



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Artūrs Suharevs

GAISA KUĢA BORTA KONTROLES IERĪČU PĒTNIECĪBA UN OPTIMIZĀCIJA PACELŠANĀS UN NOSĒŠANĀS ETAPOS

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte
Aeronautikas institūts

Artūrs Suharevs

Doktora studiju programmas “Transports” doktorants

**GAISA KUĢA BORTA KONTROLES IERĪČU
PĒTNIECĪBA UN OPTIMIZĀCIJA PACELŠANĀS
UN NOSĒŠANĀS ETAPOS**

Promocijas darba kopsavilkums

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

RTU Izdevniecība
Rīga 2022

Suharevs A. Gaisa kuģa borta kontroles ierīču pētniecība un optimizācija pacelšanās un nosēšanās etapos. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. – 46 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-22” 2022. gada 18. janvāra lēmumu, protokols Nr. 04030-9.16/1.

<https://doi.org/10.7250/9789934227691>
ISBN 978-9934-22-769-1 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 20. maijā plkst. 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6 B, 204. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Pāvels Gavrilovs,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* *Krzysztof Szafran*,
Lukasiewicz Instytut Lotnictwa, Polija

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* *Rafal Chatys*,
Kelces Tehniskā universitāte, Polija

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.

Artūrs Suharevs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 87 attēli, 11 tabulu, viens pielikums, kopā 99 lappuses, ieskaitot pielikumu. Literatūras sarakstā ir 49 nosaukumi.

SATURS

DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI.....	5
IEVADS	6
Tēmas aktualitāte.....	6
1. PACELŠANĀS UN NOSĒŠANĀS DINAMIKA UN KINEMĀTIKA.....	13
1.1. Ieskrējiena garums.....	13
1.2. Bremzēšanas garums	14
1.3. Gaisa kuģa dinamiskā modeļa apraksts.....	15
1.4. Lidmašīnas kustība pa skrejceļu nosēšanās laikā. Matemātiskais modelis.....	18
2. PROBLĒMAS ANALĪZE	22
2.1. Pacelšanās un nolaišanās josla	23
3. LIDAPARĀTA BREMZĒŠANAS IESPĒJAS.....	25
4. SKAITĪŠANAS IERĪCES IZSTRĀDĀŠANA.....	26
4.1. Analītisko sakarību grafiku izveidošana	26
4.2. Matemātiskā modeļa izmantošana	27
4.3. Algoritms.....	30
5. PROTOTIPA LIETOŠANA, IEGŪTIE DATI, EKSPERIMENTS	34
5.1. Pirmais eksperiments. Izanalizēt reālu lidojumu, noskaidrojot iespējamību prognozēt skrejceļa pietiekamību līdz PNJ beigām	34
5.2. Otrais eksperiments. Promocijas darba galvenā mērķa iespējamības analīze.....	40
GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI.....	45

DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI

GK – gaisa kuģis
PNJ – pacelšanās-nosēšanās josla
PNS – pavadoņu navigācijas sistēmas
LEN – lidojumu ekspluatācijas norādījumi
VJL – virs jūras līmeņa
TRD – turbo reaktīvais dzinējs
TRB – tuvas radiobākas
ABS – *Anti-lock braking system* (pretslīdēšanas automātika)
 V_{mcg} – minimālais vadāmības ātrums uz zemes
 V_{mca} – minimālais vadāmības ātrums gaisā (t. s. lidmašīnas ātrums, atraujoties no zemes)
 V_1 – lēmuma pieņemšanas ātrums (kritiskais dzinēja noslodzes ātrums)
 V_R – atrašanās ātrums $L \geq W$ (dod iespēju droši pacelt priekšgala riteņus no virsmas)
 V_{MU} – minimālais saķeres ātrums, saskaroties ar zemi
 V_{LOF} – minimālais atrašanās ātrums
 V_2 – pacelšanās pacēluma leņķa drošības ātrums
MKM – mazāko kvadrātu metode
KGS - kursēšanas – glisādes sistēmā
INS – inerciālā navigācijas sistēma
ILS – *Instrumental Landing System* (Instrumentālā nosēšanās sistēma)
FAR – *Federal Aviation Regulation* (Federālie aviācijas noteikumi)
PSEU – *Proximity Switch Electronic Unit* (Tuvuma slēdža elektroniskā vienība)
FMS – *Flight Management System* (Lidojumu pārvaldības sistēma)
GPS – *Global Positioning System* (Globālā pozicionēšanas sistēma)
GNSS – *Global Navigation Satellite System* (Globālā navigācijas satelītu sistēma)

IEVADS

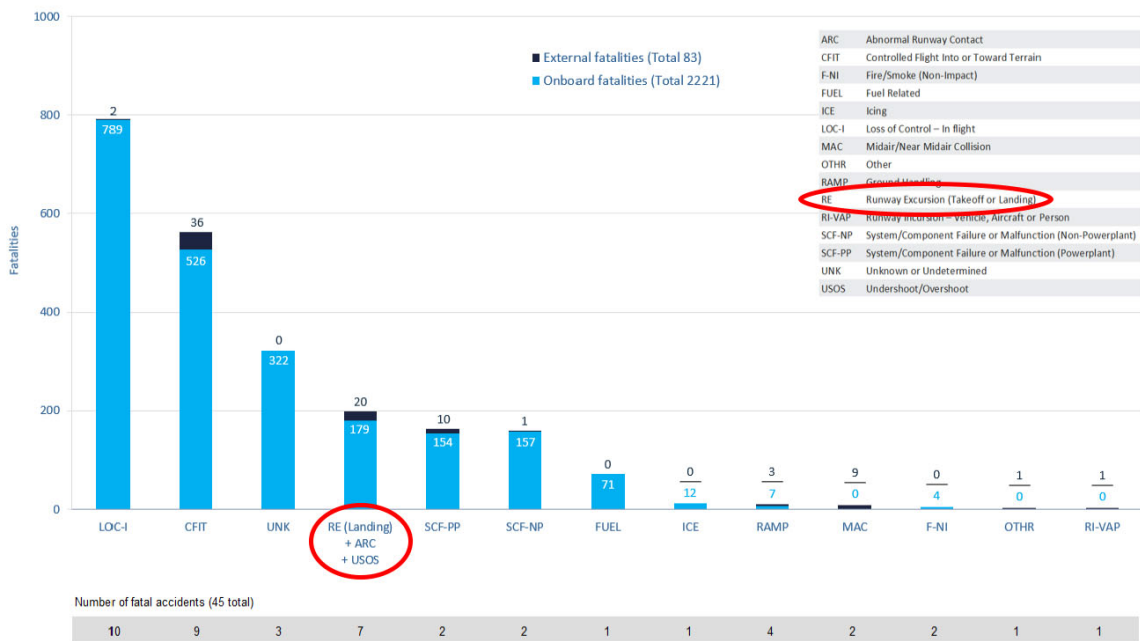
Tēmas aktualitāte

Lidmašīnas pacelšanās un nolaišanās ir lidojuma sākuma un beigu etaps, kas prasa pilota maksimālu uzmanību un precizitāti. Statistiski tie ir visbīstamākie lidojuma etapi. Pacelšanās procesā lidaparāts paātrinās, atraujas no zemes un uzņem noteikto lidošanas augstumu. Nolaišanās etaps ir laiks, kad lidmašīna, sākot no 15 m augstuma, samazina kustības ātrumu, līdz tā pilnīgi apstājas, piezemējoties un veicot manevrus pa ieskrējiena-nolaišanās skrejceļu (PNJ). Nolaišanās ir visgrūtākais lidojuma etaps, kas nosaka augstas prasības un pilotāžas iemaņas pilotiem. Lidmašīnas nolaišanās procesu ievada tādi manevri kā tuvošanās lidostai un nolaišanās iesākšana. Nosēšanās procesā ir vairāki etapi: augstuma samazināšana; tā izlīdzināšana izturēšana; piezemēšanās un noskrējieni. Lidmašīnas pacelšanās parasti ir iedalīta divos pamatetapos: pacelšanās un sākuma augstuma uzņemšana. Šie etapi savukārt iedalās vairākos citos etapos.

Lidmašīnu industrijas progress mūsdienās ir nodrošinājis to, ka visus šos etapus var veikt bez pilota līdzdalības, t. i., izmantojot automatiskās pilotēšanas sistēmu. Civilajā aviācijā bezpilota sistēmas joprojām tiek izmantotas piesardzīgi, galvenokārt horizontālā lidojumā un ar apkalpes kontroli. Tomēr nolaišanās un pacelšanās procesu galvenokārt veic pieredzējuši piloti. Ņemot vērā visu nolaišanās laikā veicamo darbību sarežģītību un bīstamību, nolaišanās etaps tiek uzskatīts par statistiski bīstamāko lidojuma etapu. 1.1. un 1.2. attēlā apkopota statistika par visiem incidentiem no 2009. līdz 2018. gada pa kategorijām. Veidojot attēlus, izmantoti kompānijas “Boeing” statistikas dati, kas iekļauti prezentācijā “*Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations | 1959–2018 50th Edition*”, http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum.pdf.

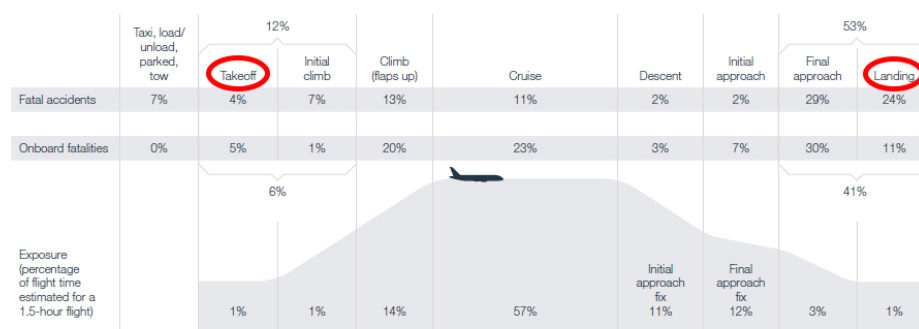
Fatalities by CICTT Aviation Occurrence Categories

Fatal Accidents | Worldwide Commercial Jet Fleet | 2010 through 2019



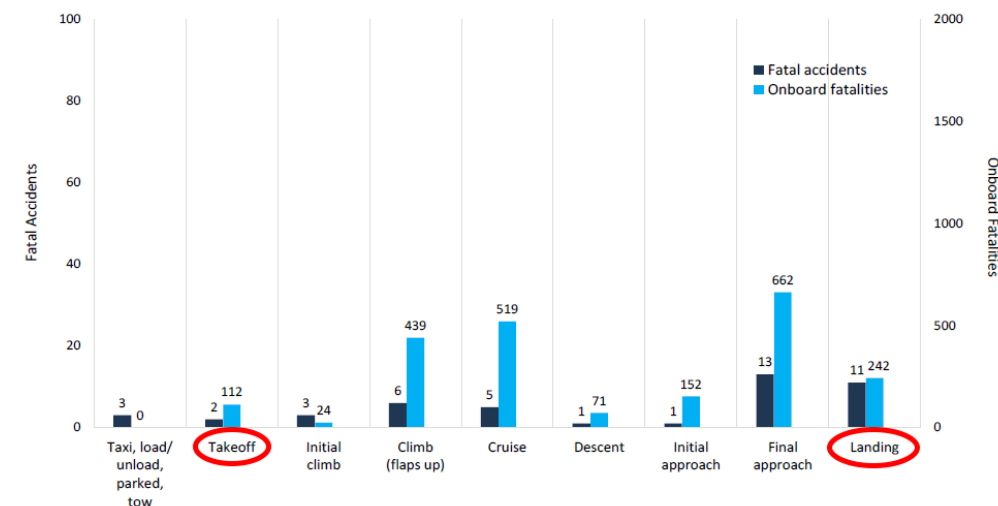
1.1. att. Aviokatastrofu, kas notikušas no 2010. līdz 2019. gadam, iedalījums.

Percentage of fatal accidents and onboard fatalities | 2010 through 2019



Note: Percentages may not sum to 100% because of numerical rounding.

Distribution of fatal accidents and onboard fatalities | 2010 through 2019



1.2. att. Negadījumu iedalījums pa lidojuma posmam.

Acīmredzams, ka lielāka daļa incidentu un katastrofu ir tieši saistīta ar pacelšanās un – it īpaši – nosēšanās etapiem.

Orientēties šādā statistikā ir diezgan grūti, jo nav iespējams saprast katastrofas būtību. Lai sāktu risināt šo problēmu, vispirms apkopota informācija par vairākiem incidentiem, izpētīti incidentu un katastrofu cēloņi, kā arī pārbaudīta informācija par to, vai šis jautājums joprojām ir aktuāls, jo, iespējams, problēmas, kas izraisīja incidentus pirms 10 gadiem, mūsdienās ir atrisinātas. Otrs apgrūtinājums ir saistīts ar to, ka visiem incidentiem nav pabeigts izmeklēšanas process.

Šiem mērķiem tika izmantota mājaslapā <http://avherald.com/> publicētā informācija. Pēc tās var izsekot gandrīz pēc visiem incidentiem, kas notiek pasaulē, uzreiz pēc notikuma. 1.1. tabulā apkopotas ziņas par pēdējiem negadījumiem, kas saistīti ar PNJ robežas šķērsošanu.

Pēdējie negadījumi, kas saistīti ar PNJ robežas šķērsošanu

Datums	Statuss	GK/ reģ. nr.	Lid. nr.	Izmantotais ziņojums, no kura ņemti negadījuma dati
04.07.2020.	Incidents	<i>Boeing 747-400, LX-UCV</i>	CV-7536	<i>“Hong Kong, rejected takeoff due to engine problem”</i>
14.06.2020.	Incidents	<i>China Airlines A333, CI-202</i>	B-18302	<i>“Taipei, all primary computers, reversers and autobrakes failed on touchdown, affecting the stopping distance of the aircraft. The crew applied maximum manual braking and managed to stop the aircraft 10 meters/33 feet ahead of the runway end (runway length 2600 meters/8530 feet)”.</i>
01.07.2020.	Incidents	<i>Garuda A333 PK-GHD</i>	GA-613	<i>“Makassar on, runway excursion during backtracking for departure”</i>
14.06.2020.	Incidents	<i>Vietjet A321</i>	VJ-322	<i>“Ho Chi Minh City, runway excursion on landing</i>
03.06.2020.	Incidents	<i>Fedex MD11 N583FE</i>	FX-5033	<i>landed on Mumbai's runway 14 at 12:14L (06:44Z) but overran the end of the runway by about 9 meters/30 feet”.</i>
22.05.2020.	Incidents	<i>West Atlantic ATP SE-MAO</i>	PT-425	<i>“Birmingham on, temporary runway excursion on second approach”</i>
06.01.2020.	Incidents	<i>Thai Lion B739 HS-LTL</i>	SL-180	<i>“Hanoi on, runway incursion”</i>
18.03.2020.	Incidents	<i>Vietnam A321 VN-A392</i>	VN-920	<i>“Ho Chi Minh City, rejected takeoff due to uncontained engine failure sets grass alight”</i>
07.06.2020.	Incidents	<i>Canada A320 C-FMSX</i>	AC-329	<i>“Edmonton, autobrakes failure”</i>
05.06.2020.	Incidents	<i>Kalitta B734 N733CK</i>	KI-822	<i>“Rochester, veered off runway on rejected takeoff”</i>
05.06.2020.	Incidents	<i>South Sudan Supreme AN26 S9-TLW</i>	EK-26710	<i>“Renk, runway excursion on landing”</i>
27.05.2020.	Incidents	<i>Swift AT72 EC-INV</i>	WT-6992	<i>“Cologne, rejected takeoff due to being aligned with runway edge lights”</i>
27.06.2019.	Incidents	<i>Angara AN24 RA-47366</i>	2G-200	<i>“Nizhneangarsk, engine failure, veered off runway and collided with building”</i>

Acīmredzams, ka problēma joprojām ir ļoti aktuāla. Tikai 2020. gada jūnijā vien notika vismaz seši negadījumi (ne visi incidenti tiek atspoguļoti iepriekšminētajā portālā).

Promocijas darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt sistēmu un metodoloģiju, kas varētu automātiskā režīmā veikt lidaparāta ieskriešanos un bremzēšanu pēc nolaišanās uz skrejceļa tā, lai maksimāli ekonomiski izdevīgi un droši vai vismaz palīdzēt pilotiem noteikt atlikušā bremzēšanas un ieskriešanās ceļa garumu līdz NPJ beigām, ņemot vērā sistēmu, ar kurām aprīkots gaisa kuģis, izejas datus, kā arī ievērojot citus faktoros: laika apstākļus; bremžu un apriepojuma stāvokli; dažādus koeficientus; paātrinājuma un palēninājuma statistiku; lidaparāta aerodinamiskās īpatnības u. tml. Darbā piedāvāts arī tehniskais risinājums (portatīva ierīce), kas dos iespēju izmainīt nosēšanās/pacelšanās metodoloģiju, lai sasniegtu iepriekš minētos mērķus, kā arī varētu palīdzēt lidojuma kvalitātes analizē un negadījumu izmeklēšanā, kas saistīti ar tādiem lidaparātiem, kuros nav moderna lidojumu un navigācijas aprīkojuma.

Uzdevumi

Lai sasniegtu šo mērķi, darbā jārisina vairāki galvenie uzdevumi:

- 1) izvērtēt problēmas aktualitāti un incidentu cēloņus;
- 2) izpētīt esošo metodoloģiju (GK dokumentāciju un pilotu/aviokompānijas procedūras) nosēšanās un pacelšanās etapos;
- 3) izpētīt mūsdienu tehniskos risinājumus un iespējas atrisināt šo problēmu ar jau izveidoto aprīkojumu (GK tehniskais aprīkojums un programmatūras nodrošinājums tajā un ārpus tā);
- 4) modelēt un optimizēt GK zemes ceļa garuma «sistēmu» pacelšanās un nolaišanās etapos;
- 5) izstrādāt portatīvo ierīci (prototipu) un algoritmu, lai:
 - prognozētu un novērstu nelaimes gadījumus;
 - efektīvi un racionāli izmantotu GK sistēmas;
 - atvieglotu apkalpes darbu;
 - palielinātu lidojuma drošību;
 - analizētu lidojumu kvalitāti un palīdzētu veikt lidojumu negadījumu izmeklēšanu vieglajos lidaparātos un lidmašīnās, kas nav aprīkotas ar modernu lidojumu un navigācijas aprīkojumu;
- 6) veikt eksperimentus, pierādīt idejas efektivitāti.

Promocijas darbā veikta lidaparāta bremzēšanas un ieskriešanās ceļa analīze, kā arī pamatota nepieciešamība izstrādāt automatizētu aparātu, kas būtu spējīgs kontrolēt lidmašīnas bremzēšanas un ieskriešanās ceļa garumu pēc piezemēšanās un pacelšanās laikā.

Aparātam jābūt spējīgam aprēķināt nepieciešamos parametrus katrā laika momentā, lai racionāli izmantotu GK sistēmas, pagarinātu bremžu un apriepojuma nolietojuma termiņu, kā arī nodrošinātu GK pasažieru drošību un dotu iespēju izslēgt pilotu kļūdas.

Izpētes objekts – GK paātrinājuma/bremzēšanas metodoloģija un tehniskās iespējas.

Izpētes priekšmets – jebkāds GK tips (*Experimental/General/Civil aviation*).

Izpētes vieta – jebkāds lidlauks.

Pētījumā izmantotas šādas zinātniskās metodes:

- matemātiskā modelēšana;
- algoritma modelēšana (*Simulink*);
- varbūtības teorija;
- statistisko datu apstrāde;
- eksperimenta veikšana.

Zinātniskā novitāte

GK bremzēšanas/paātrinājuma modeļa izstrāde un tās optimizācija.

Jauna metodoloģija GK bremzēšanas/paātrinājuma etapos, izveidojot jaunu aprīkojumu (algoritms, kas balstīts visprecīzākajos sensoru datos, no ar kuriem aprīkoti gandrīz visi mūsdienu GK tipi).

