro gadā Eiropā un 32,9 miljardus ASV. Tādēļ efektīvai aizkavēšanās samazināšanai nepieciešamas varbūtiskās riska novērtēšanas metodes.

Šajā pētījumā tiek risināta nepietiekami attīstīto formālo modeļu problēma tehniskās aizkavēšanās novērtēšanai un piedāvāta operatīvās vadības pieeja, kas saskaņota ar *ICAO*

drošības prioritātēm un standartizētas tehniskās dokumentācijas principiem (*ATA Spec 100 / iSpec 2200*).

1.1. Lidojumu regularitātes stāvokļa analīze civilajā aviācijā

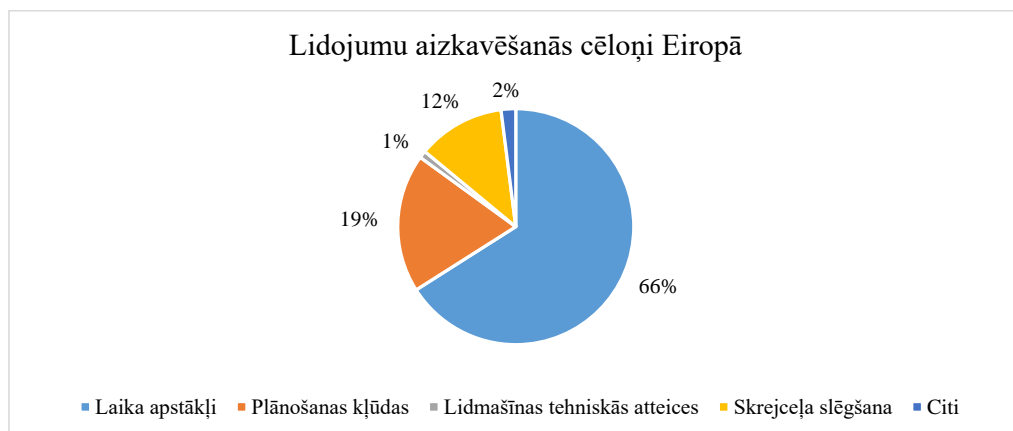
Lidojumu aizkavēšanās rodas gan nekontrolējamu faktoru, piemēram, laikapstākļu un gaisa satiksmes vadības (ATC) ierobežojumu dēļ, gan kontrolējamu operatīvo un tehnisko faktoru ietekmē. Eiropas statistikas dati liecina, ka sekundārās (reakcionārās) aizkavēšanās dominē ilgstošu traucējumu gadījumos, savukārt tehniskie iemesli būtiski ietekmē vidēja un liela ilguma aizkavēšanās intervālus (1.2. tab., 1.1. att.).

1.2. tabula

Aizkavēšanās cēloņi un ilgums (%) 2017. gadā (Eiropa)

Aizkavēšanās cēlonis / ilgums	< 15 min	15–30 min	31–60 min	1–2 h	> 2 h
Neklasificētās aizkavēšanās (dažādi iemesli), %	32,61	5,98	2,99	2,77	2,38
Aviokompānijas operatīvie iemesli, %	2,20	4,36	4,76	4,76	2,79
Pasažieru un bagāžas apkalpošana, %	2,97	3,46	1,68	0,81	0,55
Gaisa kuģu apkalpošana (iekraušana, degvielas uzpilde, ēdināšana), %	2,44	2,83	0,95	0,53	0,20
Gaisa kuģu tehniskā apkope un defekti, %	1,85	3,98	5,08	6,72	12,83
Operatīvā vadība un apkalpes darba laika ierobežojumi, %	3,24	4,43	2,96	2,46	2,00
Gaisa satiksmes vadība (ATM), %	12,76	15,24	8,58	4,60	2,50
Lidostu ierobežojumi, %	10,81	6,09	2,06	1,02	0,67
Sekundārās aizkavēšanās (iepriekšējā lidojuma ietekme), %	31,12	53,64	70,94	76,41	76,08

Lidojumu aizkavēšanās cēloņi Eiropā



1.1. attēls. Lidojumu aizkavēšanās cēloņi Eiropā.

Tehniskā nepieejamība izlidošanas brīdī ir saistīta ar defektu identificēšanu, paplašinātām pārbaudēm, gaisa kuģa nomaiņu un nepilnīgu sagatavošanu. Jaunākie Eiropas veikspējas ziņojumi apstiprina, ka ATM ierobežojumi, lidostu kapacitātes ierobežojumi, tehniskās atteices un apkalpes pieejamība būtiski ietekmē punktualitāti.

Uzticamībā balstīta tehniskā apkope (*Reliability-Centered Maintenance*) nodrošina iespēju prioritizēt tehniskās apkopes darbības atbilstoši atteižu kritiskumam. Aizkavēšanās sadalījuma statistiskā analīze atklāj pīķus, kas saistīti ar apgrozījuma (*turnaround*) procesa neefektivitāti un koordinācijas trūkumiem.

Šie rezultāti apstiprina nepieciešamību izmantot varbūtiskās modelēšanas pieejas aizkavēšanās riska novērtēšanai un samazināšanai aviokompāniju operatīvās vadības sistēmās.

1.2. Operatīvā plānošana un vadība aviokompāniju darbības sistēmās

Aviokompānijas vadība tiek īstenota stratēģiskajā un operatīvajā līmenī, kur operatīvais līmenis nodrošina ikdienas lidojumu izpildi un tieši nosaka lidojumu regularitāti. Dienas lidojumu plāns koordinē izlidošanas, ielidošanas un tranzīta operācijas, savukārt reāllaika uzraudzība nodrošina korektīvo atgriezeniskās saites mehānismu aktivizēšanu. Atbilstība *FAA* un *EASA* prasībām nodrošina procesu stabilitāti. Lidojumu plānošanas un tehniskās apkopes integrācija paaugstina gaisa kuģu izmantošanas efektivitāti.

Izlidošanas aizkavēšanās bieži rodas gaisa kuģa sagatavošanas ciklā, kas ietver aviokompānijas tehniskās apkopes darbības un zemes apkalpošanas procedūras. *Lean* tehniskās apkopes principi samazina procesu neefektivitāti un uzlabo apgrozījuma (*turnaround*) rādītājus. Normatīvā uzraudzība (*FAA Order 8900.1*) nosaka tehniskās apkopes atbilstības prasības.

Pat nelieli koordinācijas traucējumi var izplatīties operatīvajā ciklā un uzkrāties, radot izmērāmas novirzes no lidojumu grafika.

1.3. Izlidošanas aizkavēšanās gaisa kuģa sagatavošanas ciklā

Izlidošanas aizkavēšanās bieži rodas gaisa kuģa sagatavošanas ciklā, kas ietver:

- aviokompānijas tehniskās apkopes darbības;
- zemes apkalpošanas procedūras.

Lean tehniskās apkopes principi samazina zudumus un uzlabo apgrozījuma (*turnaround*) efektivitāti. Normatīvā uzraudzība (*FAA Order 8900.1*) nosaka tehniskās apkopes atbilstības prasības.

Nelieli koordinācijas traucējumi (degvielas uzpildes aizkavēšanās, instrumentu nepieejamība, komunikācijas kļūdas dispečēšanā) var izplatīties operatīvajā ciklā un uzkrāties, radot izmērāmas novirzes no lidojumu grafika.

1.4. Maršrutu līmeņa operatīvā vadība un lidmašīnu tehniskie stāvokļi

Lidmašīnu tehniskā ekspluatācija tiek modelēta kā mainīgas zemes un lidojuma fāzes maršrutu tīklā. Lidostas tiek klasificētas pēc tehniskajām iespējām:

- B – bāzes lidosta (nodrošina pilnu tehnisko apkopi un apgrozījumu);
- T – tranzīta lidosta (ierobežotas vai nav tehniskās apkopes iespējas);
- TB – tranzīta-bāzes lidosta (daļējas tehniskās apkopes iespējas).

Šī klasifikācija nosaka atjaunošanas iespējamību un ietekmē aizkavēšanās varbūtību.

Katrs lidojuma maršruts tiek attēlots kā lidojumu secība ar apgrozījuma operācijām atšķirīga tipa lidostās. Lidojumu maršrutu struktūra RAF-AVIA aviokompānijas tīklā redzama 1.3. tabulā.

1.3. tabula

RAF-AVIA aviokompānijas lidojumu tīkla struktūra

№	Lidojumu struktūra (grafiski)	Lidojuma parametri
1	B – T – B	1/2
2	B – T – T – B	1/3
3	B – T – TB – B	1/3
4	B – T – T – T – B	1/4
5	B – T – T – TB – B	1/4
6	B – T – TB – T – B	1/4
7	B – TB – TB – T – TB – B	1/5
8	B – TB – B – TB – TB – B	1/5
9	B – TB – T – TB – T – TB – B	1/6
10	B – T – T – T – TB – T – TB – B	1/7
11	B – TB – T – TB – T – T – TB – B	1/7
12	B – TB – T – T – TB – T – TB – B	1/7

Lidostu raksturojošie parametri apkopoti 1.4. tabulā.