Praktiskā nozīme

- Incidentu un nelaimes gadījumu skaitu samazināšana GK nolaišanās/pacelšanās gaitā.
- Apkalpes darba atvieglošana.
- Lidojuma drošības palielināšana.
- GK resursu (komponentu stāvoklis) pagarināšana.
- Aviokompānijas resursu ekonomija.
- Vides piesārņojumu mazināšana.
- Lidojumu kvalitātes analīze un optimizācija.

Aizstāvamās tēzes

- Lidojumu drošības palielināšanas modelis, balstoties jaunajā metodoloģijā un tehniskajā risinājumā.
- Jaunas paātrinājuma/bremzēšanas metodoloģijas efektivitātes un drošības pierādījums.
- Tehniskais risinājums jaunas metodoloģijas realizācijai.
- Metodoloģijas ekonomiskā un ekoloģiskā efektivitāte.

Pētījuma rezultātu precizitāte

Visi iegūtie pētījumu rezultāti balstīti autora praktiskajos aprēķinos un izmēģinājumos.

Autora izstrādātie matemātiskie modeļi, metodes, algoritmi, diagrammas un idejas efektivitāte ir praksē pārbaudītas, un izvirzīta jauna metodika pacelšanās/nosēšanās etapiem. Normatīvā dokumentācija neatļauj lietot/testēt šo metodi un aprīkojumu, izmantojot komerciālos GK, ir nepieciešami vairāki nākamie soļi, lai sertificētu paņēmienu un tehnoloģisko risinājumu, piesaistot *Part-21* organizāciju, un speciālas GK tipa ražotāja atļaujas.

Darba aprobācija

Darbs prezentēts divās starptautiskajās zinātniskajās konferencēs Lietuvā un Latvijā, septiņās publikācijās, trīs zinātniskajos žurnālos.

Starptautiskās zinātniskās konferences

- 1) Kaunas University of Technology, 24th International Scientific Conference TRANSPORT MEANS 2020, PALANGA, 30 September–2 October 2020 “Safety Management System development for airline”.
- 2) The 5th International Scientific and Practical Conference TRANSPORT. EDUCATION. LOGISTICS AND ENGINEERING – 2018.
 1. “DEVELOPMENT OF METHODOLOGY FOR SAFETY RISK – BASED AIRLINE” A. Bitins, L. Mikelson, A. Suharevs.
 2. “АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ВЛИЯЮЩИХ НА ДЛИНУ ПРОБЕГА САМОЛЕТА ПО ВПП” A. Suharevs.
- 3) Riga Technical University 56th Scientific International Conference, Riga (Latvia) 20.05.2015, “Gaisa kuģa borta kontroles ierīču pētniecība un optimizācija pacelšanās un nosēšanās etapos”, A. Suharevs.
- 4) Riga Technical University 57th Scientific International Conference, Riga (Latvia) 17.10.2016, “Gaisakuģa pacelšanās un nolaišanās zemes ceļa garuma skaitļošanas sistēma”, A. Suharevs.

- 5) Riga Technical University 60th Scientific International Conference, Riga (Latvia) 16.10.2019, "Mikrokontrolieru izmantošana aviācijas nozarē", A. Suharevs.
- 6) Riga Technical University, 12.11.2015. Zinātniskais seminārs "Gaisa kuģa borta kontroles ierīču pētniecība un optimizācija pacelšanās un nosēšanās etapos".
- 7) Riga Technical University, 09.02.2017. Zinātniskais seminārs, "Pacelšanās-nolaišanās skrejceļa skaitīšanas ierīces strukturālā shēma".

Publikācijas

- 1) Arthur Suharev, Vladimir Shestakov, Leonid Vinogradov. "Estimation of evacuation time of passengers in aircraft accidents with fire in airfield areas". AVIATION ISSN: 1648-7788 / eISSN: 1822-4180. Article in Press. <https://doi.org/10.3846/aviation.2020.12653>.
- 2) Arthur Suharev, Vladimir Shestakov, and Konrad Stefanski. "Analysis of the affecting factors on aircraft takeoff and landing ground path length". AIP Conference Proceedings 2077, 020056 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5091917>. Published Online: 21 February 2019.
- 3) A. Bitins, L. Mikelson, A. Suharevs. "Development of methodology for safety risk – based airline". The 5th International Scientific and Practical Conference. Transport. Education. Logistics And Engineering – 2018. Proceedings. ISBN 978-9984-9996-8-5.
- 4) A. Suharevs. "Анализ факторов влияющих на длину пробега самолета по ВПП". The 5th International Scientific and Practical Conference. Transport. Education. Logistics And Engineering – 2018. Proceedings. ISBN 978-9984-9996-8-5.
- 5) Artūrs Suharevs, Pjotrs Trifonovs-Bogdanovs, Vladimirs Šestakovs, Konstantin Mamay. "Dynamic Model of Aircraft Landing". Riga Technical University. Transport and Aerospace Engineering. ISSN 2255-9876 (online). ISSN 2255-968X (print). December 2016, vol. 3, pp. 38–43. doi: 10.1515/tae-2016-0005. <https://www.degruyter.com/view/j/tae>.
- 6) A. Suharevs. "Gaisakuģa zemes ceļa garuma skaitļošanas sistēma pacelšanās un nolaišanās brīdī". The 4th International Scientific and Practical Conference. Transport Systems, Logistics And Engineering – 2016. Proceedings. ISBN 978-9984-9996-6-1.
- 7) Arthur Suharev, Jevgenij Tereshchenko, Vladimir Shestakov, Zarif Zabirov. "Identification of abnormal situations in flight". AVIATION. (Pieņemts, bet nav publicēts 01.11.2021.).

Alternatīvu risinājumu kritiskā analīze

Patlaban ir zināmi divi promocijas darbi, kuros risinātas šīs problēmas, ko nosacīti var saukt par alternatīviem risinājumiem. Pirmais un galvenais risinājums – maksimāli palielināt skrejceļa garumu tā, lai tas būtu ekonomiski lietderīgi un maksimāli pietiekami, lai apstātos pacelšanās pārtraukšanas gadījumos jeb bremzēšanas etapā. Papildus tam dažiem operatoriem pieejama speciāla programatūra, kas var aprēķināt nepieciešamo skrejceļa garumu, pazeminot dzinēja jaudu par noteiktu procentu. Šādas alternatīvas trūkums ir tāds, ka aprēķins ir statisks (noteikts pirms uzlidošanas un nemainās laika gaitā), kas jebkurā gadījumā prasa lielāku skrejceļa rezervi nekā piedāvātais risinājums un galvenokārt ir lietojams diezgan garos skrejceļos (> 3 km). Otrais trūkums – krietni palielinās lidostas būvēšanas un ekspluatācijas izmaksas, kas ierobežo iespējamību atrast vietu, kur to uzbūvēt (it īpaši galvaspilsētās). Trešais trūkums – pilotam patstāvīgi (vizuāli) jālieto bremzēšanas spēks, lai izdarītu to droši un sabremzētu nepieciešamajā punktā (jeb pēcbremzēšanai jālieto dzinēju spēks, lai piebrauktu pie nobraukšanas joslas, kā tas visbiežāk arī notiek pašlaik. Tas savukārt rada lielāku GK resursu izmantošanu (bremzes, degviela, dzinēja ilgmūžība u. tml.).

Otra alternatīva – *ILS Cat IIIc* sistēma. Šādu variantu gan nevar pilnvērtīgi nosaukt par alternatīvu metodi, jo instrumentāla nosēdināšana pēc *Cat III* noteikumiem vispār neņem vērā GK atrašanās vietu uz skrejceļa un tā garumu (izņemot to, ka nosēšanās etapā palīdz nosēsties noteiktā punktā skrejceļa sākumā). Ja lidlauks un lidmašīna aprīkota ar attiecīgu

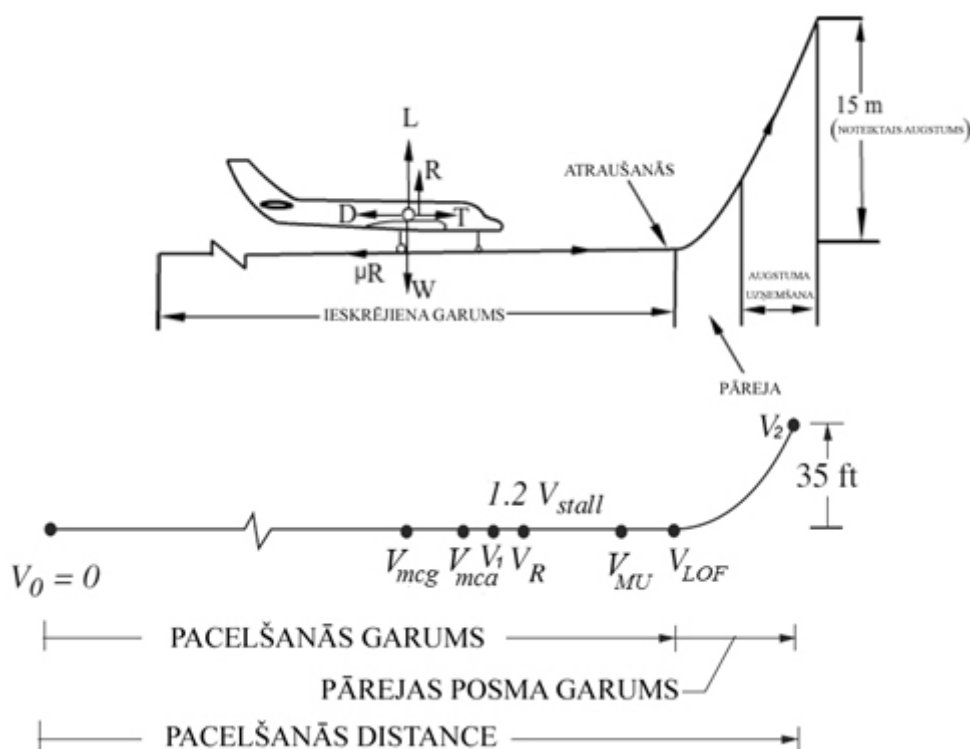
aprīkojumu (un tie ir sertificēti), tad sistēma ļauj nosēsties pilnīgi automātiskā režīmā (*Autoland* funkcija). Pacelšanās etapā sistēma nepiedalās. Darbā minēta teorētiska iespēja realizēt šo funkciju arī ar *GPS* uztvērēja palīdzību, kas iebūvēts darbā izstrādātajā prototipā, tomēr galvenā promocijas darba ideja ir optimizēt pacelšanās un nosēšanās etapus un kontrolēt pacelšanās/bremzēšanas skrejceļa garumu, nevis izveidot alternatīvu jau eksistējošam metodēm un sistēmām. Jāpiemin, ka lidmašīnās gandrīz vienmēr ir arī automātiskā bremsēšanas sistēma (visbiežāk ar trīs iespējamiem režīmiem – *Low/Mid/High*), taču abos iepriekš minētajos gadījumos sistēmas lieto noteiktu bremsēšanas spēku, neņemot vērā laika apstākļus, GK stāvokli un iespējamību racionālāk izmantot lidmašīnas resursus, ko piedāvā promocijas darba gaitā izstrādātā metodoloģija. Turklāt *ILS* sistēmas, kas paredzētas *Cat III* kategorijas nosēšanās procesam, ir neievērojami sarežģītākas un dārgākas, salīdzinot ar darbā piedāvāto metodi.

1. PACELŠANĀS UN NOSĒŠANĀS DINAMIKA UN KINEMĀTIKA

1.1. Ieskrējiena garums

Par ieskrējiena garumu sauc ceļu, ko veic lidmašīna no starta līdz atrašanās punktam no zemes. Ieskrējiena garums ir viens no galvenajiem lidmašīnu raksturojošiem lielumiem, pēc kā tiek noteikts nepieciešamais pacelšanās un nosēšanās skrejceļa garums.

Pacelšanās attālums (S , $TOFL$) ietver ieskrējiena distanci (S_g , $STOG$ – *Ground Run*), kuras laikā tiek sasniegts atrašanās ātrums (V_{LOF}), un pacelšanos pirmā gaisa segmentā (S_a , $STOA$ – *Airborne distance*), kuras laikā tiek sasniegts droša augstuma uzņemšanas ātrums (V_2). Minimālais normatīvajos dokumentos noteiktais augstums (parasti $h = 11$ m (35ft) – *CS-25* (*Certification Specifications for Large Aeroplanes*) vai 15 m – *CS-23*, atkarīgs no lidmašīnas tipa).



1.5. att. Svarīgākie pacelšanās momenti un garumi.

- V_{mcg} – minimālais vadāmības ātrums uz zemes;
- V_{mca} – minimālais vadāmības ātrums gaisā (t. s. atrašanās ātrums, atraujoties no zemes);
- V_1 – lēmuma pieņemšanas ātrums (kritiskais dzinēja noslodzes ātrums);
- V_R – atrašanās ātrums $L \geq W$ (dod iespēju droši pacelt priekšgala riteņus nozemes);
- V_{MU} – minimālais saķeres ātrums, saskaroties zemei;
- V_{LOF} – minimālais atrašanās ātrums;
- V_2 – pacelšanās pacēluma leņķa drošības ātrums.

Svarīgākie no tiem ir: lēmuma pieņemšanas ātrums – V_1 (iespējams gan turpināt, gan pārtraukt pacelšanos); atrašanās ātrums – V_{LOF} jeb V_{atr} (iespējams droši atrauties no skrejceļa); pacelšanās ātrums – V_2 (iespējams droši tupināt sākotnējo augstuma uzņemšanu).

Apskatot lidmašīnas ieskrējienā kā vienmērīgi paātrinātu kustību ar paātrinājumu t_{vid} , var secināt (pie bezvēja), ka vidējais ieskrējiena laiks ir:

$$t_{vid} = \frac{v_{atr}}{i_{vid}}, \quad (1.1.)$$

kur vidējais ātrums ir:

$$v_{vid} = \frac{v_{atr}}{2}. \quad (1.2.)$$

Ņemot vērā ieskrēšanās garumu L_{ieskr} :

$$L_{ieskr} = v_{vid} t, \quad (1.3.)$$

tiek iegūts:

$$L_{ieskr} = \frac{v_{atr}^2}{2i_{vid}} \quad (1.4.)$$

Kā izriet no 1.4. formulas, ieskrējiena garums galvenokārt ir atkarīgs no atrašanās ātruma un vidējā paātrinājuma ieskrējiena laikā.

Aptuvenam novērtējumam atsevišķu parametru ietekmei var izmantot šādu formulu:

$$L_{ieskr} = \frac{v_{atr}^2}{2g \left(\frac{P_{vid}}{G} - f \right)}, \quad (1.5.)$$

kur: P_{vid} – lidmašīnas vilkmes spēja;
 f – berzes koeficients.

1.2. Bremzēšanas garums

Noskrējiena garums L_{nosk} ir attālums, ko veic lidmašīna pēc saskaršanās ar zemi, līdz tā pilnīgi apstājas. Noskrējiena garuma aprēķins ir analogisks pacelšanās ieskrējiena ceļa garuma aprēķinam, atšķirība ir tikai tā, ka nosēšanās gadījumā paātrinājums ir negatīvs. Aptuvenai pacelšanās ieskrējiena garuma aplēsei var izmantot vidējo paātrinājuma lielumu, izskatot kustību kā vienmērīgi palēninātu ar beigu ātrumu, kas ir vienlīdzīgs nullei, un ar sākuma ātrumu V_{nos} . Ņemot vērā vēja ietekmi, formula noskrējiena ceļa garuma noteikšanai ir šāda [46, 308]:

$$L_{nosk} = \frac{(V_{nos} \pm W)^2}{2j_{vid}} \quad (1.6.)$$

kur: j_{vid} – vidējais lidmašīnas bremzēšanas paātrinājuma modulis;
 $\pm W$ – gareniskā ceļa vēja ātruma komponente (zīmi “+” izmanto pie ceļa vēja, zīmi “-” – pie pretvēja);

Formula vidējā bremzēšanas paātrinājuma noteikšanai ar sasvēruma ietekmi ir šāda [46, 308]:

$$j_{vid} = - \frac{(X_a + F_{br} \pm mg \sin \theta)_{vid}}{m}, \quad (1.7.)$$

kur: j_{vid} – vidējais bremzēšanas paātrinājums noskrējiena laikā;
 m – lidmašīnas masa nosēšanās laikā;
 $mg \sin \theta$ – gareniskā lidmašīnas svara komponente
(zīmi “+” lieto pretlēkļa gadījumā, zīmi “-” – pielēkļa gadījumā);
 F_{br} – gaisa kuģa berzes spēks;
 vid – vidējā vērtība visa bremzēšanas garuma laikā;
 X_a – aerodinamiskās pretestības spēks.

No 1.6. un 1.7. formulas redzams, ka uz noskrējiena garumu darbojas tie faktori, kas ietekmē ātrumu un vidējo bremzēšanas paātrinājumu.

1.3. Gaisa kuģa dinamiskā modeļa apraksts

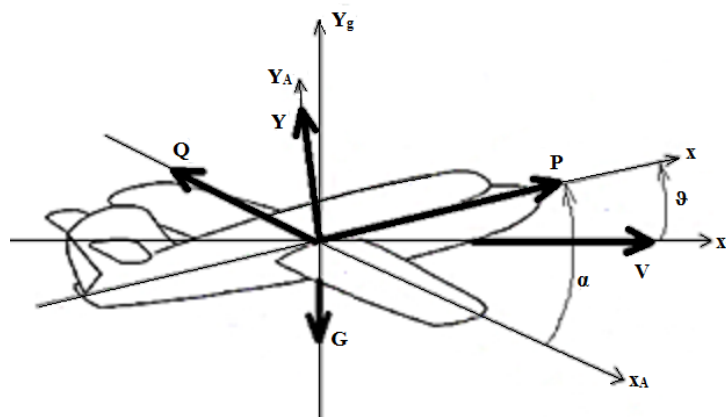
Lidmašīnas kustības modeļa izstrāde nosēšanās režīmā ir diezgan izaicinoša. Tas ir saistīts ar to, ka objektu kustības darbība nosēšanās laikā ir atšķirīga. Sākotnējā nosēšanās fāzē, kad objekts tuvojas skrejceļam, uz to iedarbojas aerodinamiskie spēki un momenti, kā arī gravitācijas spēks. Šajā situācijā objekts ir lidmašīna ar saviem kustības likumiem. Tiklīdz objekta riteņi pieskaras skrejceļam, uz šo objektu iedarbojas jauns spēks, un iepriekšminētie spēki izmainās. Uz objektu sāk darboties berzes spēks, savukārt aerodinamiskie spēki sāk samazināties. Riteņu berzes spēks ir atkarīgs no aerodinamiskā pacēluma lieluma (attiecībā pret objekta svaru). Jo ilgāku laiku objekts pārvietojas pa skrejceļu, jo mazāks aerodinamiskais pacēlums un jo lielāks ir riteņu berzes spēks. Lidmašīna savā kinemātiskajā uzvedībā pārvēršas par sauszemes transporta mašīnu.

Lidmašīnas garenvirziena kustības GK fāzē ir aprakstītas 1.8. vienādojumos saskaņā ar Ņūtona 2. likumu:

$$\begin{aligned} m \frac{dV_x}{dt} + m(\omega_y V_z - \omega_z V_y) &= \sum F_x, \\ m \frac{dV_y}{dt} + m(\omega_z V_x - \omega_x V_z) &= \sum F_y, \\ I_z \frac{d\omega_z}{dt} &= \sum_{i=1}^m M_{z_i}, \end{aligned} \quad (1.8.)$$

kur vienādojumu labajā pusē ir aerodinamiskie spēki un momenti, kas iedarbojas uz lidmašīnu.

Spēki, kas darbojas uz lidmašīnu lidojuma laikā, un lidmašīnas kustības parametri vertikālajā plaknē redzami 1.13. attēlā.



1.13. att. Spēki, kas iedarbojas uz lidmašīnu tās horizontālā lidojuma laikā.