1.4. tabula

Lidostu raksturojums aviokompānijas tīklā

№	Raksturojums	Lidostas tips			Piezīmes
		T	TB	B	
1	Rezerves daļu pieejamības varbūtība, kas nepieciešamas lidmašīnas atjaunošanai	P_{SP}^T	P_{SP}^{TB}	P_{SP}^B	-
2	Lidmašīnas atjaunošanas laika (T_R) varbūtiskie raksturlielumi	$F^T(t)$	$F^{TB}(t)$	$F^B(t)$	Var tikt noteikti ar alternatīvām metodēm
3	Nepieciešamo rezerves daļu piegādes laika (T_D) varbūtiskie raksturlielumi, ja tās nav pieejamas lidostā	$G^T(t)$	$G^{TB}(t)$	$G^B(t)$	Var tikt noteikti ar alternatīvām metodēm
4	Lidmašīnas atgriešanās varbūtība nākamajā reisā bāzes lidostā	-	-	P_{LB}	-
5	Rezerves lidmašīnas pieejamības varbūtība bāzes lidostā lidojuma izpildei	-	-	P_{RES}	-
6	Speciālistu pieejamība lidmašīnas atjaunošanas darbiem	Nē	Jā	Jā	-
7	Vidējais lidmašīnas apgrozījuma laiks lidostā	T_{AT}^T	T_{AT}^{TB}	T_{AT}^B	B tipam gadījumā, ja lidmašīna tiek iekļauta nākamajā reisā

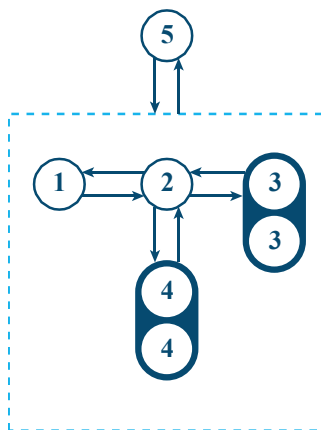
1.5. Lidmašīnas stāvokļi un pārejas tās ekspluatācijas procesa posmos operatīvās vadības cikla līmenī

Lidmašīnas tehniskā ekspluatācija aviokompānijas operatīvās vadības sistēmā tiek sadalīta atsevišķos posmos, kas atspoguļo tās fizisko un funkcionālo stāvokli maršrutu tīklā:

- 1) atrašanās bāzes lidostā;
- 2) aktīva ekspluatācija lidojumā;
- 3) apgrozījums tranzīta lidostā;
- 4) uzturēšanās tranzīta-bāzes lidostā ar ierobežotām tehniskās apkopes iespējām;
- 5) izslēgšana no operatīvās vadības cikla plānotās vai neplānotās tehniskās apkopes veikšanai.

Lidmašīnas stāvokļu attīstību šajos posmos var aprakstīt kā Markova ķēdi ar nosacītām pāreju varbūtībām, ko nosaka operatīvie ierobežojumi.

Atbilstošā stāvokļu pāreju struktūra redzama 1.2. attēlā.



1.2. attēls. Lidmašīnas stāvokļu pāreju grafiks tehniskās ekspluatācijas procesa posmos (operatīvās vadības cikla līmenī).

Tālāk detalizētāk aplūkots lidmašīnas tehniskās ekspluatācijas sistēmas posmu saturs un struktūra atbilstoši lidmašīnas stāvokļu un pāreju secībai operatīvās vadības cikla līmenī.

1.6. Lidmašīnas tehniskā apkope uz zemes pirmslidojuma sagatavošanas laikā

Pirmslidojuma sagatavošana ietver uz zemes veiktās tehniskās apkopes procedūras, kas nodrošina nepārtrauktu lidojumderīgumu un gatavību izlidošanai. Lai formāli analizētu savstarpējās atkarības starp operācijām, tiek izmantota grafu teorijā balstīta pieeja.

Kā norādīts Lee u. c. pētījumos, koordinēta loģistikas plānošana, rezerves daļu pieejamība un laika ziņā kritiska plānošana tieši ietekmē zemes laika rādītājus. Grafiskie modeļi ļauj identificēt kvantitatīvās sakarības starp tehnoloģiskajām operācijām un veido statistiskās analīzes pamatu.

Tīkla plūsmas diagramma tranzīta lidojumam redzama 1.3. attēlā.

1.7. Lidmašīnas visaptverošās sagatavošanas procesa plūsmas shēma izlidošanai tranzīta lidostā

Visas lidmašīnas tranzīta lidostā izlidošanai tiek pakļautas zemes apkalpošanai. Visaptverošais sagatavošanas process ietver lidmašīnas pieņemšanu, pirmslidojuma apkalpošanu un sagatavošanu izlidošanai atbilstoši FAA tehniskās apkopes vadlīnijām.

Lidmašīnas pieņemšana ietver novadīšanu uz peronu, riteņu balstu uzstādīšanu un pēclidojuma pārbaudi. Vilkšana (*towing*) ir nepieciešama gadījumos, kad pārvietošanās ar paša dzinējiem nav iespējama vai nepieciešama lidmašīnas pārvietošana bez apkalpes iesaistes.

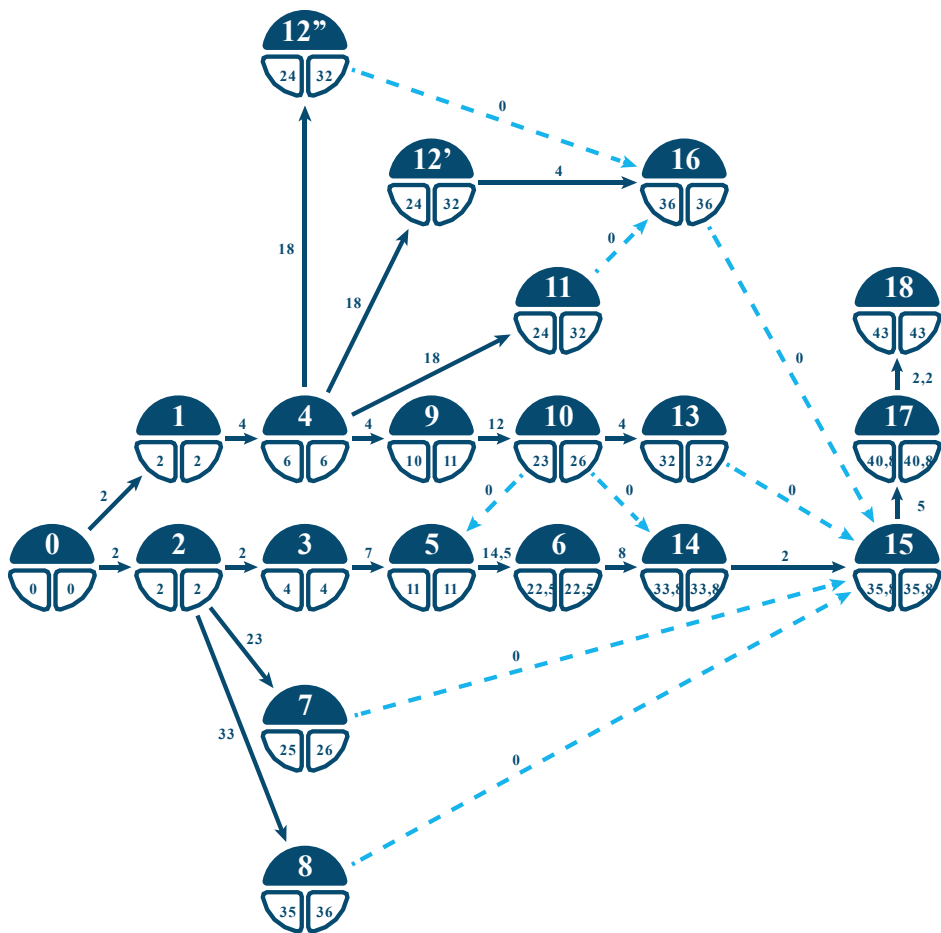
Pirmslidojuma sagatavošana ietver ārējās elektroapgādes pieslēgšanu, salona klimata nodrošināšanu, iekraušanas un degvielas uzpildes operācijas, kā arī tīrīšanu. Ārējā elektroapgāde samazina borta sistēmu noslodzi, savukārt vides kontroles sistēma nodrošina pasažieru komfortu. Degvielas uzpilde un nepieciešamo šķidrumu papildināšana tiek veikta pirms iekāpšanas. Salona un kabīnes tīrīšana tiek veikta pirms pasažieru iekāpšanas.

Procesa plūsmas shēma nosaka standartizētu darbu organizāciju, lai samazinātu apgrozījuma (*turnaround*) laiku un mazinātu aizkavēšanās risku. Shēma attēlota kā laika mērogā lineāra diagramma ("operācija-laiks" koordinātās), tās parametri apkopoti 1.5. tabulā.

Tīkla struktūra nosaka darbu hronoloģisko secību un definē agrākos un vēlākos pieļaujamos uzsākšanas laikus, kas ļauj analizēt operatīvos ierobežojumus un savstarpējās atkarības.

Savienojumi starp notikumiem tiek attēloti šādi:

- 1) nepārtrauktas līnijas – noteikta ilguma reālie darbi;
- 2) pārtrauktas līnijas – loģiskās atkarības bez izpildes laika.

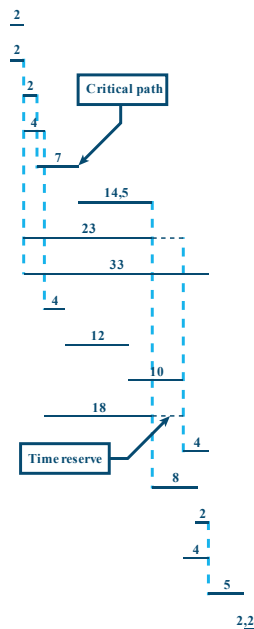


1.3. attēls. Lidmašīnas visaptverošās sagatavošanas procesa plūsmas shēma izlidošanai tranzīta lidostā.

1.5. tabulā apkopotie darba tehnoloģiskā procesa parametri ietver konkrētajā tehniskās apkopes formā veicamo darbu nosaukumus, sākuma un beigu notikumus, starp kuriem darbs tiek veikts, kā arī darba izpildes ilgumu, balstoties vispārējās apgrozījuma (*turnaround*) procedūrās.

Darba tehnoloģiskā procesa parametru tabula

Notikuma numurs	Notikuma apraksts	Izpildītāju skaits	Darba ilgums [min]
1	Apkalpes sakaru nodrošināšana	1	
2	Rīteņu balstu uzstādīšana	2	
3	Iekāpšanas trapu uzstādīšana	1	
4	Sagatavošanas tehniskās apkopes darbi	3	
5	Pasažieru izkāpšana	1	
6	Salona tīrīšana	12	
7	Bagāžas izkraušana un iekraušana	3	
8	Borta elektroapgādes ieslēgšana/izslēgšana	2	
9	Sagatavošanas darbi degvielas uzpildei	1	
10	Degvielas uzpilde	1	
11	Ūdens sistēmas uzpilde	1	
12	Maršruta pārbaude	2	
13	Notekūdeņu novadīšana	1	
14	Pasažieru iekāpšana	1	
15	Iekāpšanas trapu noņemšana	1	
16	Noslēdzošie tehniskās apkopes darbi	2	
17	Dzinēju iedarbināšana	1	
18	Elektroapgādes atvienošana	1	
Kopējais visaptverošās pirmslidojuma sagatavošanas laiks $T_{\text{sum}} = 43$ minūtes.			



Tīkla procesa modelī kritiskais ceļš ir garākā savstarpēji atkarīgo darbu ķēde, kas nosaka kopējo lidmašīnas sagatavošanas ilgumu. Tranzīta operācijām tas nosaka minimālo apgrozījuma laiku pirms izlidošanas (1.3. att.). Darbiem kritiskajā ceļā nav laika rezerves, tādēļ jebkādas izpildes laika novirzes, ko izraisa resursu pieejamība, personāls vai tehniskās apkopes efektivitāte, tieši ietekmē lidmašīnas uzturēšanās laiku uz zemes un izlidošanas punktualitāti. Notikumi atbilst darbu izpildes pabeigšanas punktiem (1.5. tab.).

Dispečēšana ietver pirmslidojuma pārbaudi, dzinēju iedarbināšanas uzraudzību, vilkšanu un ATC atļaujas saņemšanu. Pēc sistēmu gatavības apstiprināšanas komunikācija pāriet uz vizuālajiem signāliem, un lidmašīna tiek iekļauta izlidošanas secībā. ATC sekvencēšanas efektivitāte būtiski ietekmē izlidošanas punktualitāti un manevrēšanas (*taxi out*) aizkavēšanās.

1.8. Lidmašīnas stāvokli un pārejas

Lidmašīnas “stāvoklis” tiek definēts kā situācija, kas rodas nelabvēlīgu faktoru ietekmē uz normālu ekspluatāciju un samazina lidojumu drošības līmeni. Saskaņā ar *EASA Part-M* un *Part-CAMO* prasībām nepārtraukts lidojumderīgums jānodrošina, izmantojot strukturētu tehniskās

apkopes kontroli un atbildības sadali apstiprinātās organizācijās. Situācijas, kurās lidmašīna nav droša ekspluatācijai, tiek regulētas ar MEL procedūrām.

Lidmašīnas stāvokļi tiek apzīmēti kā S_i , kur $i = 0, 1, 2, 3, 4$, kas atspoguļo pieaugošu ekspluatācijas degradācijas pakāpi:

- S_0 – normāls lidojuma stāvoklis;
- S_1 – lidojuma apstākļu pasliktināšanās;
- S_2 – bīstams (brīdinājuma) stāvoklis;
- S_3 – ārkārtas stāvoklis;
- S_4 – katastrofisks stāvoklis.

1.9. Varbūtiskie rādītāji, kas izmantoti atteices stāvokļu kvalitatīvajā un kvantitatīvajā analīzē

Kvantitatīvajā analīzē atteices stāvokļi tiek raksturoti ar pieļaujamām vidējām varbūtībām uz vienu lidojuma stundu vai vienu lidojumu. Šie varbūtību līmeņi ir noteikti normatīvajos projektēšanas ietvaros daudzdzinēju lidmašīnām un atspoguļo sagaidāmos ekspluatācijas apstākļus un apkāpes reakcijas iespējas.

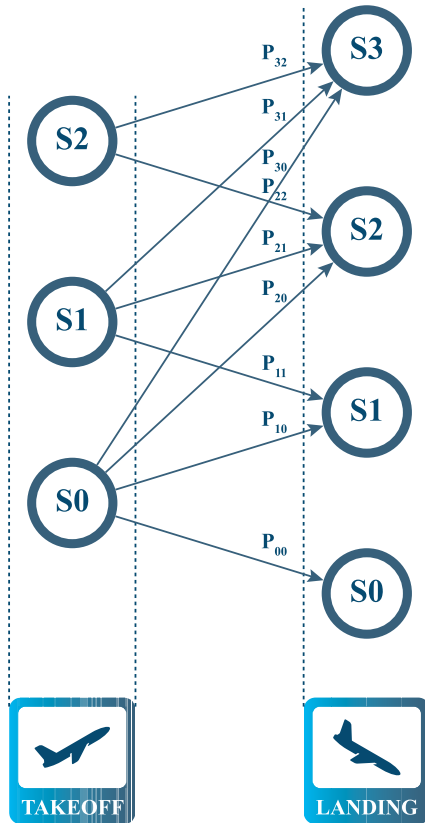
Normatīvā klasifikācija nosaka šādus līmeņus:

- S_{NR} – bieži – $P_{NR} < 10^{-3}$;
- S_1 – iespējami – $P_1 < 10^{-4}$;
- S_2 – reti – $P_2 < 10^{-5}$;
- S_3 – ļoti reti – $P_3 < 10^{-6}$;
- S_4 – praktiski neiespējami – $P_4 < 10^{-7}$.

Pamatojoties uz šiem ierobežojumiem, iespējamās lidmašīnas stāvokļu pārejas viena lidojuma laikā tiek attēlotas ar grafu, kas redzams 1.4. attēlā, atbilstoši normatīvajām drošības definīcijām un riska modeļiem.

Modelis pieņem, ka:

- lidojuma laikā lidmašīnas stāvoklis neuzlabojas;
- izlidošana (t. i., no B tipa lidostas) ir atļauta tikai S_0, S_1 un S_2 stāvoklī;
- izlidošana no T un TB tipa lidostām ir atļauta S_0, S_1, S_2 un S_3 stāvoklī.



1.4. attēls. Lidmašīnas visaptverošās sagatavošanas procesa plūsmas shēma izlidošanai tranzīta lidostā.

SNR stāvoklis netiek iekļauts stāvokļu pāreju grafā, jo tas neietekmē lidojumu drošību vai izlidošanas iespējamību; šajā stāvoklī lidmašīna var turpināt ekspluatāciju līdz tehniskā lēmuma pieņemšanai

Jebkurā aviokompānijas tīkla posmā atteices var rasties gan lidojuma laikā, gan uz zemes, un pirms turpmākās ekspluatācijas ir nepieciešama atjaunošana. Tādēļ lidmašīnas tiek klasificētas kā “derīgas” vai “nederīgas” turpmākai lidojuma izpildei; pēdējā gadījumā atjaunošana ir obligāta. Šāda atjaunošana rada izlidošanas aizkavēšanās risku, kas jāņem vērā kopējā lidmašīnas dīkstāves laika novērtējumā.