Aerodinamiskie spēki, piemēram, cēlējspēks Y un vilcējspēks X , lidojuma laikā iedarbojas uz gaisa kuģi:

$$\begin{aligned} Y &= C_y S \frac{\rho V^2}{2}, \\ X &= C_x S \frac{\rho V^2}{2}, \end{aligned} \quad (1.9.)$$

kur: C_y, C_x – aerodinamiskās berzes koeficienti,
 S – spārna laukums,
 ρ – gaisa blīvums,
 V – gaisa plūsmas ātrums.

Gravitācijas spēks G un gaisa kuģa dzinēja jauda P iedarbojas uz GK tā lidojuma laikā. Tad vienādojumu, kas raksturo gaisa kuģa lineāro kustību, pieraksta šādā formā:

$$m \left(\frac{dV_x}{dt} + \omega_y V_z - \omega_z V_y \right) = P_x - X - G \sin \theta, \quad (1.10.)$$

$$m \left(\frac{dV_y}{dt} + \omega_z V_x - \omega_x V_z \right) = Y - G \cos \theta.$$

Pārveidojot uz kinemātisko vienādojumu:

$$V_y = \frac{dH}{dt} = V_0 \sin \theta, \quad (1.11.)$$

$$V_x = \frac{dL}{dt} = V_0 \cos \theta,$$

kur: V_x, V_y – relatīvā ātruma komponenti uz zemes koordinātu sistēmas asīm.

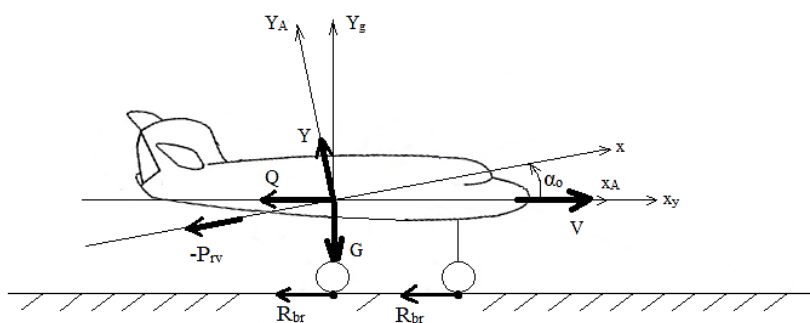
Objekta dinamika sauszemes transporta līdzekļa posmā būtiski mainīsies, salīdzinot ar objekta kustību GK fāzē, kas aprakstīta 1.10. un 1.11. vienādojumā, jo objekta kustība uz skrejceļa virsmas dos noteiktus ierobežojumus objekta kinemātikai un dinamikai.

Objekta kustība uz skrejceļa virsmas radīs daudzas objekta kinemātisko parametru izmaiņas. Objektam nepiemītīs leņķiskais ātrums ($\omega_x = 0, \omega_y = 0, \omega_z = 0$), jo objekts nepiedalīsies leņķiskajā kustībā. Trajektorijas kustības slīpuma leņķis θ būs vienāds ar nulli. Leņķi α un ϑ būs nemainīgi un vienādi ($\alpha = \vartheta$).

Spēki, kas iedarbojas uz objektu tā kustības laikā pa skrejceļu, salīdzinot ar spēku, kas darbojas lidojuma posmā, arī mainīsies (1.13. att.). Šā lidojuma posma mērķis ir samazināt lidmašīnas ātrumu, tāpēc nedarbosies lidmašīnas dzinēja radītais vilcējspēks (P). Spēks darbosies lidmašīnas ātrumam pretējā virzienā.

Pēc tam, kad gaisa kuģa riteņi pieskaras skrejceļam, GK dzinēja vilcējspēka virziens P ir pretējs ($-P$), salīdzinot ar lidojuma posmu. Apkalpe to panāk ar īpašu atpakaļgaitas ierīci, to iedarbinot kustības pa skrejceļu sākumposmā, kad ātrums ir ļoti liels. GK riteņu ātruma samazināšana, bremsējot riteņus, izraisa intensīvu riepu nodilumu. Tāpēc šī bremsēšanas metode GK kustības pirmajā fāzē uz skrejceļa nav piemērojama. Atpakaļgaitas (reversa) ierīces darbība sākumposmā uz skrejceļa tiek izmantota tikai relatīvi nelielā laika posmā, lai pietiekami intensīvi samazinātu lidmašīnas ātrumu tā kustības sākumposmā. Tāpēc bremsēšanas procesa laikā GK dzinēja vilcējspēks darbosies negatīvā virzienā tikai noteiktā laika intervālā ($-P(\Delta t)$).

Aerodinamiskie spēki, kas darbojas uz lidmašīnu lidojumā laikā, ietekmēs arī lidmašīnas kustību uz skrejceļa. Vilcējspēks X turpinās darboties pretēji GK ātrumam un izraisīs bremsēšanas efektu (samazinot tā ātrumu). Laikā gaitā tiks samazināts vilcējspēka X lielums, jo tas samazinās GK ātrumu (1.9. vienādojums). Uz lidmašīnas kustību iedarbosies vēl viens aerodinamiskās pretestības spēks – spoileru pretestības spēks X_{sp} . Spoileru pretestības spēku X_{sp} rada speciāli spārnu atloki, kas ir pakļauti plūsmai.



1.14. att. Spēki, kas darbojas uz lidmašīnu nosēšanās laikā.

Rodas jauns bremsēšanas spēks, kas raksturīgs lidmašīnas kustībai pa skrejceļu. Tas ir riteņa vārpstas rotācijas bremsēšanas spēks F_{fr} . Šim spēkam ir divas komponentes. Pirmo komponenti F_{fr1} rada mijiedarbība starp skrejceļa virsmu un GK riteņiem. Tas ir rites pretestības spēks. Rites pretestības spēka lielumu nosaka (literatūrā) ar vienādojumu:

$$F_{fr1} = k_{fr1} G, \quad (1.12)$$

kur: k_{fr1} – rites pretestības koeficients;

G – GK svars.

Rites pretestības koeficienta k_{fr1} (1.13. vienādojums) ir atkarīgs no GK kustības ātruma V (jūdzes/stundā) un skrejceļa stāvokļa koeficienta C_{st} (mitrums, apledojums utt.):

$$k_{fr1} = (0,0041 + 0,000041V)C_{st} \quad (1.13)$$

Skrejceļa stāvokļa koeficients C_{st} var ļoti atšķirties. Īpašs gadījums ir sauss līdzens betons, kura $C_{st} = 1,0$.

Rites pretestības spēku F_{fr1} (1.12. vienādojums) GK bremsēšanas procesā var aprēķināt, izmantojot:

$$F_{fr1} = k_{fr1}(G - Y), \quad (1.14)$$

kur: Y – cēlējspēka lielums.

Cēlējspēka lielums Y laika gaitā samazinās (1.9. vienādojums), jo objekta kustības bremsēšana samazina tā ātrumu V . Objekta svars G paliks tāds pats, kāds tas ir lidojuma brīdī (kad GK riteņi pieskaras skrejceļam). Tas ir, rites pretestības spēka F_{fr1} lielums ir minimāls, ja GK riteņi pieskaras skrejceļam. Kad gaisa kuģis pārvietojas pa skrejceļu, laiku pa laikam palielinās rites pretestības spēks F_{fr1} .

Otra ritošās pretestības spēka $F_{fr2(pd)}$ komponente rodas, ja objekta riteņa vārpstas rotācijas bremsēšanu veic pilots, nospiežot bremzes. Tad rodas lidmašīnas kustības bremsēšanas dzinējspēks. Intuitīvi radod riteņa bremsēšanas spēka vērtību, pilots samazina lidmašīnas ātrumu līdz iepriekš noteiktām vērtībām tajā laika periodā, kad GK pārvietojas pa skrejceļu, tādējādi izvairoties no tā, ka GK novirzīsies no skrejceļa. Šajā procesā ir svarīgi (īpaši attiecībā uz civilo aviāciju) īstenot arī optimālu riteņu bremsēšanas spēka vērtības izvēli, lai riepu nodilums būtu mazākais iespējams.

Lai īstenotu optimālo bremsēšanas procesu, pilotam būtu jāparedz bremsēšanas spēka ietekme uz gaisa kuģa kinemātiku. Tas ir ļoti grūts uzdevums. Īpaša ierīce, kas pēc katras pilota pārrāvuma darbības (pēc īpaša bremsēšanas spēka radīšanas) parādīs sekojošā skrējiena garumu, var palīdzēt kvalitatīvi atrisināt šo problēmu.

Lai optimizētu struktūru un novērtētu instrumenta kļūdas attiecībā uz dažādu konstrukcijas parametru izvēli, ir jāanalizē specializētā prognozējošā rīka darbs. To var izdarīt, izmantojot lidmašīnas nosēšanās dinamisko modeli.

Nosēšanās dinamikas un kinemātikas analīze ļauj veikt lidmašīnas nosēšanās modeli. No 1.10. un 1.11. vienādojumiem var iegūt dinamisko lidmašīnas nosēšanās modeli:

$$m \frac{dV}{dt} = -P(\Delta t) - X - F_{fr1} - F_{fr2}(pd) - K_{1U_x} U_x - K_{2U_y} U_x, \quad (1.15)$$

$$L_{xz}(t) = Vt$$

kur: $L_{xz}(t)$ – gaisa kuģa nosēšanās noskrējiena distance uz skrejceļa;

$K_{1U_x} U_x, K_{2U_y} U_x$ – vēja traucējumi, ko rada vēja ātruma horizontālā komponente U_x .

Lidmašīnas dinamiskajā modelī visi spēki jānovieto noteiktā veidā atkarībā no nosēšanās apstākļiem. GK dzinēja atpakaļgaitas spēks P jāizvēlas no specifiskajiem gaisa kuģa dzinēja nosēšanās režīma parametriem. Aerodinamiskie spēki, piemēram, cēlējspēks Y un vilcējspēks X , ir ļoti viegli aprēķināmi, jo šo spēku vērtības ir atkarīgas tikai no lidmašīnas kustības ātruma (1.9. vienādojums). Ir nepieciešams ievadīt C_y, C_x koeficientu atkarību no GK ātruma aerodinamiskajos spēkos un piemērot GK ātrumu to ievadē. Tas modelī radīs atgriezenisko saiti. Lai aprēķinātu rites pretestības spēku F_{fr1} , GK svars pastāvīgi jāsamazina par cēlējspēku.

Vēja traucējumi $K_{1U_x} U_x, K_{2U_y} U_x$ izriet vēja ātruma horizontālās komponentes U_x un tos nosaka no aerodinamisko spēku izteiksmes (1.9. vienādojums). Ja darbojas U_x , aerodinamisko spēku X un Y (ΔX un ΔY) lielums arī mainās un kļūst par GK kustību traucējošiem faktoriem. Traucējošo faktoru lielumu nosaka kā aerodinamisko spēku X un Y komponentu palielināšanos atbilstoši U_x parametram:

$$K_{1U_x} U_x = \Delta X = \left(C_x^V S \frac{\rho V^2}{2} \right) U_x + \left(C_x^S S \frac{\rho 2V}{2} \right) U_x = \frac{S \rho V^2}{2} \left(\frac{C_x^M}{a_H} + \frac{2C_x}{V} \right) U_x, \quad (1.16)$$

$$K_{2U_y} U_x = \Delta Y = \left(C_y^V S \frac{\rho V^2}{2} \right) U_x + \left(C_y^S S \frac{\rho 2V}{2} \right) U_x = \frac{S \rho V^2}{2} \left(\frac{C_y^M}{a_H} + \frac{2C_y}{V} \right) U_x$$

Tad koeficientus K_{1U_x}, K_{2U_y} GK nosēšanās dinamiskajā modelī var definēt šādi:

$$K_{1U_x} = \frac{S\rho V^2}{2} \left(\frac{C_x^M}{a_H} + \frac{2C_x}{V} \right) U_x, \quad (1.17)$$

$$K_{2U_y} = \frac{S\rho V^2}{2} \left(\frac{C_y^M}{a_H} + \frac{2C_y}{V} \right).$$

GK vadības bremsēšanas spēks $F_{f2}(pd)$ (1.15. vienādojums), ko rada GK riteņu vārpstas rotācijas bremsēšanas process, kad pilots spiež bremzes, jāmodelē, dažādos laika brīžos piemērojot pastāvīgos signālus, kas atbilst modeļa pilota spēkam. Šīs vērtības $F_{f2}(pd)$ var ievadīt eksperimenta dalībnieka modelī, atveidojot izmēģinājuma darbību nosēšanās posmā.

1.4. Lidmašīnas kustība pa skrejceļu nosēšanās laikā. Matemātiskais modelis

Iepriekšējā apakšnodaļā tika aprakstīti lidmašīnas nosēšanās dinamiskā modeļa komponenti. Tika apspriests katrs komponents, kā arī izskaidrota tā loma lidmašīnas nolaišanās procesā. Sniegtas arī atbilstošas formulas, kas apraksta katru nākamā modeļa sastāvdaļu. Tomēr matemātisko modeļu veidošanai un analīzei dažas no šīm formulām ir sarežģītas vai slikti pielāgojamas izmantošanai modelēšanā. Tāpēc iepriekšējās apakšnodaļas formulas un vienādojumus labāk pārveidot tādā formā, kas būs ērta modelēšanai un analīzei.

No 1.10. un 1.11. vienādojuma iegūts dinamiskais lidmašīnas nosēšanās modelis (1.15. vienādojums), taču šie vienādojumi ir rakstīti vispārīgā formā, tāpēc tie būtu detalizēti jāapraksta.

Pārveidosim dinamiskā modeļa pirmo daļu (1.15. vienādojums) šādā formā:

$$m \frac{dV_x}{dt} = -P_x - X - F_{fr_1} - F_{fr_2}(pd), \quad (1.18)$$

kur: $P_x = P \cos \alpha_0$;

X – pretestības komponente (1.9. vienādojums);

F_{fr_1} – rites pretestības spēks (1.14. vienādojums);

Y – cēlējspēks (1.9. vienādojums);

$F_{f2}(pd)$ – pretestības komponente laikā, kad pilots spiež uz bremzēm.

Lidmašīnas gaisa ātrums V , ko izmanto aerodinamisko spēku formulās, piemēram, cēlējspēka komponente Y un vilcējspēka komponente X (1.9. vienādojums), sastāv no divām komponentēm:

$$V = V_{airplane} \pm U, \quad (1.19)$$

kur: $V_{airplane}$ – aktuālais GK ātrums;

U – vēja ātrums.

V_x komponente 1.18. vienādojumā ir lidmašīnas ātrums attiecībā pret zemi. Šajā gadījumā V_x jāuzskata par lidmašīnas ātrumu attiecībā pret skrejceļu. Tāpēc tas tiks rakstīts šādi:

$$V_x = V_r \quad (1.20)$$

“ m ” vērtība 1.18. vienādojumā ir vienāda ar:

$$m = \frac{G}{q}, \quad (1.21)$$

kur: G – GK masa;

$q = 9,81 \text{ m/s}^2$ – brīvās krišanas paātrinājums.

Pēc visām šīm pārvērtībām 1.15. vienādojumu var izteikt šādā vienādojumu sistēmas formā:

$$\begin{cases} \frac{dV_r(t)}{dt} = -\left(\frac{q}{G}\right) P_x(\Delta t) - \left(\frac{q}{G}\right) \frac{C_x S \rho}{2} (V_{airplane} \pm U)^2 - \frac{k_{fr_1} q}{G} \left(G - \frac{C_y S \rho}{2} V^2\right) - F_{fr_2}(pd) \\ L(t) = \int_0^t (V_{r_0} - \Delta V_r) dt, \end{cases} \quad (1.22)$$

kur: V_{r_0} – nosēšanās ātrums (skrejceļa pieskares punktā);

$P_x(\Delta t)$ – dzinēja reversēšana laika periodā Δt ;

$L(t)$ – GK nosēšanās distance skrejceļā.

Pārveidojot 1.22. vienādojumu sistēmu par formu, kas ir noderīga turpmākai modelēšanai un analīzei, tiek iegūts:

$$\begin{cases} \frac{dV_r}{dt} = -K_G [P_x(\Delta t_{pc_i}) - K_x C_x V_a^2 - k_{fr_1} [G - K_y C_y V_a^2] - F_{fr_2}(pd)] \\ L_r(t) = \int_0^t (V_{r_0} - \Delta V_r) dt, \end{cases} \quad (1.23)$$

kur: $K_G = \frac{g}{G}$;

$\Delta t_{pc_i} = \Delta t_{r_0} + t_2 = const$;

$K_x = K_y = \frac{S_D}{2}$;

$V_a = V_r \pm U$.

Šī pārveide tiek veikta, apvienojot dažus sākotnējā 1.22. vienādojuma sistēmas elementus un uzskatot tos par vienu koeficientu. Lielākā daļa šo vienādojumu sistēmas elementu ir nemainīgi, un tie ir atkarīgi tikai no pārbaudītās lidmašīnas tipa un attiecīgi no tās parametriem (svars, spārnu laukums, kas raksturīgs šiem lidmašīnas aerodinamiskā spēka koeficientiem utt.). Tāpēc turpmākajai analīzei un pētīšanai ir vieglāk tos apvienot, tādējādi vienkāršojot aprīkojuma izstrādes matemātisko modeli.

Visbeidzot, sākotnējā 1.22. vienādojumu sistēma tiek pārveidota par:

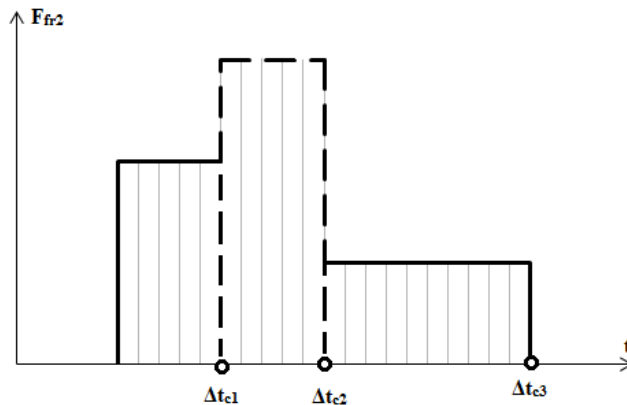
$$\begin{cases} a_r = \frac{dV_r}{dt} = -K_G [P_x(\Delta t_{pc_i}) - K_x C_x V_a^2 - k_{fr_1} [G - K_y C_y V_a^2] - F_{fr_2}(pd)] \\ L(t) = \int_0^t V_r dt \\ V_r = V_{r_0} - \Delta V_r \\ V_a = V_r \pm U, \end{cases} \quad (1.24)$$

kur: $\Delta t_{pc_i} = \Delta t_{r_0} + t_2$;

t_{r_0} – dzinēja reversā režīma aktivizēšanas laiks attiecībā pret pieskares punktu;

t_2 – reversa režīma laiks.

$F_{fr_2}(pd)$ vienādojumu sistēmā (1.24) rada šasijas riteņi, kuru bremsēšanas spēku iedarbina pilots. $F_{fr_2}(pd)$ ir konstanta vērtība katrā pilota darbināto bremžu darbības posmā. Citiem vārdiem sakot, tā ir pakāpienu funkcija katrai atsevišķai daļai Δt_{c_j} , kad pilots darbina bremzes (1.15. att.).



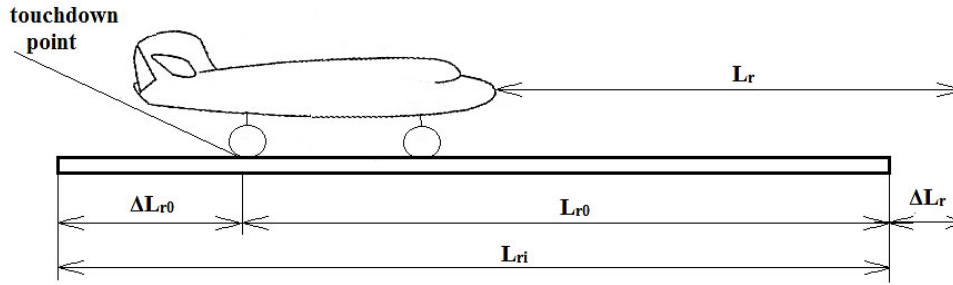
1.15. att. $F_{fr_2}(\Delta t_{c_j})$ kā pakāpeniska procesa attēlojums.

1.24. vienādojumu sistēma atbilst lidmašīnas kustības pa skrejceļu dinamiskajam modelim, kurā noteikts lidmašīnas nosēšanās distances garums.

Lidaparāta skrejceļa nosēšanās vadības ierīces funkcionālās modelēšanas uzdevums (kas pilda prognozētājierīces funkcijas) ir daudz plašāks nekā vienkārša skrejceļa nosēšanās distances garuma noteikšana. Lidmašīnas skrejceļa kustības matemātiskais modelis ir tikai daļa no lidmašīnas skrejceļa nosēšanās vadības ierīces darba modelēšanas uzdevuma.

GK skrejceļa nosēšanās vadības ierīces darba modelēšanas galvenais uzdevums ir noteikt starpību starp sākotnējo skrejceļa garumu L_r (atlikušais skrejceļa garums no lidmašīnas nolaišanās punkta līdz skrejceļa beigām) un skrejceļa noskrējiena garumu ΔL_r (1.25. vienādojums) (1.16. att.):

$$\Delta L_r = L_{r0} - L_r \quad (1.25)$$



1.16. att. Skrejceļa attālumi, kurus izmanto lidmašīnas skrejceļa nosēšanās vadības ierīcē.

Lai atrisinātu lidmašīnas skrejceļa nosēšanās vadības ierīces darba modeļa problēmu, ir jāpievieno lidmašīnas kustības vienādojumi attiecībā uz skrejceļu lidmašīnas kustības modeļa vienādojumiem.

$$\begin{aligned} L_{r0} &= L_{ri} - \Delta L_{r0}, \\ \Delta L_r &= L_{r0} - L_r, \end{aligned} \quad (1.26)$$

kur: ΔL_r – skrejceļa atlikušais garums;

L_{ri} – skrejceļa garums;

ΔL_{r0} – “pazaudētais” skrejceļa garums konkrētajā gadījumā;

L_{r0} – “reālais” skrejceļa garums konkrētajā gadījumā.

Visbeidzot, ir iespējams iegūt pilnu matemātisko modeli lidmašīnas skrejceļa nosēšanās vadības ierīces darbam, apvienojot 1.24. un 1.26. vienādojumu sistēmas:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dV_r}{dt} = a_r &= -K_G P_x (\Delta t_{pc_i}) - K_Q C_x (V_a) V^2 - K_K [G - K_y C_y (V_a) V^2] - F_{fr_2} (pd) \\ L(t) &= \int_0^t V_r dt \\ V_r &= V_{r0} - \Delta V_r \\ V_a &= V_r \pm U \\ L_{r0} &= L_{ri} - \Delta L_{r0} \\ \Delta L_r &= L_{r0} - L_r \end{aligned} \right. \quad (1.27)$$

Ierīces izvadē var iegūt divus iespējamus rezultātus:

- ja aprēķinātais skrejceļa rezerves garums ΔL_r ir pozitīvs ($+\Delta L_r$), nosēšanās būs veiksmīga un atbildīs visām prasībām (nosēšanās ir apmierinoša);
- ja aprēķinātais skrejceļa rezerves garums ΔL_r ir negatīvs ($-\Delta L_r$), lidmašīnas nosēšanās neiekļaujas skrejceļa robežās un nosēšanās uzskatāma par neapmierinošu.

Dinamiskā modeļa blokshēmas izstrāde

Ja visa nepieciešamā teorētiskā informācija par lidmašīnas dinamisko modeli nosēšanās procedūras laikā un visi koeficienti ir aprakstīti un aprēķināti, var sākt dinamiskā modeļa bloka shēmas izstrādi un tās ekspluatācijas derīguma pārbaudi.

Lai izstrādātu dinamiskā modeļa blokshēmu, jāizmanto dinamiskā modeļa 1.24. vienādojumu sistēma. Šajā gadījumā nav obligāti jāizmanto pilnīgā un galīgā 1.27. vienādojumu sistēma, jo tiek izstrādāts tikai dinamiskais modelis, tāpēc 1.24. vienādojumu sistēma būs pietiekama, lai izpildītu šo uzdevumu.

Nolemts izmantot *MathWork* programmu, *MATLAB* un *SIMULINK* programmatūru, lai izveidotu un pārbaudītu nosēšanās dinamikas modeļa pareizu darbību. Izvēli nosaka vairāki iemesli, piemēram, laba lietojumprogrammas funkcionalitāte, nepieciešamo komponentu pieejamība dinamiska modeļa izveidei, iekārtas izmantošana, vienkāršība komponentu mainīšanā utt.

Saskaņā ar 1.24. vienādojumu ir vairāki ievades komponenti, ko lietotājs ir iestatījis simulācijas procedūras sākumā atkarībā no novērojuma mērķiem: dzinēja atpakaļgaitas vilces režīms P_x ; nosēšanās ātrums V_r ; rites pretestības spēks F_{fr_2} ; vēja ātrums U ; lidmašīnas svars G ;

2. PROBLĒMAS ANALĪZE

Pacelšanās un nosēšanās etapos gan uz zemes, gan gaisā notiek vismaz puse dažādu aviācijas negadījumu, tāpēc reglamentējošajos dokumentos tiek noteiktas stingras prasības gan lidlaukiem, ko ir iespējams droši ekspluatēt attiecīgos apstākļos, gan lidaparātu parametriem.

Mūsdienās nevienam lidaparātam nav sistēmu, kas ir spējīga aprēķināt un prognozēt lidmašīnas ieskriešanās un bremsēšanas ceļu pret PNJ beigām. Tomēr diezgan bieži tas izraisa traģiskas sekas. Ņemot vērā kompānijas “Boeing” statistiku (1.1. att.), tieši nolaišanās un noskrējiens pa PNJ ir pats bīstamākais no visiem lidojuma etapiem, un tajā notiek 47 % no visiem nelaimes gadījumiem. Tai pašā laikā nolaišanās process aizņem tikai nedaudzus procentus no visa lidojuma laika. Papildu sistēmas nodrošināšana GK dos iespēju samazināt avāriju skaitu nolaišanās laikā, Turklāt, ja normālos apstākļos galvenokārt tiek izvēlēts maksimālais bremsēšanas spēks, kas rada relatīvi lielu apriepojuma un bremsžu disku nolietojumu. No otras puses, pārāk pasīva bremsēšana, ko veic apkalpe, var izraisīt traģiskus notikumus vai – labākajā gadījumā – incidentu (izbraukšana no PNJ). Ja lidsastāva rīcībā būtu tāda ierīce, kas varētu noteikt iespējamo avāriju (pacelšanās-nolaišanās ceļa atlikuma nepietiekamību bremsēšanai un ieskrējienu), daudzas avārijas būtu iespējams novērst (savlaicīgi palielināt bremsēšanas spēku, pārtraukt pacelšanos, veikt otru nolaišanās apli utt.). Lidojuma ieskriešanās-nolaišanās stadijas panākumi ir stipri atkarīgi no cilvēciskā faktora, pilotu pieredzes, lidaparāta tehniskā stāvokļa un laika apstākļiem.

Šos faktoros var pierakstīt funkcionālas atkarības veidā. Noteicošais vērtēšanas faktors ir faktiskā noskriešanas distance (L_{nosk}), ar kuras palīdzību lidmašīnas izbraukšanas iespēja aiz PNJ var izveidot kā šāda veida funkciju:

$$F(L_{nosk}) = \left\{ \begin{array}{l} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), f_2(y_1, y_2, \dots, y_m), f_3(z_1, z_2, \dots, z_k), \\ f_4(q_1, q_2, \dots, q_s), f_5(k_1, k_2, \dots, k_t) \end{array} \right\}, \quad (2.1)$$

kur: f_1 – funkcija, kas ir atkarīga no meteoroloģiskajiem apstākļiem;
(x_1, \dots, x_n) – PNJ stāvoklis (sausas, slapjas, segtas ar ūdeni, dubļaina utt.),
faktiskais piezemēšanās ceļavējš un citi faktori;

f_2 – lidmašīnas pacelšanās-nolaišanās raksturlielumu izmaiņu funkcija;
(y_1, \dots, y_m) – lidmašīnas konfigurācija (priekšspārnu, eleronu, spoileru stāvoklis);

f_3 – pilotēšanas tehnikas funkcija;
(z_1, \dots, z_k) – ieskriešanās metode; nolaišanās ātrums; augstums pie skrejceļa sākuma; lidmašīnas atrašanās laiks virs skrejceļa; dzinēja vilkmes rādītāji, bremsēšanas vai ieskriešanās sākuma pozīcija uz skrejceļa u. c.;

f_4 – lidmašīnas tehniskā stāvokļa funkcija;
(q_1, \dots, q_s) – dzinēja stāvoklis; bremsžu stāvoklis; pretslīdēšanas automātikas stāvoklis; dzinēja vilkmes reversa stāvoklis; uz zemes izmantojamo spoileru stāvoklis u. c.;

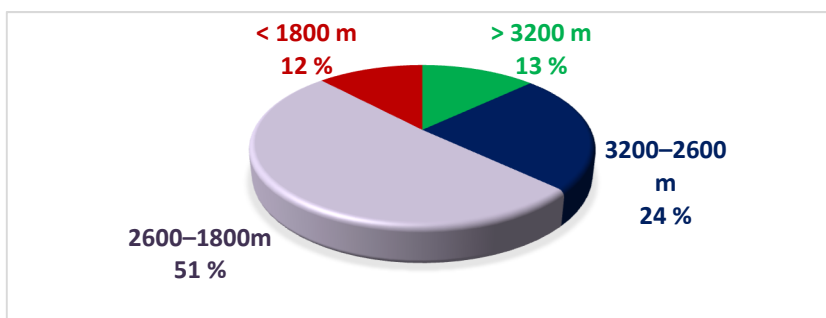
f_5 – funkcija, kas ir atkarīga no PNJ izvietojuma;
(k_1, \dots, k_t) – negatīvs kritums, pozitīvs pacēlums, mainīgs, viļņveida kritums; aerodroma atrašanās augstums (pazemināts atmosfērās spiediens palielina lidojuma ātrumu) u. c.

2.1. Pacelšanās un nolaišanās josla

Pacelšanās-nolaišanās josla ir aerodroma daļa, kas ietilpst tā lidojumu darba joslas sastāvā. Pacelšanās-nolaišanās josla ir speciāli sagatavota un aprīkota zemes virsmas josla ar mākslīgu vai zemes grunts seguma klājumu, kas ir paredzēta, lai nodrošinātu lidaparātu pacelšanos un nolaišanos.

PNJ garums

Ne visām lidostu PNJ ir pietiekami liels garums, un tas arī rada galvenās problēmas lidmašīnas izbraukšanai no skrejceļa.



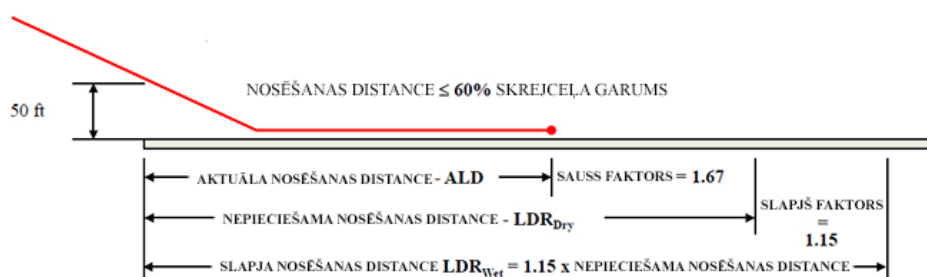
2.1. att. Riska sadales diagramma nobraukšanai no skrejceļa, lidmašīnai nolaižoties.

Kā redzams 2.1. attēlā, 63 % lidlauki var būt saistīti ar paaugstinātu riska pakāpi, lidmašīnai paceļoties un nolaižoties.

Atkarībā no skrejceļa garuma, drošības distancēm un platuma, uz kura var izvietoties lidmašīnas ar noteiktu spārnu vēzienu un galvenās šasijas bāzi, izšķir piecu klašu lidlaukus.

Jebkurai lidlauka klasei lidmašīnai ir jānodrošina gan turpināta, gan pārtraukta pacelšanās, gan uz sausa, gan mitra skrejceļa.

Sausa un mitra skrejceļa nepieciešamais garums redzams 2.2. attēlā.



2.2. att. Nepieciešamā nosēšanās distance (skrejceļa garums)

saskaņā ar *CS -25 (Certification Specifications for Large Aeroplanes)*. [34]

Pacelšanās un nolaišanās joslas izmēri

Pacelšanās-nolaišanās joslas var būt dažādas, no pavisam mazām – 300 m garumā un 10 m platumā, līdz pat ļoti lielām – 5,5 km garumā un 80 m platumā. Mazākās joslas tiek izmantotas vieglajai un sevišķi vieglajai (SVA) aviācijai. Tādā veidā, piemēram, delta lidaparātam (deltaplānam) ir pietiekami ar 100 m pie ieskriešanās un tikpat metru, lai nolaistos. Lielākās joslas tiek būvētas lielās starptautiskās lidostās un arī aviorūpnīcās.

Joslu segumi ir dažādi: grunts, grants, asfalta un betona.

Nepieciešamais skrejceļa garums tiek rezervēts tāds, lai iespējamo noviržu gadījumos avārijas varbūtība būtu iespējami maza.

Pacelšanās un nolaišanās joslas apzīmējums

Skrejceļa apzīmējumi ir nepieciešami, pirmkārt, precīzākai un drošākai lidmašīnas nosēdināšanai uz PNJ. Joslu apzīmējumi ir visai atšķirīgi no tiem, ko esam pieraduši redzēt uz auto ceļiem.



2.3. att. Skrejceļa apzīmējums. [49]

Skrejceļa apzīmējumi (2.3. att. no kreisās):

- **Galējā drošības josla (GDJ; dzeltenas skujiņas).** Paredzēta, lai pasargātu zemes virsmu no spēcīgas reaktīvo dzinēju izplūdes strūklu iedarbības (lai nebojātu virsmu, nesaceltu putekļus utt.), kā arī gadījumiem, lai neizbrauktu ārpus PNJ. Lidaparātiem ir aizliegts atrasties GDJ, jo tās virsmas segums nav paredzēts to svaram.
- **Pārvietotais sliekšnis** (vai stūrēšanas sākums; baltas bultas – skrejceļa zona, kur ir atļauta stūrēšana, ieskrējiens un lidaparātu noskrējiens, nevis piezemēšanās).
- **Sliekšnis** (vai **atdure**, baltas joslas “zebras” veidā) – PNJ sākums, kas apzīmē vietu, kur var sākt piezemēšanos. Sliekšnis ir izveidots tāds, lai to varētu pamanīt no tālienes. Līniju daudzums ir atkarīgs no skrejceļa platuma.
- **Marķēšanas numurs** un, ja ir nepieciešams, burts (*L* – kreisā, *R* – labā, *C* – centrālā).
- **Piezemēšanās zona** – dubulti, paralēli taisnstūri, kas sākas 300 m no skrejceļa sliekšņa. Veicot ideālu nolaišanos, apkalpe neizlaiž no acīm piezemēšanās zonu, un saskarsme ar zemi notiek tieši piezemēšanās zonā.
- **Fiksētā attāluma atzīmes** (lieli taisnstūri, kas izvietoti ik pa 150 m).

Nepieciešamie apzīmējumu atribūti ir arī ass un – citos gadījumos – arī sānu līnijas.

3. LIDAPARĀTA BREMZĒŠANAS IESPĒJAS

Pēdējo 50 gadu laikā lidmašīnu ātruma raksturojumi ir stipri mainījušies. Mūsdienu lidmašīnu kreisēšanas ātrums ir palielinājies vairākas reizes, tomēr, kā zināms, jo lielākam ātrumam paredzēta lidmašīna, jo tai ir grūtāki un pārliecinošāki apstākļi mazu nosēšanās ātrumu gadījumā.

Dažādi konstruktoru asprātīgi izgudrojumi, piemēram, spārnu ģeometrijas izmaiņšana, spēcīga pacelšanās un nolaišanās mehānizācijas izstrāde dod iespēju daļēji atrisināt problēmu. Šeit rodas tādi nepatīkami gadījumi kā liels nolaišanās distances garums (noskrējieni) lidaparātam un palielināta slodze uz nolaišanās ietaisēm (riteņi, bremzes, riepas vai “pneimatīki”).

Jebkuram priekšmetam, kas atrodas kustībā, tās pašas kustības ietekmē piemīt kinētiskā enerģija. Tās fundamentālā formula ir: $K = MV^2 / 2$. Lidmašīnai, kurai pašai par sevi nav maza masa M , veicot nolaišanos ar ātrumu V_{nos} , ir ļoti liels kinētiskās enerģijas krājums. Lai apstādinātu GK, šī enerģija ir jāizlieto (vai jāpārvieš citos enerģijas veidos, kas nav saistīti ar lidmašīnas kustību). Visi bremsēšanas paņēmieni ir tieši uz to virzīti.

Mūsdienu aviācijā ir plaši pazīstami trīs bremsēšanas paņēmieni: dzinēja vilkmes reversēšana; bremsēšanas izpletņi; lidmašīnas riteņu bremzes. Palīg līdzekļi var būt arī bremsējoši aizvari, bremsēšanas vairogļi un interceptori (spārnu mehānizācija).

4. SKAITĪŠANAS IERĪCES IZSTRĀDĀŠANA

4.1. Analītisko sakarību grafiku izveidošana

Lai radītu algoritmu atlikušā ceļa garuma aprēķināšanai, ir jāapkopo viss iepriekš izklāstītais un jāmēģina analītiski konstruēt sakarības grafiki, to palēninājumā un paātrinājumā, atkarībā no laika. Ar analītisko analīzi ir pilnīgi pietiekami, lai uzkonstruētu matemātisko modeli, tomēr reālie mērījumi var dot precīzāku rezultātu.

Ieskriešanās paātrinājuma atkarībai no laika, kā minēts pirmajā nodaļā, idealizētā variantā ir jāizskatās kā horizontālai līnijai (ieskrējiens ir vienmērīgi paātrināta lidmašīnas kustība).

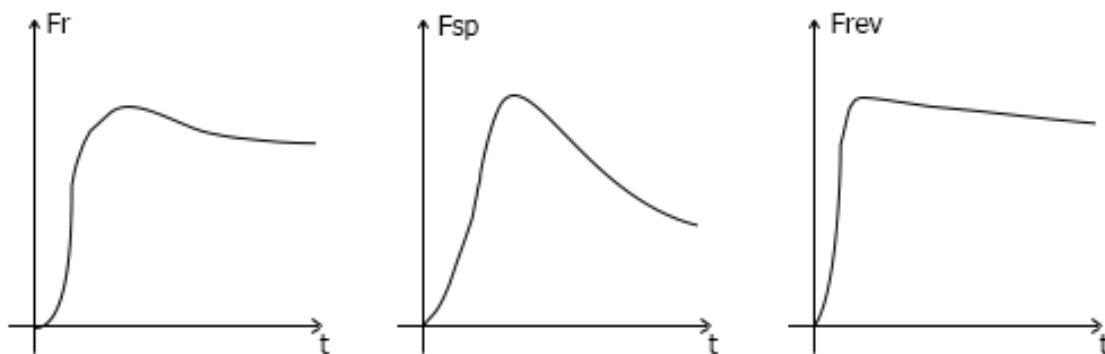
Bremzēšanas ceļu savukārt var iedalīt divos etapos (4.2. att.). Pirmais etaps ir aerodinamiskā bremzēšana (frontālā pretestība, spoileri, reverss). Otrais etaps – mehāniskā bremzēšana (lidmašīnas riteņu bremzes).

Spēku kinematika, kas iedarbojas uz lidmašīnu pirmajā etapā, var izteikt šādi:

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{1}{m} \sum F = -\frac{1}{m} (F_r - F_{sp} - F_{rev}) \quad (4.1.)$$

kur: F_r – riteņu berzes spēks;
 F_{sp} – aerodinamiskā pretestība;
 F_{rev} – dzinēja reversēšanas vilkmes spēks.