Lai novērtētu izlidošanas aizkavēšanās risku operatīvās vadības ciklā, nepieciešami trīs modelēšanas līmeņi:

- lidmašīnas stāvokļa izmaiņu modelis viena lidojuma posma ietvaros maršrutā;
- lidmašīnas stāvokļa izmaiņu modelis visā maršruta garumā;
- lidmašīnas stāvokļa izmaiņu modelis vairāku maršrutu secībā laika periodā, kurā lidmašīna atrodas tehniskās apkopes operatīvās vadības ciklā.

2. LIDMAŠĪNAS TEHNISKĀS APKOPES PROCESA MODEĻA IZSTRĀDE OPERATĪVĀS VADĪBAS CIKLA LĪMENĪ

2.1. Grafiskais modelis

Lidmašīnas tehniskās apkopes procesa struktūra

Lai aprakstītu lidmašīnas stāvokļa izmaiņas aviokompānijas tīklā (1.4. att.), tiek ieviests vienots grafiskais attēlojums, kas aptver pārejas viena lidojuma ietvaros, visā maršrutā un vairāku maršrutu secībā operatīvās vadības ciklā.

Modelis balstās operatīvajos pieņēmumos, kas atspoguļo izlidošanas ierobežojumus un tehniskās apkopes nosacījumus. Tiek pieņemts, ka lidmašīnas stāvoklis lidojuma laikā neuzlabojas. Izlidošana no bāzes lidostas (B) ir atļauta tikai S_0 un S_1 stāvoklī, savukārt izlidošana no tranzīta (T) un tranzīta-bāzes (TB) lidostām ir atļauta S_0 , S_1 un S_2 stāvoklī.

Atjaunošanas iespējas ir atkarīgas no lidostas tipa. Bāzes lidostās degradētie S_2 un S_3 stāvokļi var tikt atjaunoti līdz izlidošanai derīgam stāvoklim atkarībā no rezerves daļu pieejamības, atjaunošanas laika sadalījuma $F(t)$, piegādes laika $G(t)$ un rezerves lidmašīnas pieejamības varbūtības P_{RES} . Tranzīta un tranzīta-bāzes lidostās atjaunošana ir ierobežota ar pieejamajiem resursiem un galvenokārt atkarīga no rezerves daļu pieejamības varbūtības P_{SP} , kā arī no atjaunošanas un piegādes laika sadalījuma.

Tiek aplūkoti divi aizkavēšanās veidošanās mehānismi. Tranzīta un tranzīta-bāzes lidostās aizkavēšanās ir atkarīga no tā, vai atjaunošanu iespējams veikt uz vietas – ja rezerves daļas ir pieejamas, atjaunošana notiek saskaņā ar $F(t)$; pretējā gadījumā nepieciešams papildu piegādes laiks $G(t)$. Bāzes lidostās aizkavēšanās veidošanos papildus ietekmē iespēja aizvietot lidmašīnu ar rezerves vienību.

Aizkavēšanās rodas gadījumā, ja kopējais atjaunošanas laiks pārsniedz pieejamo apgrozījuma laiku T_{AT} ; pretējā gadījumā izlidošana notiek bez aizkavēšanās. Tādējādi aizkavēšanās ilgumu nosaka atjaunošanas laika pārsniegums attiecībā pret operatīvo laika logu.

Lidmašīnas stāvokļu pāreju procesi ir izstrādāti dažādiem lidostu tipiem (B, T, TB). Raksturīgs gadījums tranzīta lidostai (T), kur aizkavēšanās veidošanos visvairāk ierobežo tehniskās apkopes iespējas, redzams 2.1. attēlā.

Grafiskais modelis veido pamatu turpmākai lidmašīnas atjaunošanas procesu matemātiskai formalizācijai un izlidošanas aizkavēšanās varbūtiskajai analīzei, ko izraisa stāvokļu izmaiņas lidojuma un zemes operāciju laikā.



2.1. attēls. Lidmašīnas stāvokļu un pāreju grafi TB tipa lidostā un iepriekšējā lidojumā.

2.2. Lidmašīnas stāvokļa izmaiņu matemātiskais modelis viena lidojuma ietvaros

Lidmašīnas stāvoklis lidojuma sākumā tiek apzīmēts ar η . Iespējamās η vērtības (1.4. att.) ir $\{S_0, S_1, S_2\}$.

Varbūtības, ka lidmašīna lidojuma sākumā atrodas attiecīgi S_0, S_1, S_2 stāvoklī, tiek apzīmētas ar q_0, q_1, q_2 .

To var izteikt šādi:

$$P\{\eta = S_j\} = q_j; \sum_j q_j = 1; j = 0,1,2. \quad (2.1)$$

Tādējādi lidmašīnas stāvoklis lidojuma sākumā ir gadījuma lielums ar iespējamo stāvokļu kopu $\{S_0, S_1, S_2\}$ un atbilstošu varbūtību sadalījumu (1.2. att.).

Lidmašīnas stāvoklis lidojuma beigās tiek apzīmēts ar ξ . Iespējamās ξ vērtības (1.4. att.) ir $\{S_0, S_1, S_2, S_3\}$.

Varbūtības, ka lidmašīna lidojuma beigās atrodas attiecīgi S_0, S_1, S_2, S_3 stāvoklī, tiek apzīmētas ar p_0, p_1, p_2, p_3 . To var izteikt šādi:

$$P\{\xi = S_i\} = p_i; \sum_i p_i = 1; i = 0,1,2,3. \quad (2.2)$$

Lidmašīnas stāvoklis lidojuma beigās ir gadījuma lielums ar četriem iespējamiem stāvokļiem S_0, S_1, S_2, S_3 un atbilstošu varbūtību sadalījumu (1.4. att.).

Ar $p_{ij} = P\{\xi = \frac{S_i}{\eta} = S_j\}$ tiek apzīmēta nosacīta varbūtība, ka lidmašīnas stāvoklis lidojuma beigās ir S_i , ja lidojuma sākumā tas bija S_j . Šīm nosacītajām varbūtībām p_{ij} ir spēkā šāda īpašība:

$$\sum_{i=0}^3 p_{ij} = 1; j = 0,1,2. \quad (2.3)$$

Dažas no vērtībām p_{ij} atbilstoši stāvokļu pāreju shēmai (1.4. att.) būs vienādas ar nulli.

Visas minētās p_{ij} vērtības tiek sakārtotas taisnstūra matricā P ar izmēru 4×3 , ko sauc par pāreju matricu jeb pāreju varbūtību matricu, kas raksturo lidmašīnas stāvokļu izmaiņas no lidojuma sākuma līdz beigām:

$$P = \begin{pmatrix} 1 - p_{10} - p_{20} - p_{30} & 0 & 0 \\ p_{10} & 1 - p_{21} - p_{31} & 0 \\ p_{20} & p_{21} & 1 - p_{32} \\ p_{30} & p_{31} & p_{32} \end{pmatrix}. \quad (2.4)$$

Stāvokļu varbūtības q_j un p_j tiek pierakstītas kā stāvokļu varbūtību vektori šādā veidā:

$$p = \begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix}, q = \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \end{pmatrix}. \quad (2.5)$$

Tad sakarība starp vektoriem p un q tiek noteikta ar formulu, kas matricu veidā ir kompakti pierakstāma, kā tas pieņemts klasiskajos Markova uzticamības modelēšanas ietvaros:

$$p = Pq. \quad (2.6)$$

Nosacītās varbūtības p_{ij} tiek uzskatītas par dotām un ir saistītas ar ekspluatētās lidmašīnu flotes uzticamības līmeni, kā arī ar pieļaujamo atteižu saraksta pamatotību līdz lidmašīnas nokļūšanai bāzes tipa (B) lidostā un/vai līdz nākamajai plānotajai tehniskajai apkopei. Tādējādi varbūtības $(1 - p_{00}) = p_{10} + p_{20} + p_{30}$, $(1 - p_{11}) = p_{21} + p_{31}$, $(1 - p_{22}) = p_{32}$ raksturo atteižu iestāšanās varbūtību lidojuma laikā vai uz zemes, ja lidmašīna izlido attiecīgi S_0 , S_1 un S_2 stāvoklī. Savukārt varbūtības p_{00} , p_{11} un p_{22} raksturo to, ka atteices lidojuma laikā vai uz zemes neiestājas, ja lidmašīna izlido attiecīgi S_0 , S_1 un S_2 stāvoklī.

Attiecības $\frac{p_{32}}{p_{30}}$, $\frac{p_{31}}{p_{30}}$, $\frac{p_{21}}{p_{20}}$, kas pēc definīcijas ir lielākas vai vienādas ar 1, var tikt interpretētas kā rādītāji pieļaujamo atteižu saraksta pamatotībai attiecīgi S_2 un S_1 stāvoklim. Saraksti tiek uzskatīti par pamatotiem, ja šīs attiecības ir vienādas ar 1.