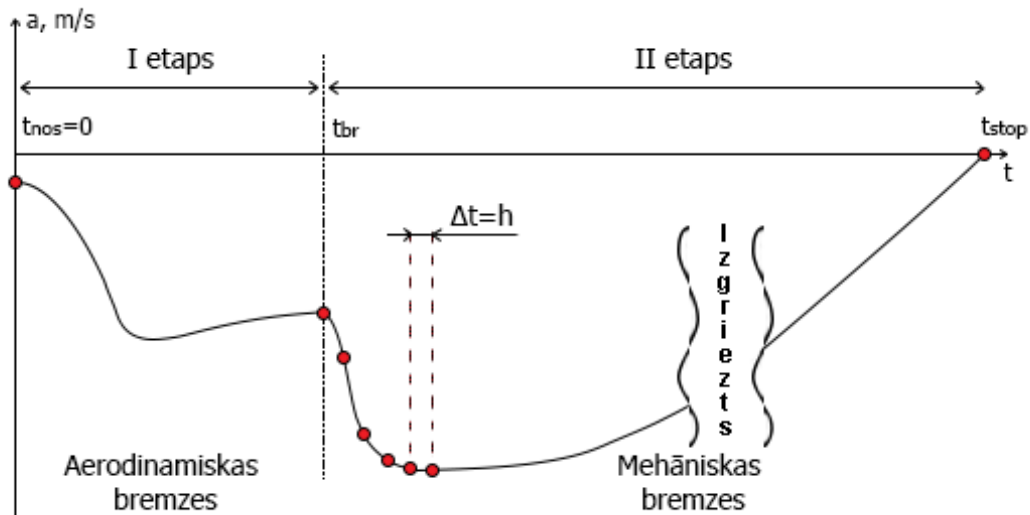
Grafiskā veidā šie spēki redzami 4.1. attēlā. Grafiki ir konstruēti analītiski, tādēļ precizitāte un mērogs reālos apstākļos var būt citādi.



4.1. att. Aptuvenš bremzēšanas spēku sakarības attēlojums laika gaitā.

Kā redzams 4.1. attēla grafikos, summārais bremzēšanas ceļš pirmajā etapā pastāvīgi samazināsies, kas dod iespēju paredzēt, ka arī paātrinājums (šajā gadījumā ar “-” zīmi) atkarībā no laika pirmajā etapā strauji pieaug un pakāpeniski pazemināsies līdz bremžu izmantošanas pabeigšanai. Riteņu berzes spēks līdz bremžu lietošanai ir nenozīmīgs, un tam ir tikai informējošs raksturs.

Pēc tam paātrinājums vēl reizi strauji pieaug, jo bremzes izraisa ļoti ievērojamu bremzēšanas spēku. Pazeminoties ātrumam, spēki, kas darbojas pirmajā etapā, paliks mazāki. Pēc tam paātrinājums pakāpeniski nonāks līdz nullei (lidmašīna apstāsies). Paātrinājuma atkarība no laika redzama 4.2. attēlā.



4.2. att. Paātrinājuma atkarība no laika pēc lidmašīnas piezemēšanās.

$t_{nos}=0$ – laika atskaites sākums no riteņu saskares ar zemi;

t_{br} – riteņu bremžu izmantošanas sākšana;

t_{stop} – apstāšanās laiks, kad ātrums $V=0$;

h – paātrinājuma mērīšanas intervāls.

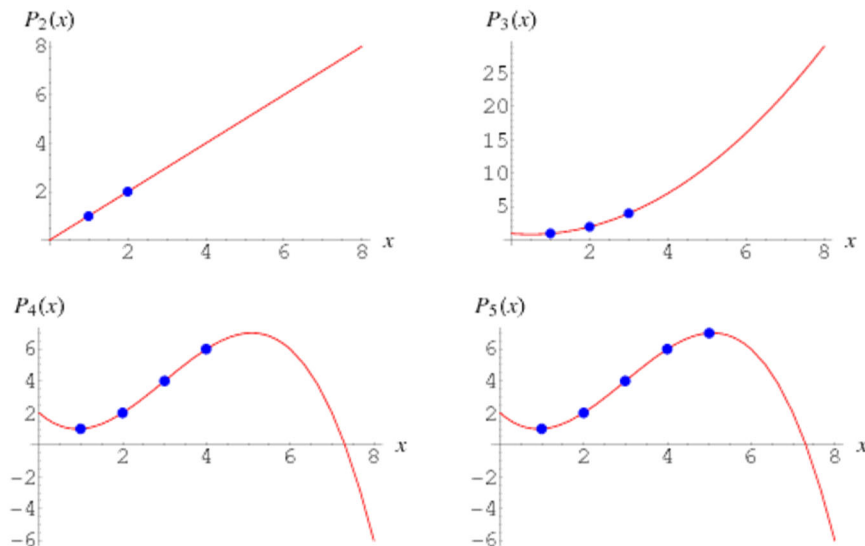
4.2. Matemātiskā modeļa izmantošana

Lai prognozētu bremsēšanas rezultātus, nav iespējams izmantot formulas, kas pamatotas tikai uz mehāniskiem spēkiem. Šīs formulas ir lietojamas tikai vienmērīgi palēninātai kustībai (idealizētam ieskriešanas-bremzēšanas modelim), izmantojot mehānisko spēku vidējos lielumus, kas iedarbojas uz lidmašīnu bremsēšanas momentā. Aprēķināt šos vidējos lielumus ir iespējams tikai pēc pilnīgas etapa pabeigšanas (pacelšanas/nosēšanas).

Reālos apstākļos lietot šīs metodes nebūs iespējams, jo bremsēšanas rezultāts ir jāprognozē pēc iespējas agrāk, lai atliktu laiks kļūdu labošanai. Turklāt paātrinājuma atkarība no laika gandrīz nekad nebūs analītiska izteiksme, kādēļ integrēt lielumus analītiski, lai atrastu apstāšanās momentu, nav iespējams.

Šajā situācijā vienīgā prognozēšanas iespēja, pēc autora ieskatiem, ir uzkrātās statistikas aproksimācija bremsēšanas procesā. Konkrēti, šajā gadījumā ir nepieciešams izmantot eksperimentālo punktu ekstrapolāciju M -tās pakāpes polinomā.

Ekstrapolācijas metodes ir līdzīgas ar interpolācijas metodēm, tās atšķiras tikai ar to, ka interesējošie momenti tiek aprēķināti aiz eksperimentālo punktu robežām, nevis starp tiem.



4.3. att. Eksperimentālo punktu ekstrapolācijas piemēri.

Visi mērījumi ir sanumurēti ar indeksu i , sākot no 0, kas atbilst nosēšanās momentam, beidzot ar r , kas atbilst pēdējam izpildītajam mērījumam. Visiem fizikāliem lielumiem tika piešķirts atbilstošs mērījuma indekss. Tātad, mūsu rīcībā ir sakārtotu pāru komplekts (t_i, a_i) , kur $i = 0, 1, 2, \dots, r$, un kur t_i ir laika brīdis, kurā tika veikts i -tais mērījums, savukārt a_i ir šajā mērījumā iegūtā paātrinājuma vērtība (atbilstošā palēninājuma vērtība ir $-a_i$). Mērķis ir atrast paātrinājumu, kā arī ātrumu un koordināti, ja $t > t_r$. Izmantojamais matemātiskais modelis ir skaitliskā ekstrapolācija.

Pēdējā mērījuma laika brīdis t_r ir arī tas brīdis, kad tiek sākta ekstrapolācija. Proti, ir jāņem vērā visjaunākie mērījumi $i = r, r-1$. No otras puses, informācijai, kas tika iegūta agrākajos mērījumos ($i = 0, 1, \dots$), var būt mazāka prognozēšanas nozīme, jo bremzēšanas spēki mēdz krasi mainīties (tika atslēgts reverss, nomainīts riteņa bremzēšanas spēks, vējš u. tml.). Izskatīsim formulas, kas būs piemērojamas, izmantojot pēdējos N mērījumus ($i = r, r-1, \dots, r-N+1$). Šeit N var būt izvēlēts pēc vajadzības. Ja N ir neliels (6 līdz 10), tiek izmantota tikai visjaunākā informācija, ja ir maksimāls $N = r+1$, tad tiek izmantoti visi rīcībā esošie mērījumi ($i = 0, 1, 2, \dots, r$). Turklāt formāts nemainās, izvēloties citu N .

Ekstrapolējošo funkciju izvēlamies kā algebrisko polinomu no laika [47, 237]:

$$a(t) = \sum_{j=0}^M c_j t^j = c_0 + c_1 t + \dots + c_M t^M, \quad (4.9)$$

kur: M – ir polinoma pakāpe.

Tāda izvēle ir attaisnota, jo konstanta paātrinājuma tuvinājumā $a(t) = const$ 4.9. formulu var izmantot, izvēloties $M = 0$, kas dod $a(t) = c_0$. Nākamie paņemti dati ($M = 1, 2, \dots$) ievēro korekcijas paātrinājumam mainīgo spēku dēļ. No otras puses, nebūtu lietderīgi izmantot pārāk lielu M . Tiešām, robežgadījumā, kad $M = N-1$, polinoms precīzi aprakstīs visas eksperimentālas vērtības, un stipri oscilēs starp eksperimentāliem punktiem un strauji aizies uz bezgalību aiz eksperimentālo punktu intervāla robežām. Pēdējā fakta dēļ tāds polinoms nav labi piemērots ekstrapolēšanas mērķiem. Līdzīgs efekts ir gaidāms, ja M ir mazliet mazāks par N , bet tam tuvojas.

Šādu apsvērumu rezultātā var secināt, ka optimālā M izvēle būtu robežās starp $1 \div 4$. Galīgā izvēle var tikt veikta metodes praktiskās lietošanās rezultātā atkarībā no tā, cik strauji realitātē mainās paātrinājums (vai ātrums).

Tātad, apskatām pēdējos N punktus $i = r, r-1, \dots, r-N+1$. Ērtībai pārsaucam par $k = i - r + N$.

Jaunais indekss mainās šādās robežās – $k = 1, 2, \dots, N$.

Lai atrastu vislabākās koeficientu c_j vērtības 4.9. formulā, aplūkosim šīs formulas kvadrātisko novirzi no eksperimentālajiem punktiem (t_i, a_i) [47, 237]:

$$\sum_{k=1}^N [a_i - a(t_i)]^2 = f(c_0, c_1, \dots, c_M) \quad (4.10.)$$

Kā skaidri redzams 4.10. vienādojumā, šī izteiksme ir kāda funkcija no parametriem c_j . Šīs funkcijas atvasinājumu pēc katra parametra pielīdzinot nullei, iegūstam normālu vienādojumu sistēmu [47, 237]:

$$\sum_{j=0}^M c_j S_{l+j} = T_l \quad (l = 0, 1, \dots, M) \quad (4.11.)$$

kur [47, 238]:

$$S_l = \sum_{k=1}^N t_k^l \quad \text{un} \quad T_l = \sum_{k=1}^N a_k t_k^l \quad (4.12.)$$

izvērsta veidā:

$$\begin{cases} \sum_{j=0}^M c_j S_j = T_0 \\ \sum_{j=0}^M c_j S_{j+1} = T_1 \\ \dots \\ \sum_{j=0}^M c_j S_{j+M} = T_M \end{cases} \quad (4.13.)$$

4.13. vienādojumu sistēmā visi lielumi S_l un T_l , $l = 0, 1, \dots, M$, ir zināmi, savukārt parametri c_j ir nezināmi; tos var aprēķināt ar šo vienādojumu palīdzību. 4.13. vienādojumu sistēma ir nehomogēnu lineāru algebrisku vienādojumu sistēma. Tās risināšanās paņēmieni ir labi izstrādāti. Ir arī standarta programmas zinātnisko programmu paketes (piemēram, *MATLAB*), ar kuru palīdzību var tās atrisināt.

Kad parametri c_j ir aprēķināti, tos var izmantot 4.9. vienādojumā, kas dos iespēju atrast meklēto paātrinājuma ekstrapolēšanas formulu.

Līdz ar to var iegūt arī ekstrapolēšanas formulas ātrumam un koordinātēm. Integrējot 4.9. vienādojumu, iegūst:

$$V(t) = \int \sum_{j=0}^M c_j t^j = \sum_{j=0}^M \frac{c_j}{j+1} t^{j+1} + const \quad (4.14.)$$

Atradīsim konstanti. Ja ir zināms V_r apskatāmajā brīdī t_r :

$$V(t_r) = V_r \quad (4.15.)$$

No otras puses, no 4.14. vienādojuma izriet:

$$V(t_r) = \sum_{j=0}^M \frac{c_j}{j+1} t_r^{j+1} + const \quad (4.16.)$$

Savietojot 4.15. un 4.16. vienādojumus, var atrast konstanti ($const$) un iegūt:

$$V(t) = V_r + \sum_{j=0}^M \frac{c_j}{j+1} [t^{j+1} - t_r^{j+1}]. \quad (4.17.)$$

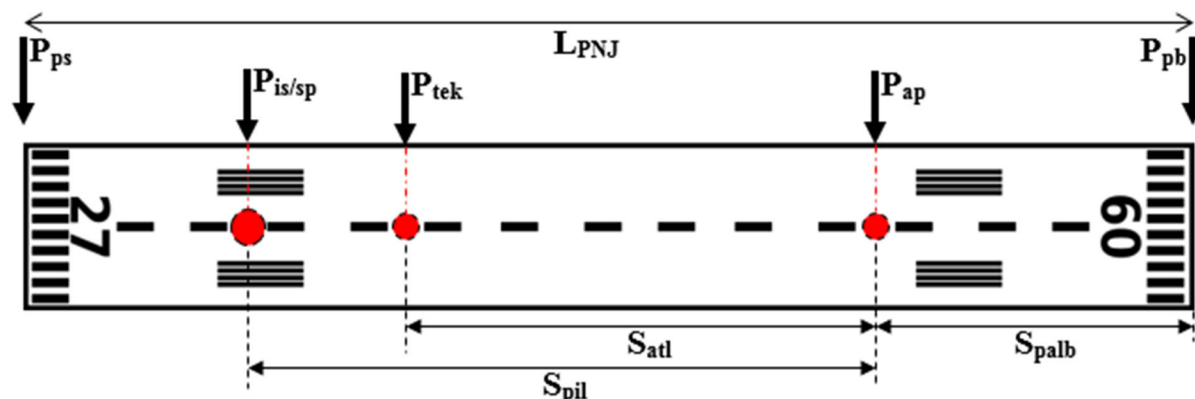
4.17. vienādojums ir ātruma ekstrapolēšanas formula. Tā dod iespēju atrast apstāšanās laika brīdī t_{stop} . Izvēloties laika brīžus t_{r+1}, t_{r+2}, \dots (jo $t_r < t_{r+1} < t_{r+2} < \dots$), mēs prognozēsim $V(t)$ uz priekšu, kamēr nebūs sasniegts $V(t) = 0$. Tās $t = t_{stop}$. Tas nozīmē, ka ir jāatrisina skaitliskais vienādojums $V(t_{stop}) = 0$.

Tagad ir iespējams atrast atlikušo bremsēšanas ceļu līdz apstāšanās brīdim (laikā momentā t_r). Integrējot 4.17. vienādojumu no t_r līdz t_{stop} , tiek iegūts atlikušais ceļš

$$S_{atl} = \int_{t_r}^{t_{stop}} V(t) dt = (V_r - \sum_{j=0}^M \frac{c_j}{j+1} t_r^{j+1})(t_{stop} - t_r) + \sum_{j=0}^M \frac{c_j}{(j+1)(j+2)} [t_{stop}^{j+2} - t_r^{j+2}] \quad (4.18.)$$

Pēc vairākām mēģinājumiem tika secināts, ka, lai ekstrapolētu paātrinājumu, ir nepieciešami vairāki GK sistēmu dati. Kamēr šādu datu nav, tālākai ierīces izstrādāšanai tiek piedāvāts ekstrapolēt tieši mērīto ātrumu.

4.3. Algoritms



4.4. att. Algoritmam nepieciešamie punktu un garumu apzīmējumi.

Lai izstrādātu algoritmu, ir nepieciešams atzīmēt noteiktus punktus uz PNJ.

Algoritma izstrādāšanās laikā tika piedāvāti šādi apzīmējumi (4.4. att.):

- P_{ps} – pacelšanās un nosēšanās joslas sākums;
- P_{pb} – pacelšanās un nosēšanās joslas beigas;
- $P_{is/sp}$ – GK ieskriešanās un saskaršanās sākuma punkts;
- P_{tek} – GK atrašanās vieta uz PNJ;
- P_{ap} – GK prognozējamais atrašanās jeb apstāšanās punkts;
- S_{atl} – ieskriešanās un bremsēšanas skrejceļa garuma atlikums;
- S_{pil} – ieskriešanās un bremsēšanas skrejceļa pilnais garums;
- S_{palb} – atlikušais attālums līdz PNJ beigām no atrašanās/apstāšanās punkta;
- L_{PNJ} – PNJ garums ($P_{pb} - P_{ps}$).

Pacelšanās skrejceļa aprēķināšanas algoritms

- 1) PNJ $P_{ps/pb}$ punkti tiek doti un ievadīti ierīces atmiņā.
- 2) Gaidām GK akcelerācijas sākumu.
- 3) Rakstām atmiņā sākuma ātrumu V_{sak} un GPS pozīcijas datus ($P_{is/sp}$).
- 4) Rakstām atmiņā paātrinājumu laika gaitā $a(t)$ ar noteiktu intervālu Δh .
- 5) Integrējot paātrinājumu $a(t)$, iegūstam ātrumu $V(t)$ un rakstām to atmiņā.

$$V_t = \int a_i dt \quad (4.19.)$$

- 6) Veicam $V(t)$ datu aproksimāciju.

$$A(t) = aproks(V_t) \quad (4.20.)$$

- 7) Skaitām atrašanās laika momentu t_{atr} (prognozējam, kad būs sasniegts v_2 ātrums).

$$A(t_{atr}) = v_2 = v_{atr}, \quad (4.21.)$$

kur: t_{atr} – prognozējamais atrašanās laiks, kad ātruma funkcija būs vienāda ar atrašanās ātrumu v_{atr} .

- 8) Integrējot ātrumu $V(t)$, skaitām atlikušo skrejceļa garumu S_{atl} līdz pacelšanās brīdim.

$$s_{atl} = \int_{t_{tek}}^{t_{atr}} dt \int a_i dt \quad (4.22.)$$

- 9) Atrašanās vietu P_{tek} var atrast, integrējot ātrumu no 0 līdz konkrētam laikam.

$$P_{tek} = \int_{t_0}^{t_{tek}} dt \int_{t_0}^{t_{tek}} a_i dt \quad (4.23.)$$

- 10) Aprēķinām, salīdzinām un izvadām informāciju par plānoto GK atrašanās vietu atrašanās momentā. Skrejceļa nepietiekamības gadījumā brīdinām apkalpi.

$$P_{ps} + P_{is/sp} + P_{tek} + S_{atl} < L_{PNJ} \quad (4.24.)$$

- 11) Lidojot virs tuvās radiobākas (TRB), nepieciešamības gadījumā izslēdzam ierīci.

Nosēšanās skrejceļa aprēķināšanas algoritms

- 1) PNJ $P_{ps/pb}$ punkti tiek doti un ievadīti ierīces atmiņā.
- 2) Lidojot virs tuvās radiobākas (TRB), ieslēdzam ierīci gatavības režīmā.
- 3) Gaidām *PSEU* devēja signālu (šasijas stāvokļa sensors).
- 4) Rakstām atmiņā nosēšanās ātrumu V_{nos} un *GPS* pozīcijas datus ($P_{is/sp}$).
- 5) Rakstām atmiņā paātrinājumu laika gaitā $a(t)$ ar noteikto intervālu Δh .
- 6) Integrējot paātrinājumu $a(t)$, iegūstam ātrumu $V(t)$ un rakstām to atmiņā.

$$V_t = \int a_t dt \quad (4.25.)$$

- 7) Veicam integrēto ātruma datu aproksimāciju.

$$A(t) = aproks(V_t) \quad (4.26.)$$

- 8) Aprēķinām apstāšanās laika momentu, kad $V_{stop} = 0$.

$$A(t_{stop}) = V_{stop} = 0 \quad (4.27.)$$

kur: t_{stop} – prognozējamais apstāšanās laiks, kad ātruma funkcija būs vienāda ar nulli.

- 9) Integrējot ātrumu $V(t)$, skaitām atlikušo ceļu garumu līdz apstāšanās momentam.

$$S_{atl} = \int_{t_{tek}}^{t_{stop}} dt \int_{t_{tek}}^{t_{stop}} a_i dt \quad (4.28.)$$

kur: t_{tek} – konkrētais laika moments;

t_{stop} – prognozējamais apstāšanās laiks.

- 10) Atrašanās vietu P_{tek} var atrast, integrējot ātrumu no 0 līdz konkrētam laikam.

$$P_{tek} = \int_{t_0}^{t_{tek}} dt \int_{t_0}^{t_{tek}} a_i dt \quad (4.29.)$$

- 11) Aprēķinām, salīdzinām un izvadām informāciju par plānoto GK atrašanos vietu apstāšanās momentā. Skrejceļa nepietiekamības gadījumā brīdinām apkalpi.

$$P_{ps} + P_{is/sp} + P_{tek} + S_{atl} < L_{PNJ} \quad (4.30.)$$

Elektriskās shēmas grafiskais attēlojums

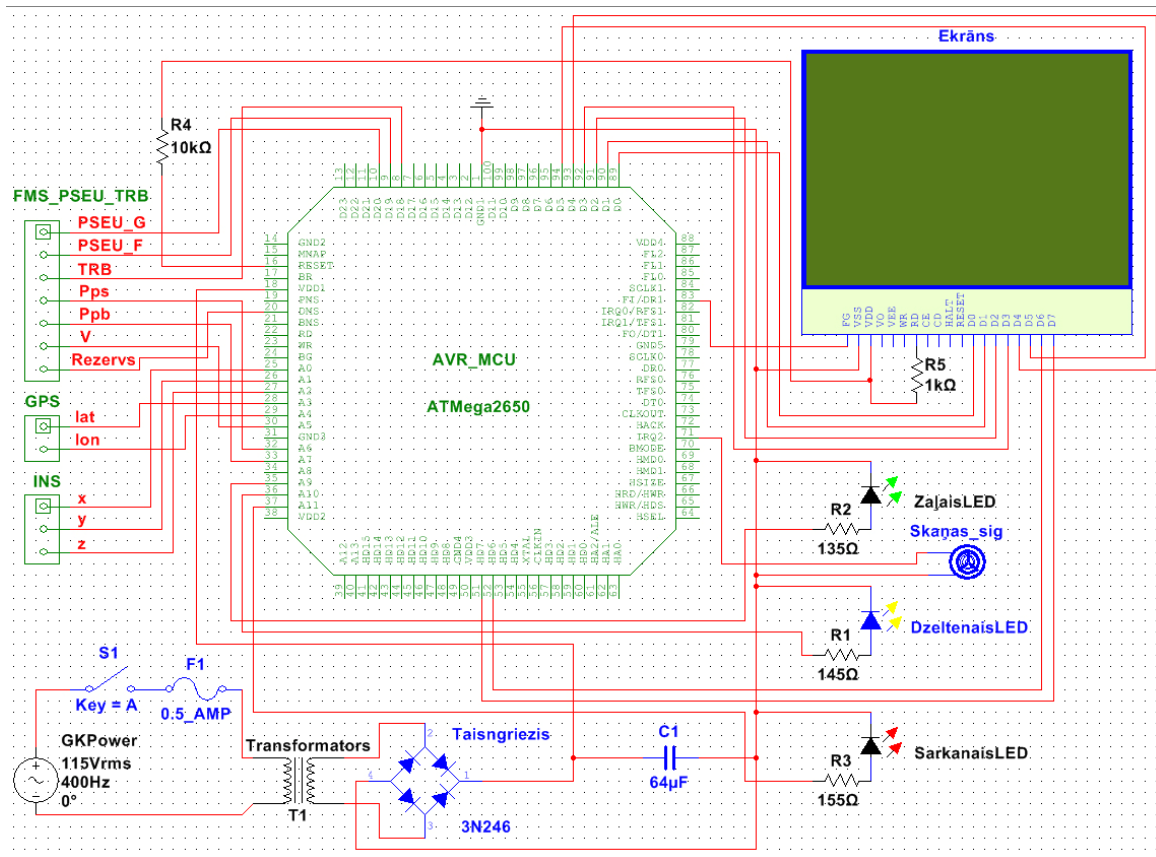
Elektriskās shēmas izstrādāšanai izvēlēta *MultiSIM* un *NI Ultiboard* programmatūra. *MultiSIM* vidē nav iespējams izvēlēties *AVR* ražotāja mikrokontrollerus, tāpēc izvēlēts līdzīgs, ar 100 tapām (*ADSP-2111-PQFP(100)*). Mikrokontrolleri galvenokārt atšķiras ar iekšējo uzbūvi (atmiņas daudzumu, iebūvētam funkcijām, komponentiem u. tml.), to darbības princips būtībā ir vienāds.

Izmantoto komponentu saraksts apkopots 4.3. tabulā.

Izmantoto komponentu saraksts

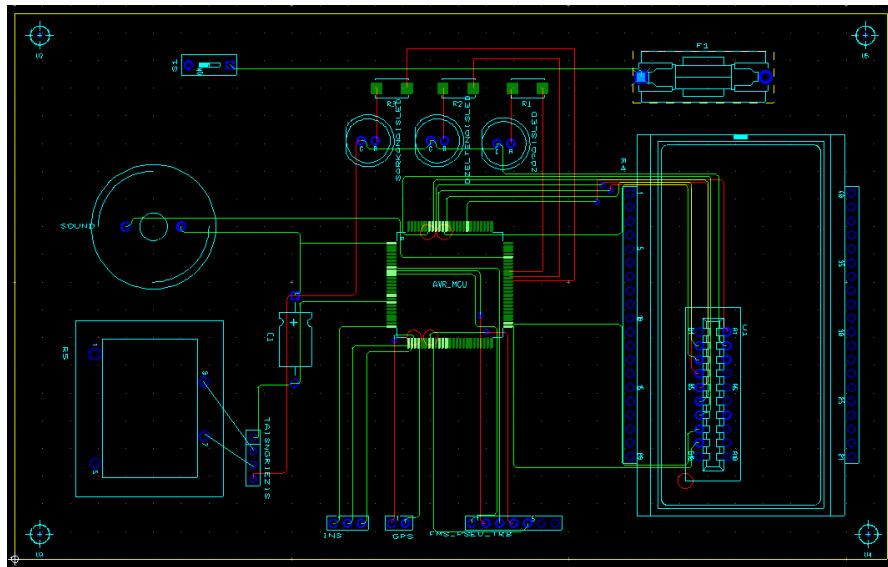
Daudzums	Nosaukums
1	ATMega2650 MCU analogs
3	Savienotāji HDRIX2, HDRIX3, HDRIX7
1	Transformators T1
1	Diodes taisngriezis 3N246
1	Kondensators C1 64 μ F
1	LCD ekrāns GRAPH LCD M
1	Skaņas signalizators SONALERT
1	Drošinātājs F1
3	Gaismas diodes trīs krāsās
5	Dažāda nomināla rezistori R1–R5
1	Ieslēgšanas spiedpoga S1

Elektriskā shēma redzama 4.5. attēlā.



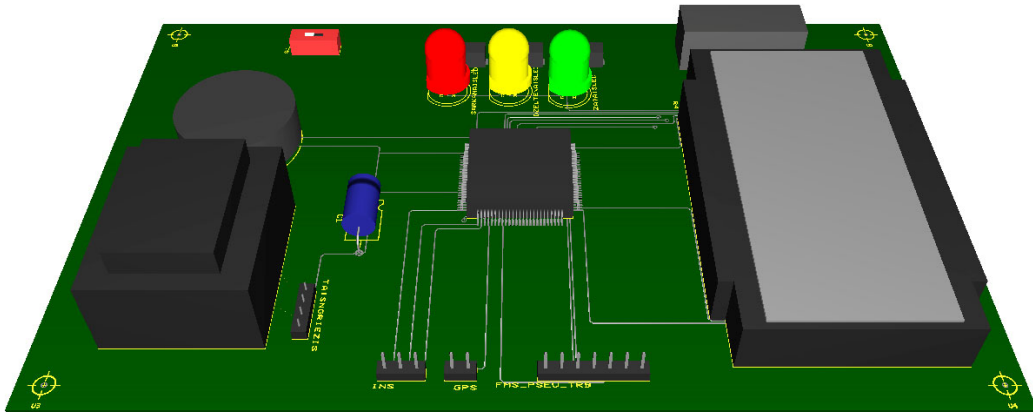
4.5. att. Elektriskā shēma izveidotā *MultiSIM* programmatūrā.

Komponentu izvietojums platē redzams 4.6. attēlā.



4.6. att. Elektriskā plate izveidotā *Ultiboard* programmatūrā.

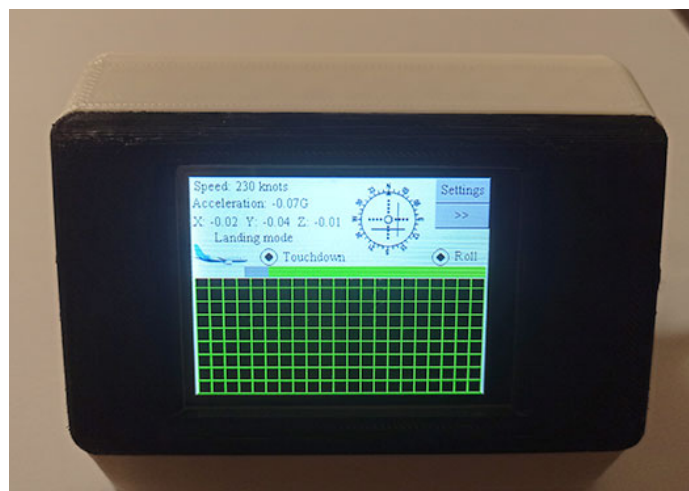
Trīsdimensiju attēls redzams 4.7. attēlā.



4.7. att. Trīsdimensiju plates apskate.

Šajā gadījumā var uzskatīt, ka elektriskā shēma der arī *Arduino MK* ierīces uzbūvei.

Nepieslēdzamu (neatkarīgu) ierīču projektēšanas laikā ir jāpieslēdz tikai nepieciešamie komponenti (akselometrs, GPS uztvērējs u. tml.) GK sistēmas izejas datu vietā, kā arī jāpārreķina barošanas sistēma, ja elektroapgādes avots tiek mainīts.



4.8. att. Ierīce korpusā.

5. PROTOTIPA LIETOŠANA, IEGŪTIE DATI, EKSPERIMENTS

5.1. Pirmais eksperiments. Izanalizēt reālu lidojumu, noskaidrojot iespējamību pronozēt skrejceļa pietiekamību līdz PNJ beigām

Uzbūvētā ierīce ieraksta datus atmiņā 10 reizes sekundē. Eksperimenta ideja ir šāda:

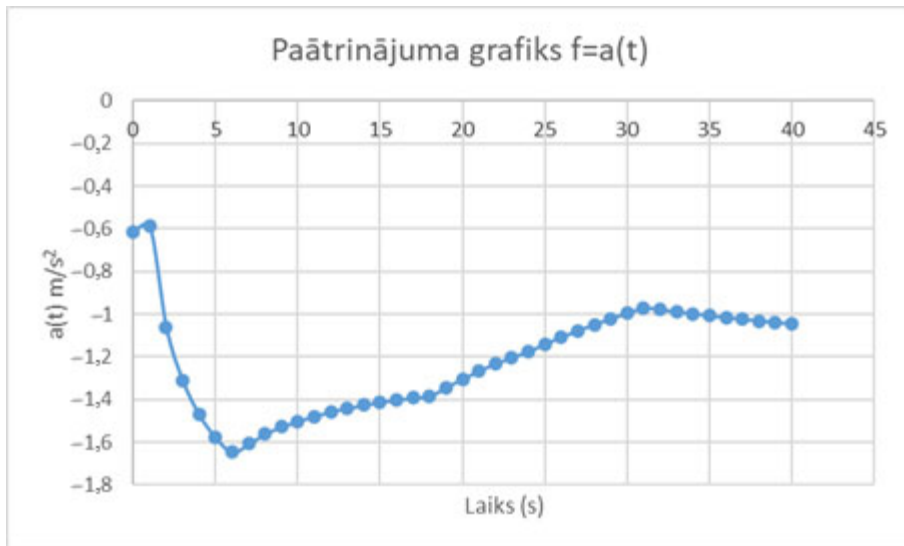
- 1) atmiņā ierakstām reālus datus;
- 2) pēc lidojuma analizējam iegūtos datus;
- 3) salīdzinām iepriekšminēto metodoloģijas modelēšanas rezultātu ar īstiem datiem (noņemtiem no sensoriem), nosakot kļūdu starp aprēķinātā skrejceļā atlikumu un tiem datiem, kas bija šajā lidojumā.

5.1. tabula

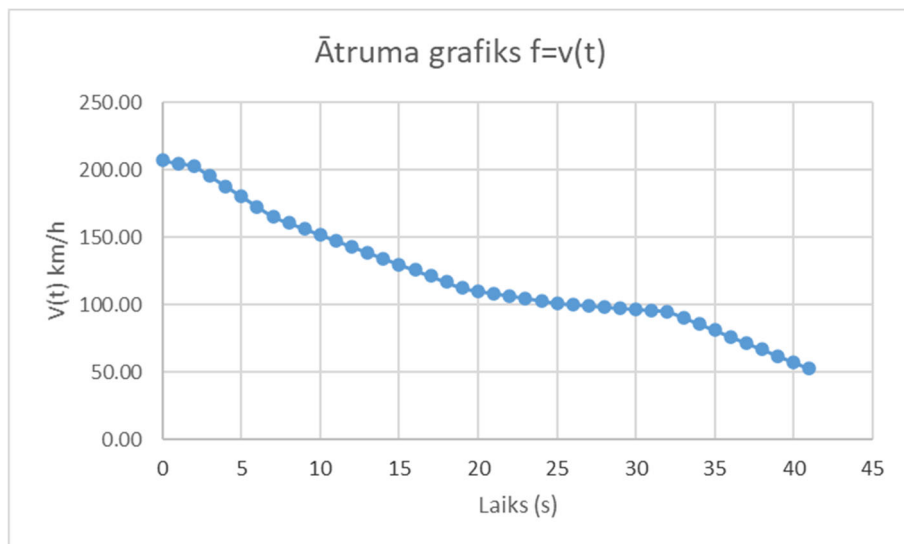
Piemērs kā izskatās ierakstīti un aprēķināti dati

Time	Accel	Longitude	Latitude	V (km/h)	V (m/s)	S _{GPS} (m)	a _{TOTAL} (m/s ²)	S _{div} (a(V))	S _{APR} (m)	Error %
0	-0,09	E023 58.14	N56 54.67	207,05	57,51	0,00	0	0		
1	-0,13	E023 58.15	N56 54.70	204,83	56,90	52,33	-0,612398926	57,2038		
2	-0,11	E023 58.15	N56 54.73	202,79	56,33	104,77	-0,589144133	113,8417	2322,724	56,96
3	-0,16	E023 58.17	N56 54.76	195,57	54,33	167,01	-1,061541068	167,7531	2294,305	55,04
4	-0,23	E023 58.17	N56 54.76	188,16	52,27		-1,310600657	219,5552	2115,666	42,97
5	-0,13	E023 58.17	N56 54.79	180,57	50,16	224,62	-1,470325308	269,1709	1952,869	31,97
6	-0,11	E023 58.17	N56 54.81	172,98	48,05	263,63	-1,576808408	316,6774	1930,008	30,42
7	-0,13	E023 58.17	N56 54.84	165,57	45,99	315,34	-1,645518553	362,2548	1891,264	27,80
8	-0,11	E023 58.18	N56 54.87	160,75	44,65	373,64	-1,607023312	408,6553	1841,704	24,45
9	-0,12	E023 58.18	N56 54.90	156,49	43,47	425,99	-1,559934407	454,4127	1793,821	21,22
10	-0,17	E023 58.20	N56 54.93	152,05	42,24	488,24	-1,527407732	498,7296	1754,231	18,54
11	-0,12	E023 58.20	N56 54.93	147,60	41,00		-1,500794997	541,8119	1725,416	16,60
12	-0,14	E023 58.20	N56 54.96	143,16	39,77	545,85	-1,478617719	583,6595	1701,211	14,96
13	-0,14	E023 58.21	N56 54.99	138,90	38,58	600,50	-1,455895061	624,6069	1689,989	14,20
14	-0,12	E023 58.21	N56 54.99	134,46	37,35		-1,440093103	664,0109	1680,442	13,56
15	-0,13	E023 58.21	N56 55.02	130,01	36,11	656,19	-1,426398073	702,1802	1644,790	11,15
16	-0,11	E023 58.21	N56 55.05	125,75	34,93	706,59	-1,411199642	739,5264	1618,410	9,36
17	-0,1	E023 58.21	N56 55.05	121,31	33,70		-1,400815407	775,2522	1591,578	7,55
18	-0,07	E023 58.21	N56 55.08	116,86	32,46	770,09	-1,391584977	809,7432	1565,137	5,76
19	-0,07	E023 58.21	N56 55.11	112,42	31,23	821,80	-1,383326170	842,9996	1541,368	4,16
20	-0,07	E023 58.21	N56 55.11	110,38	30,66		-1,342454329	881,7091	1543,629	4,31
21	-0,02	E023 58.23	N56 55.14	108,53	30,15	879,11	-1,303025306	920,3929	1564,689	5,73
22	0,01	E023 58.23	N56 55.14	106,86	29,68		-1,264842354	959,1282	1599,895	8,11
23	-0,02	E023 58.23	N56 55.17	105,01	29,17	938,20	-1,232216376	996,8088	1633,684	10,40
24	-0,04	E023 58.23	N56 55.17	103,16	28,65		-1,202309230	1033,975	1653,185	11,71
25	0,00	E023 58.24	N56 55.20	101,30	28,14	994,30	-1,174794655	1070,627	1647,967	11,36
26	-0,02	E023 58.24	N56 55.20	100,38	27,88		-1,139503415	1110,108	1650,242	11,52
27	-0,02	E023 58.24	N56 55.22	99,45	27,63	1030,00	-1,106826341	1149,332	1658,367	12,06
28	-0,03	E023 58.24	N56 55.22	98,53	27,37		-1,076483345	1188,299	1669,728	12,83
29	-0,04	E023 58.24	N56 55.25	97,60	27,11	1080,00	-1,048232968	1227,008	1679,916	13,52
30	-0,07	E023 58.24	N56 55.25	96,86	26,91		-1,020151134	1266,232	1687,497	14,03
31	-0,12	E023 58.24	N56 55.28	95,93	26,65	1140,00	-0,995540530	1304,453	1686,421	13,96
32	-0,11	E023 58.24	N56 55.28	95,01	26,39		-0,972468090	1342,416	1684,874	13,86
33	-0,11	E023 58.26	N56 55.31	90,75	25,21	1200,00	-0,978854607	1364,844	1656,216	11,92
34	-0,13	E023 58.26	N56 55.31	85,93	23,87		-0,989404667	1383,464	1610,513	8,83
35	-0,12	E023 58.26	N56 55.34	81,30	22,58	1250,00	-0,997882023	1401,647	1564,167	5,70
36	-0,14	E023 58.26	N56 55.34	76,49	21,25		-1,007317429	1417,618	1526,232	3,14
37	-0,15	E023 58.27	N56 55.34	71,77	19,93		-1,015547617	1432,728	1502,381	1,52
38	-0,13	E023 58.27	N56 55.37	67,04	18,62	1310,00	-1,023344637	1446,525	1494,569	1,00
39	-0,13	E023 58.27	N56 55.37	62,30	17,31		-1,030873719	1458,911	1489,550	0,66
40	-0,14	E023 58.27	N56 55.37	57,43	15,95		-1,038926625	1469,259	1484,211	0,30
41	-0,14	E023 58.27	N56 55.37	52,84	14,68		-1,044704591	1479,836		

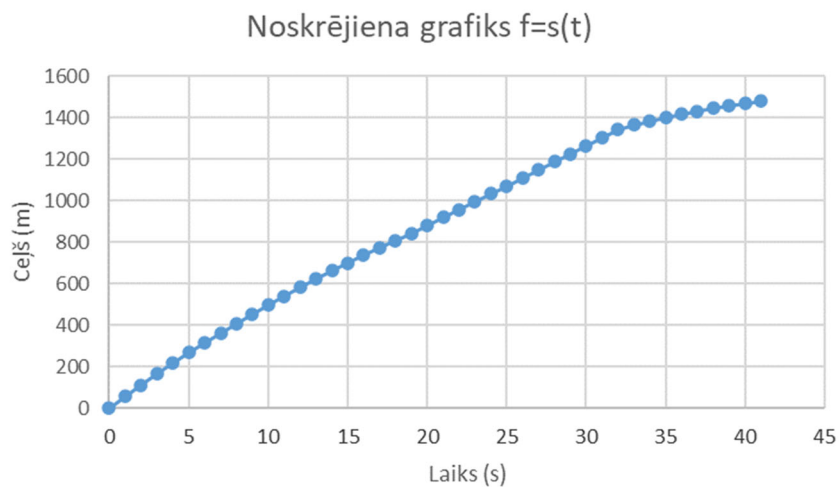
Grafiski attēloti dati izskatās šādi.