Izmantojot zināmus uzticamības teorijas rādītājus, izteiksmi p_{00} var pierakstīt šādā formā:

$$p_{00} = e^{-\omega T_{NSF}}, \quad (2.7)$$

kur T_{AN} – lidmašīnas vidējais bezapstāšanās lidojuma ilgums (NSF) aviokompānijas tīklā, ω – lidmašīnas atteižu intensitātes parametrs, ja lidmašīna izlido S_0 stāvoklī.

2.3. Lidmašīnas stāvokļa izmaiņu matemātiskais modelis maršruta ietvaros

Lidmašīnas ekspluatācija maršrutā tiek attēlota kā lidojumu posmu secība ar starpposma zemes operācijām. Stāvokļu attīstība maršruta ietvaros tiek modelēta kā viena lidojuma pāreju procesa atkārtota piemērošana, ņemot vērā starpposma atjaunošanas ietekmi.

Rezultējošais stāvokļu sadalījums pēc maršruta pabeigšanas ir atkarīgs no secīgu pāreju kumulatīvās ietekmes:

- degradācija katrā lidojuma posmā;
- daļēja atjaunošana apgrozījuma laikā;
- operatīvie ierobežojumi, kas saistīti ar lidostas tipu.

Modelī tiek ņemta vērā maršruta struktūra (B, T, TB lidostu secība), novērtējot varbūtību sasniegt kritiskos stāvokļus visā maršrutā. Tādējādi maršruta līmeņa modelis paplašina viena lidojuma modeli, ieviešot stāvokļu uzkrāšanos un atkarību starp secīgiem lidojuma posmiem.

2.4. Lidmašīnas stāvokļa izmaiņu matemātiskais modelis maršrutu secībā

Lai aprakstītu lidmašīnas ilgtermiņa ekspluatāciju aviokompānijas tīklā, modelis tiek paplašināts līdz maršrutu secībai. Šajā gadījumā lidmašīnas stāvokļa attīstība tiek aplūkota vairāku operatīvo ciklu ietvaros, veidojot stohastisku procesu ar stacionārām īpašībām.

Modelis ļauj novērtēt:

- lidmašīnas tehnisko stāvokļu stacionārās varbūtības;
- ilgtermiņa uzticamības rādītājus;
- degradācijas kumulatīvo varbūtību ekspluatācijas laikā.

Maršrutu secība tiek interpretēta kā savstarpēji saistītu operatīvo ciklu ķēde, kur viena maršruta galastāvoklis kļūst par nākamā maršruta sākumstāvokli. Tas ļauj novērtēt lidmašīnas tehniskā stāvokļa stabilitāti operatīvās vadības ciklā un identificēt uzticamības degradācijas tendences.

2.5. Lidmašīnas atjaunošanas procesu un izlidošanas aizkavēšanās modeļi

Lidmašīnas atjaunošanas procesi tiek modelēti, balstoties tehniskās apkopes iespējās un loģistikas ierobežojumu varbūtiskajos raksturlielumos. Atjaunošanas laiks ir atkarīgs no:

- rezerves daļu pieejamības varbūtības P_{SP} ;
- atjaunošanas laika sadalījuma $F(t)$;
- piegādes laika sadalījuma $G(t)$;
- rezerves lidmašīnas pieejamības P_{RES} .

Tiek aplūkoti divi atjaunošanas mehānismi.

1. Tranzīta (T, TB) lidostās. Atjaunošana tiek veikta vai nu nekavējoties (ja rezerves daļas ir pieejamas), vai pēc to piegādes. Kopējo atjaunošanas laiku nosaka tehniskās apkopes un loģistikas procesu kombinācija.
2. Bāzes (B) lidostās. Papildus standarta atjaunošanai iespējama lidmašīnas aizvietošana ar rezerves lidmašīnu, kas samazina aizkavēšanās varbūtību.

Izlidošanas aizkavēšanās veidojas gadījumā, ja kopējais atjaunošanas laiks pārsniedz pieejamo apgrozījuma laiku T_{AT} . Aizkavēšanās ilgums tiek noteikts kā funkcija no lidmašīnas atjaunošanas procesa parametriem, tostarp tehniskās apkopes laika un papildu laika, kas saistīts ar rezerves daļu piegādi un operatīvajiem ierobežojumiem.

Atbilstošais aizkavēšanās veidošanās analītiskais apraksts modelī tiek ieviests, izmantojot atjaunošanas laika varbūtiskos raksturlielumus, kas ļauj formāli novērtēt aizkavēšanās iestāšanos un tās ilgumu.

Modelis ļauj novērtēt:

- aizkavēšanās iestāšanās varbūtību;
- sagaidāmo aizkavēšanās ilgumu;
- aizkavēšanās jutīgumu pret tehniskās apkopes un loģistikas parametriem.

Tādējādi atjaunošanas procesi darbojas kā savienošais elements starp lidmašīnas tehniskā stāvokļa attīstību un operatīvajiem veiktspējas rādītājiem, tieši ietekmējot lidojumu regularitāti.

2.6. Lietojumprogrammatūras rīka realizācija lidojumu regularitātes novērtēšanas modelim

Lietojumprogrammatūras rīka mērķis

Lietojumprogrammatūras rīks *FlightSync* ir izstrādāts kā 2. nodaļā piedāvātā lidojumu regularitātes novērtēšanas matemātiskā modeļa praktiska realizācija. Tas darbojas kā inženiertehniskais lēmumu atbalsta instruments, kas ļauj novērtēt aizkavēšanās veidošanos dažādos operatīvajos un tehniskās apkopes apstākļos.

Lietojumprogramma integrē galvenos modeļa elementus, tostarp lidmašīnas stāvokļu sadalījumu, stāvokļu pāreju varbūtības, lidostu specifiskās atjaunošanas iespējas un maršrutu struktūru. Aizkavēšanās veidošanās tiek analizēta, ņemot vērā uzticamības parametru un operatīvo ierobežojumu mijiedarbību, piemēram, apgrozījuma laiku, rezerves daļu pieejamību un rezerves lidmašīnas izmantošanas loģiku.

Lietojumprogrammas struktūra atbilst matemātiskā modeļa loģikai. Ievades parametri ietver:

- maršrutu konfigurāciju un varbūtību sadalījumu aviokompānijas tīklā;
- sākotnējo lidmašīnas tehniskā stāvokļa sadalījumu;
- stāvokļu pāreju varbūtības viena lidojuma ietvaros;
- atjaunošanas un rezerves daļu piegādes laika raksturlielumus;
- rezerves daļu pieejamības varbūtību dažādu tipu lidostās;
- bāzes lidostas operatīvos parametrus, tostarp rezerves lidmašīnas pieejamību un *loop-back* loģiku.

Aprēķinu process ļauj novērtēt aizkavēšanās veidošanos vairākos līmeņos – atsevišķu lidostu operācijas, konkrētu maršrutu veiktspēju un kopējo ietekmi uz tīklu. Katram maršrutam aizkavēšanās vērtības tiek aprēķinātas un svērtas atbilstoši to varbūtībai, kas ļauj novērtēt kopējo lidojumu regularitāti aviokompānijas sistēmā.

Lietojumprogramma nodrošina gan apkopotus, gan detalizētus analītiskos rezultātus, tostarp aizkavēšanās sadalījumus, jutīgumu pret ievades parametriem un tehniskās apkopes loģistikas ietekmi uz operatīvo veiktspēju. Rezultātus iespējams eksportēt turpmākai analīzei vai integrēt pārskatu un lēmumu pieņemšanas procesos.

Katra lietojumprogrammas funkcionālā komponente tieši atbilst matemātiskā modeļa elementiem, kas aprakstīti 2.1.–2.5. apakšnodaļā, nodrošinot konsekveni starp teorētisko formulējumu un praktisko realizāciju.

Atšķirībā no tradicionālajām *OCC* sistēmām, kas galvenokārt ir vērstas uz monitoringu un reaktīvu operatīvo vadību, lietojumprogrammatūras rīks *FlightSync* nodrošina lidmašīnas tehnisko stāvokļu, atjaunošanas procesu un loģistikas ierobežojumu varbūtisko modelēšanu. Tas ļauj kvantitatīvi novērtēt aizkavēšanās veidošanās mehānismus un sniedz padziļinātu izpratni par tehniskās apkopes un operatīvo faktoru ietekmi uz lidojumu regularitāti.