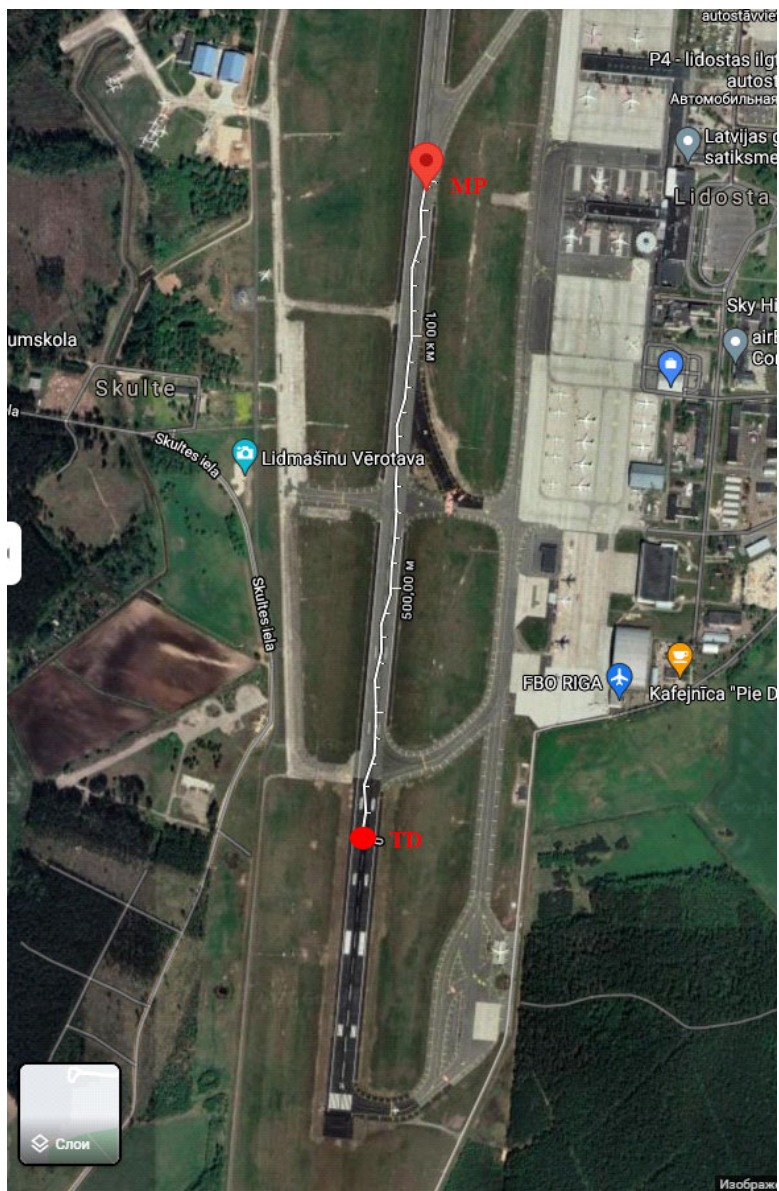
5.1. att. Paātrinājuma maiņa laika gaitā.



5.2. att. Ātruma maiņa laika gaitā.

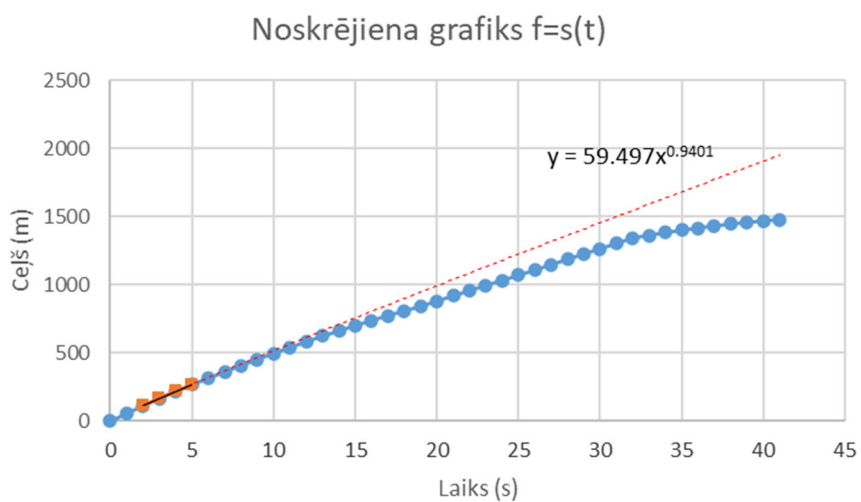


5.3. att. Noskrējiena maiņa laika gaitā.



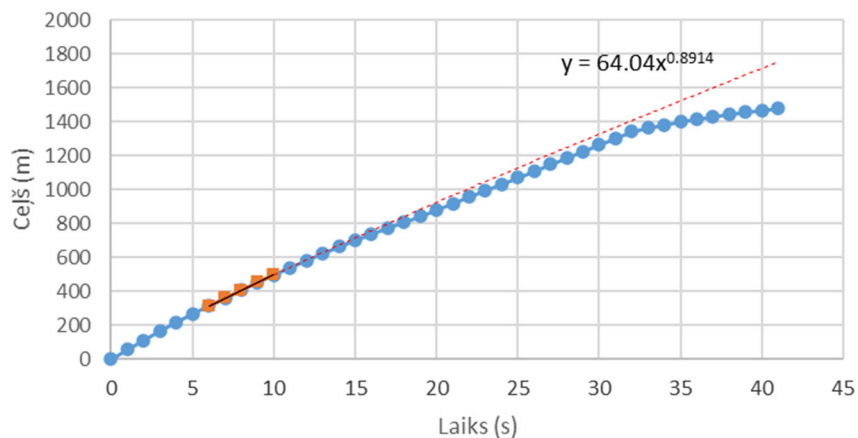
5.4. att. Noskrējiena rezultāts, iegūts ar *GPS* uztvērēju.

Prognozētais ceļš līdz apstāšanās (manevrēšanas) punktam (zilā līnija – iegūtie jeb faktiskie dati; sarkanā līnija – aprēķinātie jeb prognozējami dati, iegūti ar interpolācijas palīdzību):



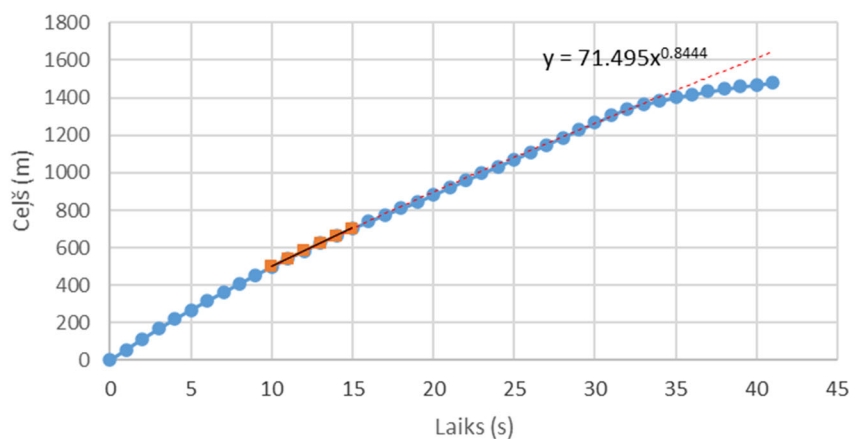
5.5. att. Interpolēts aprēķinātais prognozējamais ceļš 5. sekundē $S_{5s} = 1952,869$ m.

Noskrējiena grafiks $f=s(t)$



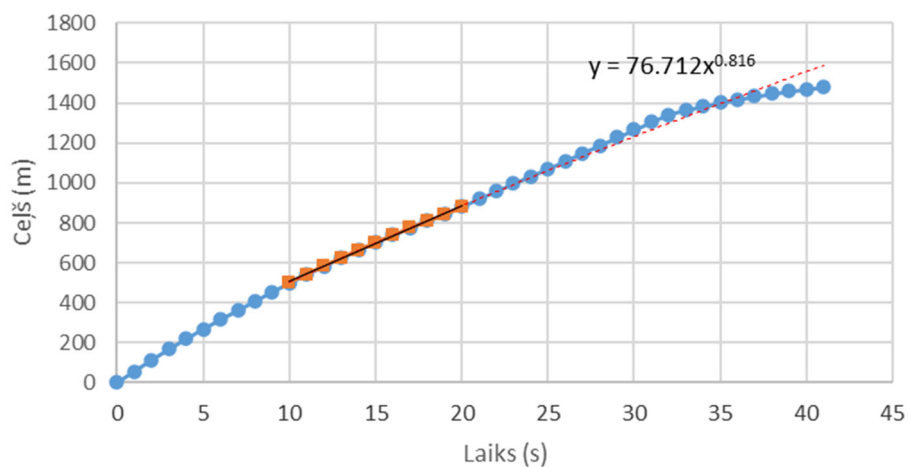
5.6. att. Interpolēts aprēķinātais prognozējamais ceļš 10. sekundē $S_{10s} = 1754,231$ m.

Noskrējiena grafiks $f=s(t)$



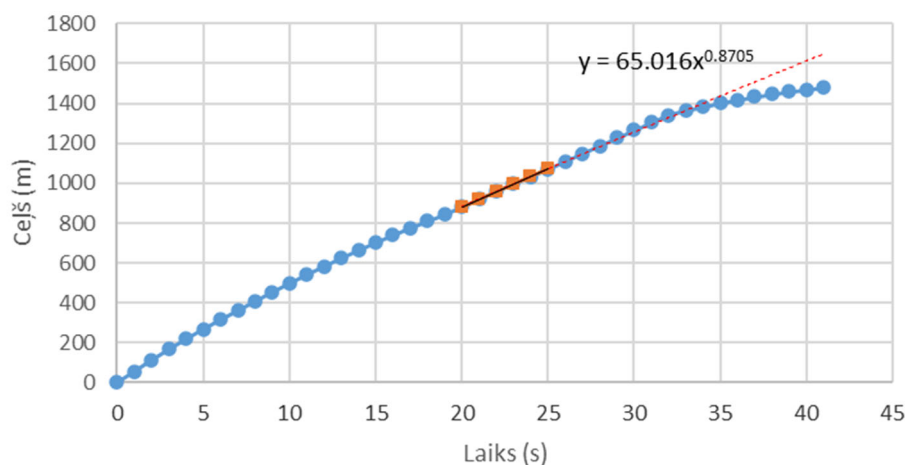
5.7. att. Interpolēts aprēķinātais prognozējamais ceļš 15. sekundē $S_{15s} = 1644,79$ m.

Noskrējiena grafiks $f=s(t)$



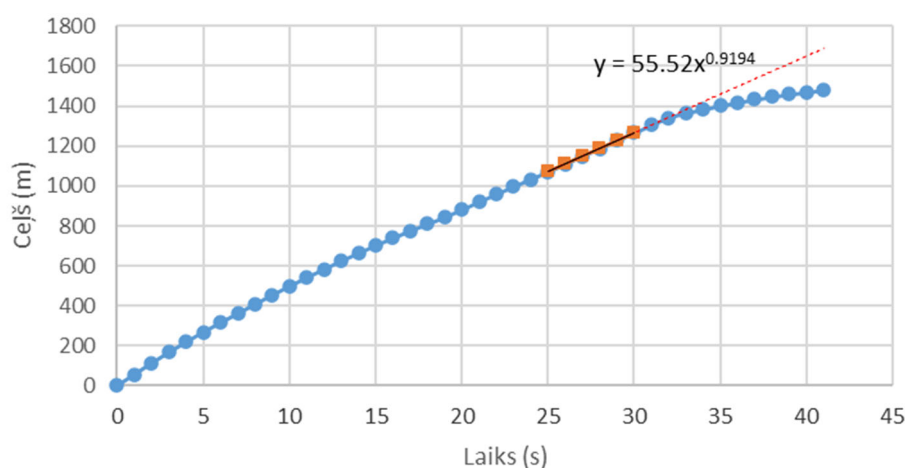
5.8. att. Interpolēts aprēķinātais prognozējamais ceļš 20. sekundē $S_{20s} = 1588,162$ m.

Noskrējiena grafiks $f=s(t)$



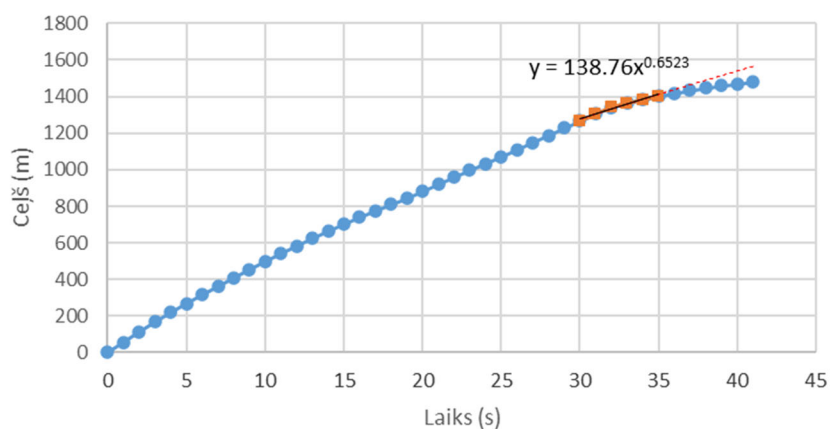
5.9. att. Interpolēts aprēķinātais prognozējamais ceļš 25. sekundē $S_{25s} = 1647,967$ m.

Noskrējiena grafiks $f=s(t)$

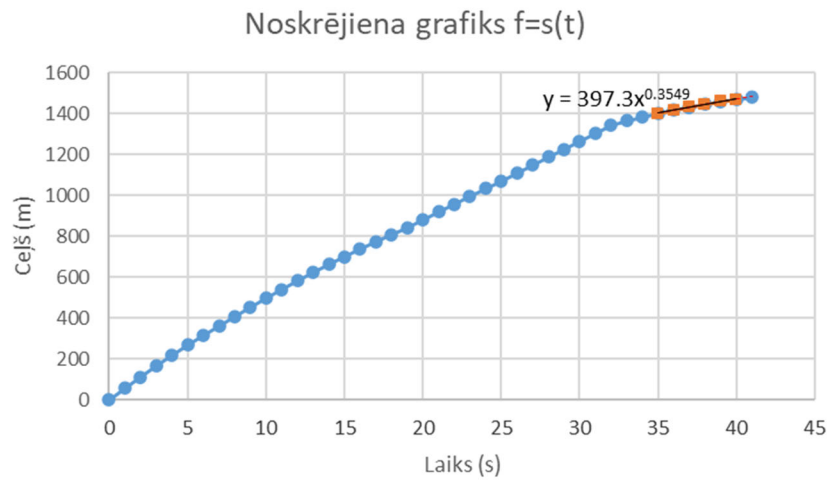


5.10. att. Interpolēts aprēķinātais prognozējamais ceļš 30. sekundē $S_{30s} = 1687,497$ m.

Noskrējiena grafiks $f=s(t)$

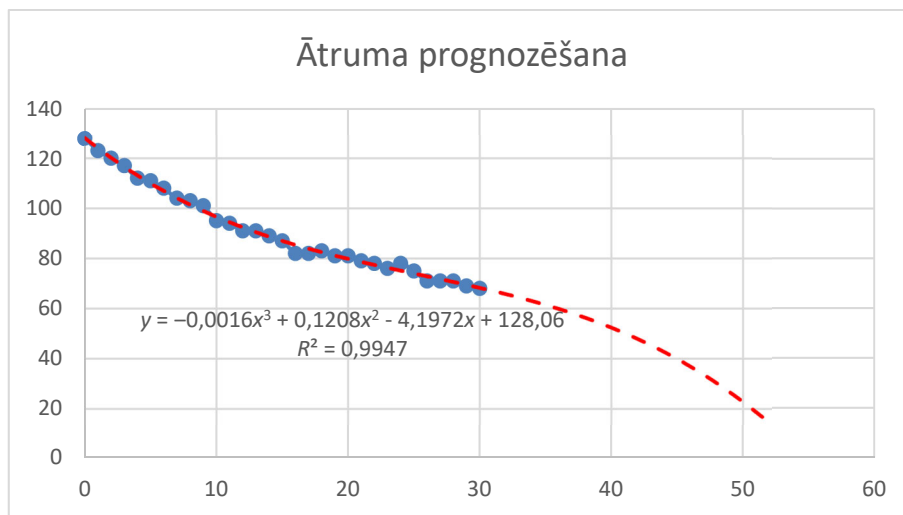


5.11. att. Interpolēts aprēķinātais prognozējamais ceļš 35. sekundē $S_{35s} = 1564,167$ m.

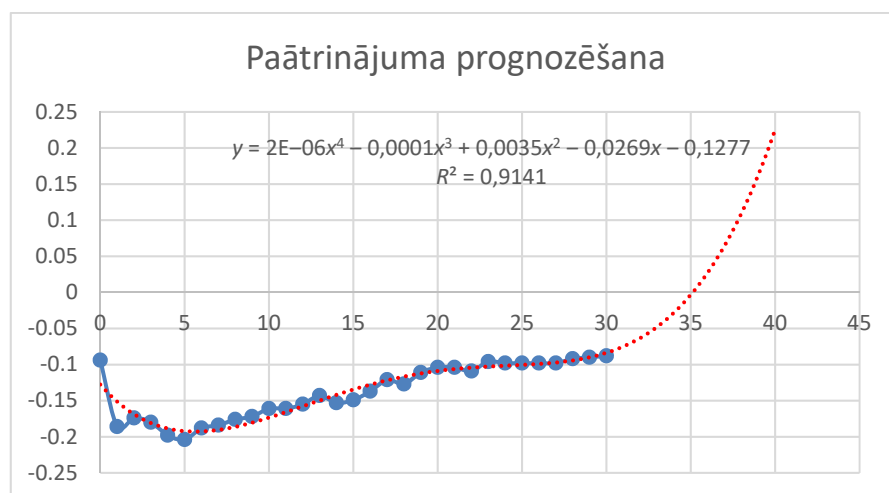


5.12. att. Interpolēts aprēķinātais prognozējamais ceļš 40. sekundē $S_{40s} = 1484,211$ m.