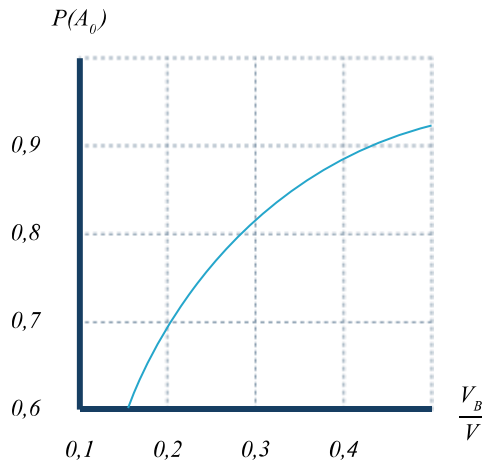
3. IETEIKUMU IZSTRĀDE UN PAMATOJUMS LIDMAŠĪNU TEHNISKĀS EKSPLOATĀCIJAS PROCESU OPERATĪVĀS VADĪBAS PILNVEIDOŠANAI AVIOKOMPĀNIJAS APSTĀKĻOS

3.1. Lidmašīnu stāvokļu dinamikas analīze lidostās aviokompānijas tīklā

Šajā nodaļā aprakstīta veiktā lidmašīnu tehnisko stāvokļu dinamikas analīze aviokompānijas tīklā, lai novērtētu situāciju rašanos, kurās nepieciešama lidmašīnas atjaunošana, un līdz ar to arī izlidošanas aizkavēšanās risku. Analīze koncentrējas uz MEL ietekmi, maršrutu struktūru un pāreju varbūtībām starp lidmašīnu stāvokļiem.

Ņemot vērā atšķirības atjaunošanas procesos un aizkavēšanās veidošanās mehānismos, analīze tiek veikta atsevišķi nebāzes un bāzes lidostām.

Nebāzes lidostām varbūtība $P(A_0)$ pabeigt lidojumu S_0 stāvoklī galvenokārt tiek noteikta ar aviokompānijas tīkla struktūru, ko raksturo parametrs V_B/V . Ja MEL netiek izmantots vai ja tajā ir iekļautas tikai atteices, kas atbilst S_2 stāvoklim, tad $P(A_0)$ dinamika ir atkarīga tikai no šī parametra. Tomēr atteižu iekļaušana, kas pieļauj lidojumu turpināšanu līdz nākamajai plānotajai tehniskajai apkopei (S_1 stāvoklis), rada papildu atkarību no veikto lidojumu skaita n , kas atspoguļo atlikto atteižu uzkrāšanos (3.1. att.).



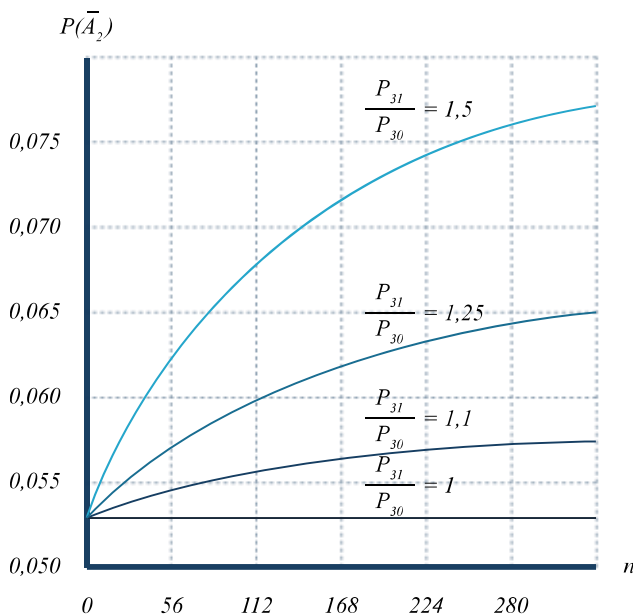
3.1. attēls. S_0 stāvokļa dinamika pie $P_{10} = 0$ nebāzes lidostās.

Analīze rāda, ka varbūtība $P(A_1)$, kas atbilst lidojuma pabeigšanai $S_0 \cup S_1$ stāvoklī, paliek neatkarīga no lidojumu skaita n . Tādējādi $P(A_0)$ samazināšanās, palielinoties n , liecina par lidmašīnas atrašanās varbūtības pieaugumu S_1 stāvoklī, t. i., pieļaujamo atteižu uzkrāšanos.

Būtisks analīzes rezultāts ir tas, ka pieļaujamo atteižu saraksta paplašināšana (S_1 stāvokļa ieviešana) būtiski nesamazina situāciju varbūtību, kurās nepieciešama atjaunošana, bet gan pārdala tās laikā. Šis efekts veicina latentā riska veidošanos, kas materializējas turpmākajās pārejās uz S_3 stāvokli.

Situāciju, kurās nepieciešama lidmašīnas atjaunošana nebāzes lidostās, rašanās varbūtība tiek noteikta kā $1 - P(A_2)$, kas atbilst S_3 stāvokļa varbūtībai. Analīze liecina, ka šī varbūtība ir

vāji atkarīga no parametra P_{32}/P_{30} , kas raksturo atteices, kas pieļauj lidojuma turpināšanu līdz bāzes lidostai, bet ir ļoti jutīga pret parametru P_{31}/P_{30} , kas nosaka atteices, kas pieļauj lidojuma turpināšanu līdz nākamajai plānotajai tehniskajai apkopei (3.2. att.).



3.2. attēls. S_3 stāvokļa varbūtības izmaiņu dinamika dažādu parametra P_{31}/P_{30} vērtību gadījumā nebāzes lidostās, ja $V_B/V = 0,5$.

3.2. Operatīvo faktoru nozīmīguma novērtējums attiecībā uz lidojumu regularitātes laika rādītājiem

Bāzes lidostās lidmašīnu stāvokļu dinamiku nosaka atjaunošanas procesi, un tā raksturo sistēmas reģenerācijas fāzi.

Varbūtība $P(B_2)$, kas atbilst lidmašīnas ielidošanai S_2 stāvoklī, galvenokārt ir atkarīga no aviokompānijas tīkla struktūras (V_B/V) un palielinās, pieaugot nolaišanās reižu skaitam nebāzes lidostās. Pieļaujamo atteici, kas ļauj turpināt lidojumu līdz bāzes lidostai (parametrs P_{32}/P_{30}), ietekme ir mērena un salīdzināma ar tās ietekmi nebāzes lidostās.

Varbūtība $P(B_3)$, kas atbilst ielidošanai S_3 stāvoklī, galvenokārt ir atkarīga no kopējās atteici plūsmas sadalījuma starp stāvokļiem. Analīze liecina, ka parametrs P_{31}/P_{30} dominējoši ietekmē $P(B_3)$, būtiski pārsniedzot P_{32}/P_{30} ietekmi. Atšķirībā no nebāzes lidostām šī ietekme ir vāji atkarīga no tīkla struktūras parametra V_B/V .

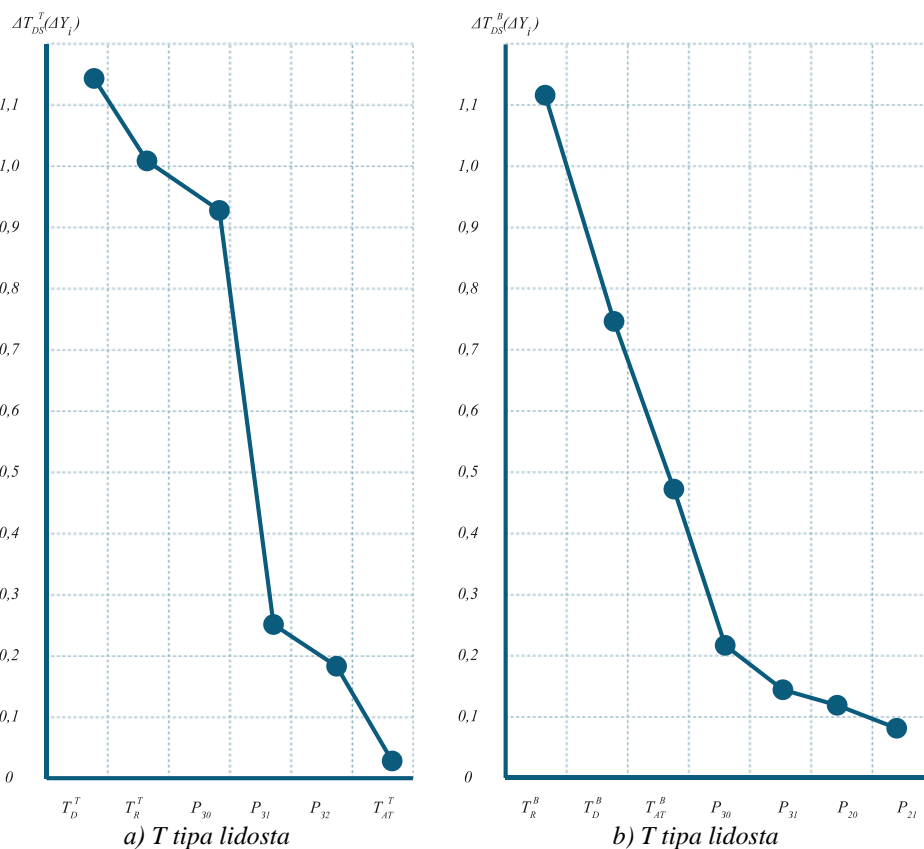
Tādējādi bāzes lidostas darbojas kā atjaunošanas mezgli aviokompānijas tīklā, kur tiek novērsti uzkrātie tehniskie stāvokļi, savukārt galvenie aizkavēšanās veidošanās faktori veidojas nebāzes lidostās.

Pamatojoties uz iegūtajām sakarībām, izlidošanas aizkavēšanās ilgums tiek novērtēts, izmantojot 2. nodaļā izstrādāto matemātisko modeli.

Lai kvantitatīvi novērtētu operatīvo faktoru Y_i ietekmi uz kopējo aizkavēšanās ilgumu T_D , tiek izmantota šāda pieeja:

$$\Delta T_D = T_D(Y_i + \Delta Y_i) - T_D(Y_i).$$

Šī pieeja ļauj ranžēt faktoros pēc to ietekmes uz aizkavēšanās veidošanos (3.3. att.).



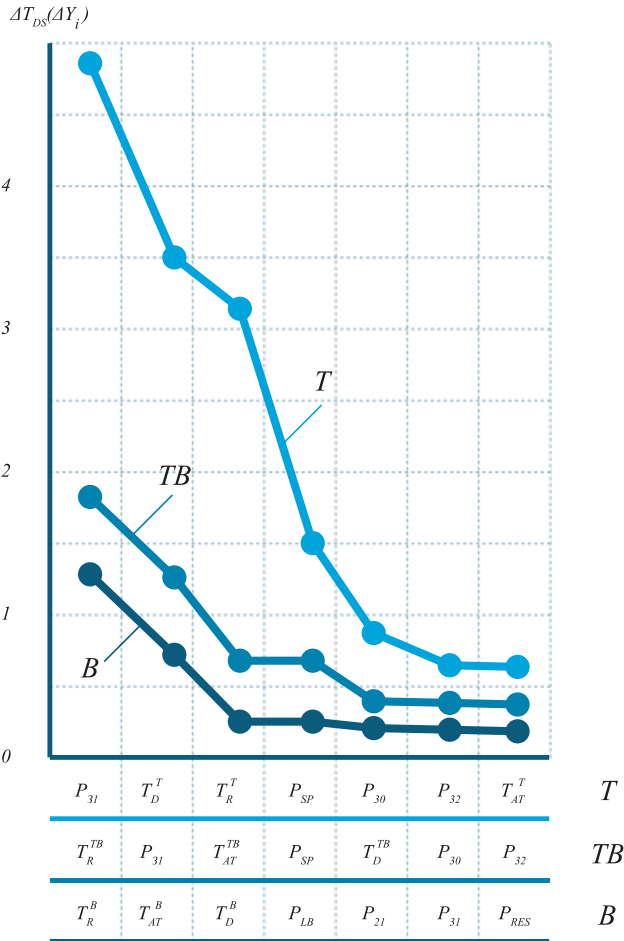
3.3. attēls. Operatīvo faktoru nozīmīguma sadalījuma poligons, ja parametrs $\frac{V_B}{V} = 0,5$.

Analīze liecina, ka operatīvo faktoru ietekme nav vienmērīga un ir atkarīga gan no aviokompānijas tīkla struktūras, gan no parametru sākotnējām vērtībām. Tādēļ to nozīmīguma intuitīvs novērtējums nav pietiekams un ir nepieciešama skaitliskā analīze.

3.3. Ieteikumi lidmašīnu tehniskās apkopes procesu operatīvās vadības pilnveidošanai RAF-AVIA aviokompānijas tīklā

Ieteikumu izstrāde RAF-AVIA aviokompānijai balstās operatīvo faktoru, kas ietekmē lidmašīnu izlidošanas aizkavēšanās ilgumu lidostās aviokompānijas tīklā, ranžēšanā.

Izmantojot RAF-AVIA aviokompānijas reālos operatīvos datus, izstrādātais modelis tika lietots, lai novērtētu operatīvo faktoru nozīmīgumu, kas ietekmē izlidošanas aizkavēšanos (3.4. att.).



3.4. attēls. Operatīvo faktoru nozīmīguma sadalījuma poligons RAF-AVIA aviokompānijas tīklā.

Rezultāti parāda, ka:

transīta lidostām (T) nozīmīgākie faktori ir:

- P_{31}, T_D^T, T_R^T ;

transīta-bāzes lidostām (TB):

- T_R^{TB}, P_{31} ;

bāzes lidostai (B):

- T_R^B, T_{AT}^B .

Parametrs P_{31}/P_{30} , kas raksturo pieļaujamo atteiču pamatotību, ļaujot turpināt lidojumu līdz nākamajai plānotajai tehniskajai apkopei, visvairāk ietekmē aizkavēšanās veidošanos visos lidostu tipos. Šie rezultāti apstiprina izstrādātā modeļa lietojamību reālā aviokompānijas darbībā un demonstrē tā efektivitāti kā lēmumu atbalsta rīku.

Tādējādi lidmašīnu tehniskās apkopes loģistikas pilnveidošana, atjaunošanas un piegādes laika samazināšana, kā arī pamatota MEL politikas izstrāde ir galvenie virzieni lidojumu regularitātes paaugstināšanai.

4. OPERATĪVO LĒMUMU OPTIMIZĀCIJA AOG KRITISKU TEHNISKO DEFEKTU GADĪJUMĀ

Šajā nodaļā aprakstītie promocijas darba gaitā izstrādātie modeļi tiek lietoti praktiska operatīvā uzdevuma risināšanai – tehniskās aizkavēšanās novērtēšanai un optimizācijai, ko izraisa AOG kritiski defekti (S_3 stāvoklis) reālos aviokompānijas darbības apstākļos.

Analīze tiek veikta, izmantojot RAF-AVIA aviokompānijas operatīvos datus. Aplūkots maršruts ietver lidojumu secību starp bāzes (B), tranzīta-bāzes (TB) un tranzīta (T) lidostām:

RIX (Rīga, B) → **TLL** (Tallina, TB) → **WAW** (Varšava, TB) → **FRL** (Forli, T) → **SOF** (Sofija, TB) → **RIX** (Rīga, B).

Modelēšanas pieeja apvieno:

- varbūtisku AOG notikumu iestāšanās novērtējumu maršruta gaitā;
- sagaidāmās aizkavēšanās novērtējumu atkarībā no atjaunošanas iespējām lidostās;
- šo komponentu integrāciju vienotā mērķfunkcijā.

4.1. Izstrādāto modeļu praktiskā lietošana un mērķfunkcijas aprēķins RAF-AVIA aviokompānijas maršrutam

AOG notikuma iestāšanās varbūtība katrā maršruta punktā tiek noteikta, izmantojot lidmašīnas stāvokļu attīstības varbūtisko modeli. Pieaugot veikto lidojumu skaitam, S_3 stāvokļa sasniegšanas varbūtība kumulatīvi palielinās maršruta gaitā:

- $q_1 = 0,06500$ (TLL, TB);
- $q_2 = 0,12578$ (WAW, TB);
- $q_3 = 0,18260$ (FRL, T);
- $q_4 = 0,23573$ (SOF, TB);
- $q_5 = 0,28541$ (RIX, B).

Šīs vērtības parāda, ka AOG notikuma varbūtība pakāpeniski pieaug maršruta gaitā, atspoguļojot tehnisko risku uzkrāšanos.

Sagaidāmā aizkavēšanās, kas saistīta ar atjaunošanu, ir atkarīga no lidostas tipa:

- bāzes lidosta (B) – 1,5 min;
- tranzīta-bāzes (TB) – 153 min;
- tranzīta (T) – 591 min.

Lielākais ieguldījums aizkavēšanās veidošanā rodas tranzīta lidostās ilgā atjaunošanas un loģistikas laika dēļ.

Sagaidāmā aizkavēšanās katrā maršruta punktā tiek noteikta, apvienojot AOG notikuma varbūtību un atbilstošos atjaunošanas apstākļus:

- TLL – 9,95 min;
- WAW – 19,24 min;
- FRL – 107,92 min;
- SOF – 36,07 min;
- RIX – 0,43 min.

Kopējā sagaidāmā tehniskā aizkavēšanās maršrutā tiek definēta kā visu maršruta punktu aizkavēšanās summa:

$$J_0 \approx 2,8933 \text{ h} \approx 173,6 \text{ min.}$$

Šī vērtība raksturo bāzes operatīvo scenāriju un atspoguļo šādu faktoru kopējo ietekmi:

- AOG notikumu varbūtība;
- atjaunošanas laiks;
- rezerves daļu loģistika;
- lidostu infrastruktūras ierobežojumi.

Analīze liecina, ka dominējoši aizkavēšanās veidojas tranzīta lidostā (*FRL*), savukārt arī TB tipa lidostas būtiski ietekmē kopējo aizkavēšanos.

4.2. Vadības pasākumu analīze

Šajā apakšnodaļā optimizācijas uzdevums tiek interpretēts praktisku vadības pasākumu kontekstā, kas ietekmē izstrādātā modeļa parametrus. Katrs vadības pasākums tiek formalizēts kā kontrolēta modeļa parametru izmaiņa – vai nu varbūtiskajā komponentē, kas raksturo līdmašīnas pārejas uz S_3 stāvokli varbūtību, vai laika komponentē, kas raksturo atjaunošanas un loģistikas procesus dažāda tipa lidostās.

Lai mazinātu aizkavēšanos, tiek analizēts operatīvo pasākumu kopums. Katrs pasākums atbilst noteiktai modeļa parametru izmaiņai un tiek novērtēts pēc tā ietekmes uz mērķfunkciju.

1. pasākums. Apgrozījuma laika palielināšana TB tipa lidostās

Šis pasākums ievieš operatīvo rezervi, nemainot atjaunošanas procesus.

Rezultāts:

$$J_1 \approx 167,2 \text{ min.}$$

Efekts ir ierobežots, jo aizkavēšanās pamatcēloņi netiek novērsti.

2. pasākums. Atjaunošanas apstākļu uzlabošana TB tipa lidostās

Ietver:

- rezerves daļu pieejamības palielināšanu;
- atjaunošanas laika samazināšanu.

Rezultāts:

$$J_2 \approx 155,7 \text{ min.}$$

Nodrošina mērenu uzlabojumu, samazinot atjaunošanas ilgumu.

3. pasākums. Inženieris uz borta

Samazina pārejas uz AOG stāvokli varbūtību visā maršrutā.

Rezultāts:

$$J_3 \approx 104,2 \text{ min.}$$

Tas ir visefektīvākais atsevišķais pasākums, jo samazina kritisko notikumu biežumu.

4. pasākums. Paātrināta rezerves daļu piegāde uz T tipa lidostu

Mērķēts uz galveno ierobežojošo posmu (*FRL*).

Rezultāts:

$$J_4 \approx 127,6 \text{ min.}$$

Būtiski samazina aizkavēšanos kritiskākajā maršruta posmā.

Pasākumu kombinācija un optimālā kombinētā stratēģija

Tā kā dažādi pasākumi ietekmē atšķirīgus aizkavēšanās veidošanās komponentus, to kombinācija rada kumulatīvu efektu.

Visefektīvākā stratēģija ietver:

- *AOG* varbūtības samazināšanu (3. pasākums);
- atjaunošanas uzlabošanu TB tipa lidostās (2. pasākums);
- loģistikas laika samazināšanu T tipa lidostā (4. pasākums).

Rezultāts:

$$J^* \approx 1,0967 \text{ h} \approx 65,8 \text{ min.}$$

Tas atbilst aptuveni 62 % samazinājumam, salīdzinot ar bāzes scenāriju.

4.3. Galasecinājumi, balstoties gadījuma analīzē

Veiktā analīze parāda, ka:

- tehniskās aizkavēšanās veidojas varbūtisko (*AOG* iestāšanās) un laika (atjaunošanas un loģistikas) faktoru mijiedarbības rezultātā;
- aizkavēšanās galvenokārt veidojas tranzīta lidostās ar ierobežotām atjaunošanas iespējām;
- visefektīvākais atsevišķais pasākums ir *AOG* varbūtības samazināšana (inženieris uz borta);
- maksimālais efekts tiek sasniegts, izmantojot kombinētas vadības stratēģijas, kas ietekmē gan varbūtiskos, gan atjaunošanas procesus.

Izstrādātā pieeja nodrošina kvantitatīvu ietvaru operatīvo lēmumu novērtēšanai un ļauj izvēlēties optimālās stratēģijas lidojumu regularitātes paaugstināšanai reālos aviokompānijas darbības apstākļos.

PĒTĪJUMA REZULTĀTI

1. Veikta visaptveroša lidojumu regularitātes problēmas pašreizējā stāvokļa analīze civilajā aviācijā un tās ietekmes novērtējums uz aviokompānijas maršrutu tīkla darbību.
2. Analizētas lidmašīnu atteices un tehniskie bojājumi ekspluatācijas laikā, novērtētas atjaunošanas iespējas aviokompānijas tīklā un noteikti operatīvie faktori, kas ietekmē tehniskās aizkavēšanās varbūtību.
3. Izstrādāti matemātiskie modeļi lidmašīnu stāvokļa novērtēšanai un atjaunošanas procesiem atbilstoši *MEL* prasībām aviokompānijas tīkla lidostās, lai samazinātu gan izlidošanas aizkavēšanās varbūtību, gan tās ilgumu.
4. Izstrādāts lietojumprogrammatūras rīks *FlightSync* piedāvāto varbūtisko matemātisko modeļu ieviešanai lidmašīnu tehniskās apkopes operatīvajā vadībā.
5. Lietojumprogrammatūras rīks *FlightSync* testēts un validēts, izmantojot RAF-AVIA aviokompānijas operatīvos un statistiskos datus.

SECINĀJUMI

Promocijas darbā risināta lidojumu regularitātes paaugstināšanas problēma, optimizējot lidmašīnu tehniskās apkopes operatīvo vadību aviokompānijas maršrutu tīklā.

Pētījuma galvenie rezultāti

1. Izstrādāts lidmašīnu tehnisko stāvokļu attīstības modelis, kas balstīts diskrētos operatīvajos stāvokļos un varbūtiskās pārejās starp tiem. Modelis ņem vērā degradāciju lidojuma laikā, atjaunošanas procesus uz zemes un operatīvos ierobežojumus, kas saistīti ar *MEL* piemērošanu.
2. Izveidots tehniskās aizkavēšanās veidošanās modelis aviokompānijas maršrutu tīklā, kas integrē:
 - defektu rašanās varbūtību;
 - atjaunošanas laiku;
 - rezerves daļu pieejamību;
 - lidostas tipu un tās tehniskās iespējas.
3. Veikta parametru analīze, lai novērtētu galveno operatīvo faktoru ietekmi uz sagaidāmo tehnisko aizkavēšanos. Identificēti nozīmīgākie parametri, kas ietekmē lidojumu regularitāti.
4. Izstrādāta mērķfunkcija operatīvo lēmumu kvantitatīvai novērtēšanai *AOG* kritisku defektu apstākļos, kas ļauj formāli salīdzināt alternatīvas operatīvās stratēģijas, nebalstoties tikai kvalitatīvā novērtējumā.
5. Izstrādātā optimizācijas pieeja izmantota RAF-AVIA aviokompānijas reālai maršrutu konfigurācijai. Noteikta bāzes scenārija sagaidāmā kopējā tehniskā aizkavēšanās un veikts alternatīvo vadības pasākumu formāls novērtējums. Konstatēts, ka vislielākais efekts tiek sasniegts nevis ar atsevišķiem pasākumiem, bet ar koordinētu pasākumu kombināciju, kas ietekmē gan varbūtiskos, gan laika parametrus, nodrošinot sagaidāmās tehniskās aizkavēšanās samazinājumu par vairāk nekā 60 %, salīdzinot ar bāzes scenāriju.
6. Izstrādātie modeļi ir realizēti lietojumprogrammatūras rīkā *FlightSync*, kas paredzēts kumulatīvu tehnisko aizkavēšanās gadījumu aprēķinam un alternatīvo vadības scenāriju analīzei. Rīks ir testēts, izmantojot RAF-AVIA operatīvos datus, un to var izmantot kā lēmumu atbalsta instrumentu aviokompāniju inženiertehniskajām un operatīvās vadības struktūrvienībām.

Pētījuma rezultāti apliecina, ka lidojumu regularitātes paaugstināšana ir jāaplūko kā savstarpēji saistītu operatīvo parametru integrētas vadības uzdevums. Piedāvātā pieeja nodrošina kvantitatīvu pamatu optimālo stratēģiju izvēlei tehnisko defektu apstākļos un ir praktiski lietojama reālajā aviokompāniju darbībā.



Anvar Zabirov dzimis 1991. gadā Taškentā, Uzbekistānā. Rīgas Tehniskajā universitātē ieguvis bakalaura grādu (2016) un maģistra grādu (2018) aviācijas transportā. Kopš 2017. gada profesionāli darbojas aviācijas nozarē gaisa kuģu tehniskās ekspluatācijas un tehniskās apkopes vadības jomā.

Zinātniskā un profesionālā darbība ir saistīta ar gaisa kuģu tehnisko ekspluatāciju, tehniskās apkopes vadību un lidojumu regularitātes uzlabošanu. Zinātnisko interešu lokā ietilpst gaisa kuģu tehniskās ekspluatācijas parametru optimizācija, gaisa kuģu tehniskā uzticamība, lidojumu kavējumu analīze un operatīvās lēmumu pieņemšanas risinājumu izstrāde aviokompāniju tehniskās apkopes vadībai.