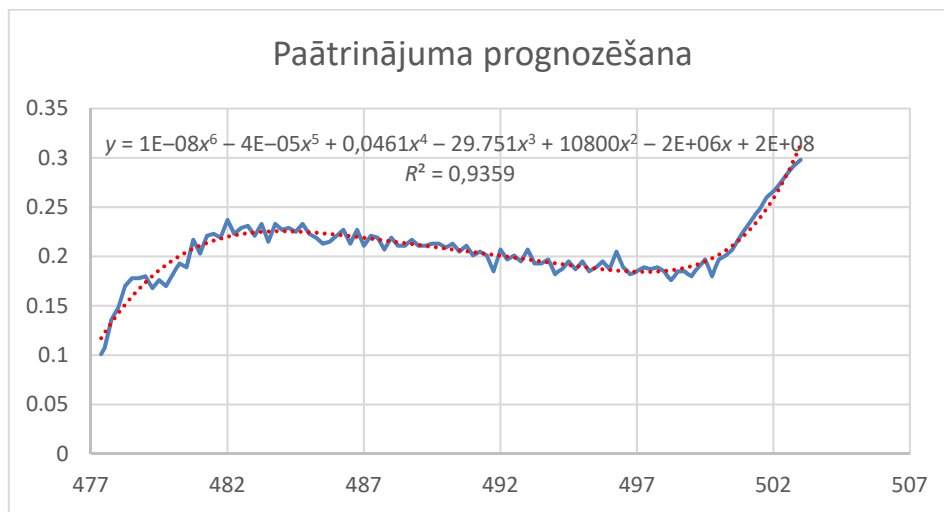
Citā eksperimentā iegūto datu piemēri un prognožu rezultāti, attēloti grafiskā veidā



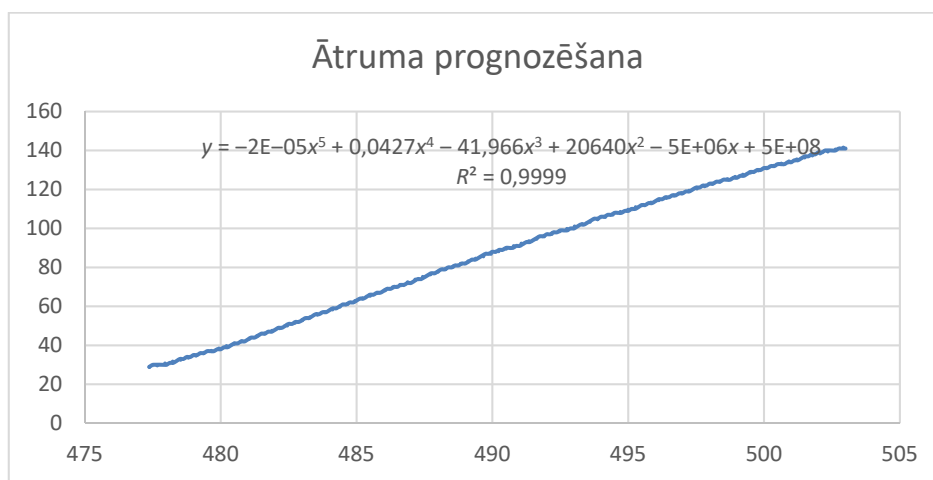
5.13. att. Ātruma prognozēšanas piemērs bremsēšanas etapā.



5.14. att. Paātrinājuma prognozēšanas piemērs bremsēšanas etapā.



5.15. att. Paātrinājuma prognozēšanas piemērs noskrējiena etapā.



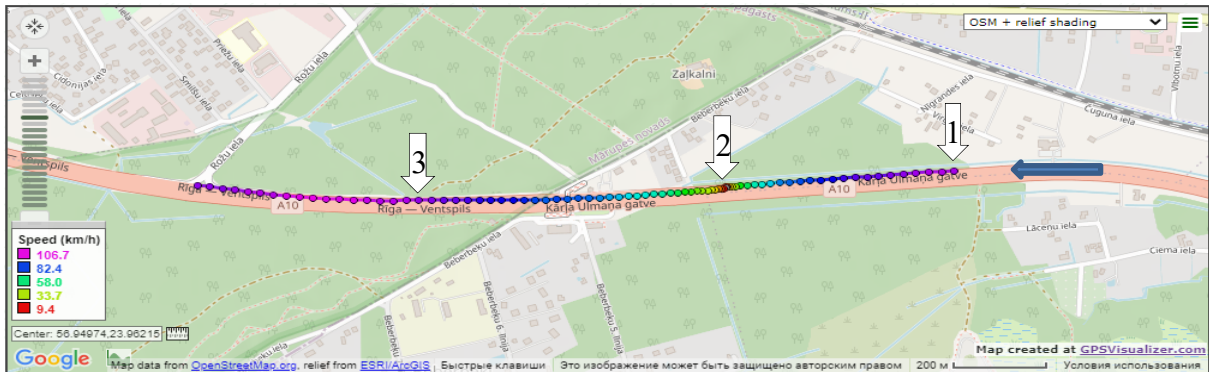
5.16. att. Ātruma prognozēšanas piemērs noskrējiena etapā.

5.2. Otrais eksperiments. Promocijas darba galvenā mērķa iespējamības analīze

Iepriekš aprakstītais eksperiments liecina, ka ierīce spēj aprēķināt ceļu un to praksē var izmantot, lai prognozētu pacelšanās/nosēšanās rezultātu. Ja ar atlikušo ceļu ir par maz, vajadzēs vairāk bremzēšanas spēka. Vairāki negadījumi, kas saistīti ar izbraukšanu aiz/no PNJ, ir saistīti ar pilota kļūdām un tehniskām problēmām. Galvenā priekšrocība šāda tipa ierīces ieviešanai praksē ir tāda, ka ierīce var prognozēt problēmu daudz reižu ātrāk, nekā to var izdarīt cilvēks, kā arī darīt to tādos laika apstākļos, kad cilvēks vispār nevar to aprēķināt un attiecīgi rīkoties. Protams, ir jāsaprot, ka dažos gadījumos nebūs pietiekami tikai zināt, ka ar ceļa garums ir par īsu vai notiek sānu izbraukšana. Šādos gadījumos būs jāizmanto papildierīces, lai pareizi un laikus nobremzētu lidmašīnu, ar ko vairāki mūsdienu lidaparāti nav aprīkoti. Promocijas darba izstrādātā ideja ir tikai pirmais solis, kas palīdzēs krietni paaugstināt lidojuma drošību.

Piedāvāto metodi var izmantot arī ikdienā. Runa ir par pacelšanās un nosēšanās etapiem, kur, zinot, ka ir iespējams paspēt sabremzēt vai atrauties no zemes, speciāli palielina noskrieto skrejceļa garumu (vājāk bremzējot un pazeminot dzinēja jaudu). Iepriekšējā eksperimenta pašā sākumā iegūtais rezultāts ar "kļūdu" 56,96 % rāda ne to, ka aprēķins ir bezjēdzīgs un nepareizs, bet to, ka, ja bremzēšanas spēki, kas ir šajā momentā nemainīsies, turpmāk lidmašīna apstāsies pēc 2322 m, un, ja skrejceļa garums ir 3,2 km, var vairs neko nedarīt (apstāšanās notiks pirms skrejceļa beigām), un pretēji, ja ar skrejceļu nepietiek, jābremzē stiprāk. Jāņem vērā, ka piloti nekontrolēja procesu pēc darbā piedāvātās metodes un paātrinājums laika gaitā krietni mainījās, par ko liecina eksperimenta rezultāts, jo mainās arī aprēķinātais rezultāts.

Otrajā eksperimentā veiksīm darba galvenā uzdevumam pārbaudi, mēģināsim sasniegt noteikto ātrumu noteiktajā punktā un sabremzēt līdz noteiktam ātrumam noteiktajā punktā. Nepārkāpjot lidojumu drošības noteikumus, īstenojot šo eksperimentu ar reālu lidmašīnu nav iespējams, tāpēc tika nolemts veikt eksperimentu ar parastu automobili.



5.17. att. Eksperimenta skrejceļa trajektorija.

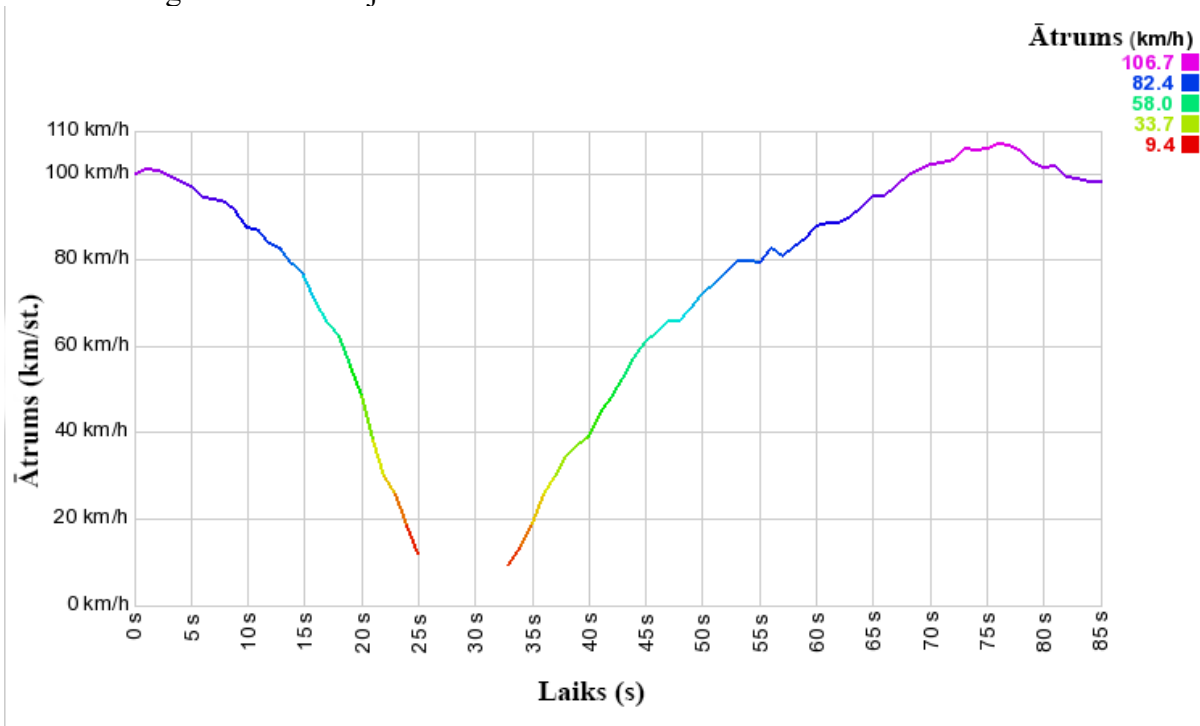
Eksperimenta ideja redzama 5.17. attēlā.

1. Ierīcē ievadīti parametri – sabremzēties no 100 km/h līdz 0–10 km/h un uzreiz pēc tam paātrināties līdz 100 km/h. Punkts, kur jāsāk bremzēt, atzīmēts ar “1” (E23,974497, N56,950203), apstāšanās un sekojošs paātrinājuma sākumpunkts “2” (E23,966328, N56,949825), kur jāsasniedz ātrumu 0–10 km/h. Sasniegt ātrums 100 km/h ir jāsasniedz punktā “3” (E23,955357, N56,949533). Ceļa garums no “1” līdz “2” ir 500 metru, no “2” līdz “3” – 700 metru.
2. Sasniedzam ātrumu 100 km/h līdz punktam “1” un saglabājam.
3. Ierīce signalizē punktā “1”, kas nozīmē, ka atskaite sākas un ir jābremzē saskaņā ar ierīces norādījumiem ekrānā labajā pusē (jācenšas turēt rombiņš pa vidu apakšējā pusē).
4. Punktā “2” ierīce izdod divas skaņas signālus un gaida paātrinājuma uzsākšanu radot rombiņu pašā augšā, kas nozīmē nepieciešamību palielināt paātrinājumu.
5. Paātrinoties no punkta “2” līdz punktam “3”, jācenšas turēt rombiņš pa vidu augšējā pusē).

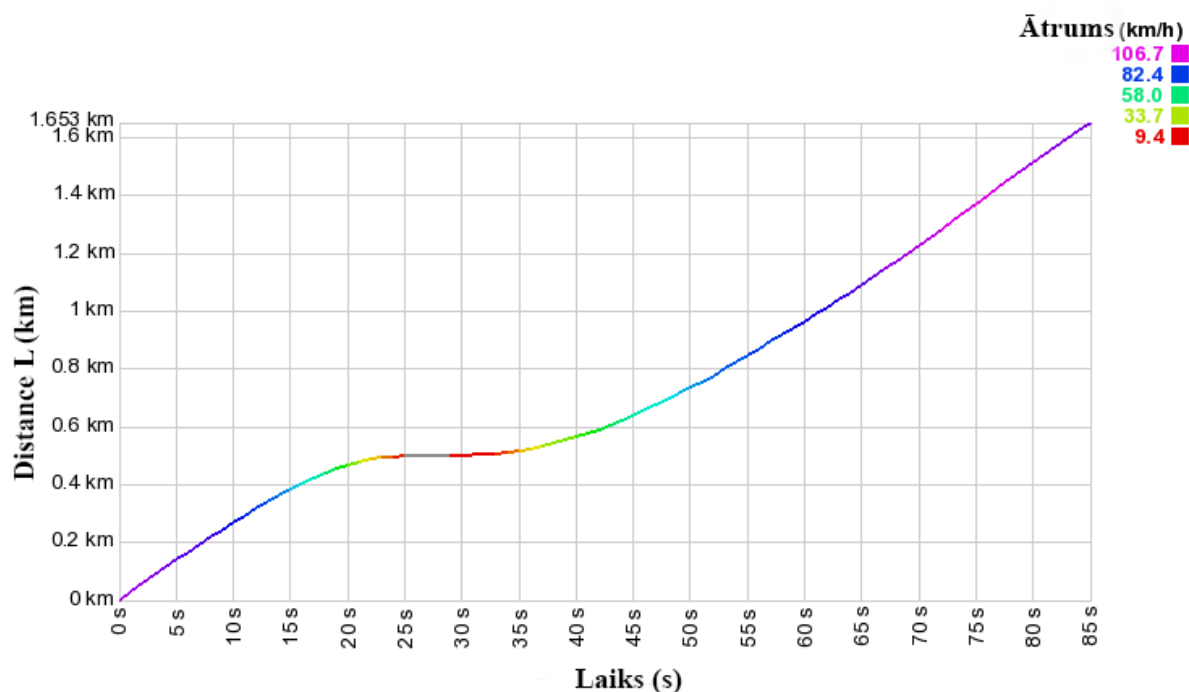
Otrā eksperimenta rezultāti

Time	Longitude	Latitude	a _{TOTAL} (m/s ²)	V (km/h)	V (m/s)	Rec	L (km)										
1	23,974497	56,950203	0,29313	100,10	27,81	-1	0,000	44	23,964350	56,949702	0,39282	59,80	16,61	5	0,621		
2	23,974037	56,950180	0,30113	101,20	28,11	-3	0,028	45	23,964072	56,949688	0,39273	61,20	17,00	4	0,638		
3	23,973573	56,950160	0,26168	102,00	28,33	-5	0,056	46	23,963775	56,949673	0,40931	65,30	18,14	5	0,656		
4	23,973120	56,950140	-0,04777	99,60	27,67	-5	0,084	47	23,963468	56,949653	0,41490	67,70	18,81	6	0,675		
5	23,972670	56,950122	-0,09138	98,80	27,44	-6	0,112	48	23,963167	56,949642	0,39662	66,10	18,36	7	0,693		
6	23,972227	56,950100	-0,15088	97,40	27,06	-4	0,139	49	23,962845	56,949627	0,41556	70,80	19,67	6	0,713		
7	23,971800	56,950085	-0,29703	93,70	26,03	-5	0,165	50	23,962515	56,949612	0,41671	72,50	20,14	5	0,733		
8	23,971375	56,950063	-0,26253	93,50	25,97	-6	0,191	51	23,962172	56,949600	0,42393	75,30	20,92	4	0,754		
9	23,970952	56,950042	-0,24708	93,00	25,83	-5	0,216	52	23,961820	56,949592	0,42597	77,20	21,44	5	0,775		
10	23,970533	56,950022	-0,2474	92,10	25,58	-3	0,242	53	23,961425	56,949580	0,46853	86,70	24,08	5	0,800		
11	23,970132	56,950005	-0,33377	88,10	24,47	-4	0,267	54	23,961050	56,949577	0,43610	82,20	22,83	5	0,822		
12	23,969737	56,949988	-0,33626	86,80	24,11	-3	0,291	55	23,960668	56,949565	0,43626	83,80	23,28	6	0,846		
13	23,969350	56,949972	-0,3499	85,00	23,61	-4	0,314	56	23,960273	56,949553	0,44297	86,70	24,08	6	0,870		
14	23,968972	56,949955	-0,36358	83,10	23,08	-4	0,337	57	23,959888	56,949538	0,42464	84,60	23,50	5	0,893		
15	23,968608	56,949942	-0,4011	79,90	22,19	-4	0,360	58	23,959510	56,949537	0,40842	82,80	23,00	4	0,916		
16	23,968255	56,949925	-0,41696	77,60	21,56	-6	0,381	59	23,959122	56,949533	0,41192	85,00	23,61	5	0,940		
17	23,967928	56,949908	-0,48812	72,00	20,00	-7	0,401	60	23,958720	56,949532	0,41953	88,10	24,47	4	0,964		
18	23,967630	56,949895	-0,56562	65,50	18,19	-6	0,419	61	23,958320	56,949527	0,41069	87,70	24,36	4	0,989		
19	23,967345	56,949883	-0,57894	62,60	17,39	-5	0,437	62	23,957918	56,949535	0,40577	88,10	24,47	5	1,013		
20	23,967087	56,949873	-0,63473	56,70	15,75	-5	0,452	63	23,957515	56,949542	0,40013	88,30	24,53	6	1,038		
21	23,966867	56,949860	-0,71688	48,50	13,47	-5	0,466	64	23,957098	56,949543	0,40744	91,40	25,39	5	1,063		
22	23,966688	56,949852	-0,80444	39,30	10,92	-4	0,477	65	23,956673	56,949545	0,40846	93,10	25,86	5	1,089		
23	23,966555	56,949847	-0,8954	29,20	8,11	-3	0,485	66	23,956240	56,949543	0,40986	94,90	26,36	5	1,115		
24	23,966445	56,949842	-0,91685	24,20	6,72	-4	0,492	67	23,955802	56,949542	0,40828	96,00	26,67	5	1,142		
25	23,966377	56,949838	-0,98513	15,00	4,17	-5	0,496	68	23,955357	56,949533	0,40882	97,60	27,11	5	1,169		
26	23,966338	56,949833	-1,01462	8,80	2,44	-5	0,498	69	23,954897	56,949527	0,41588	100,80	28,00	5	1,197		
27	23,966328	56,949825	-1,05893	1,00	0,28	0	0,499	70	23,954435	56,949523	0,41147	101,20	28,11	5	1,225		
28	23,966328	56,949825	-0,00342	0,00	0,00	0	0,499	71	23,953962	56,949523	0,41511	103,60	28,78	5	1,254		
29	23,966328	56,949825	0,00210	0,00	0,00	0	0,499	72	23,953488	56,949535	0,41083	104,00	28,89	5	1,283		
30	23,966328	56,949825	0,00420	0,00	0,00	0	0,499	73	23,953010	56,949545	0,40821	104,80	29,11	5	1,312		
31	23,966328	56,949825	0,03245	0,00	0,00	0	0,499	74	23,952532	56,949553	0,40262	104,80	29,11	5	1,341		
32	23,966328	56,949825	0,04235	0,00	0,00	0	0,499	75	23,952053	56,949565	0,39793	105,00	29,17	5	1,370		
33	23,966242	56,949802	0,05389	5,20	1,44	7	0,505	76	23,951572	56,949588	0,39559	105,80	29,39	5	1,400		
34	23,966173	56,949795	0,13811	15,40	4,28	7	0,509	77	23,951087	56,949605	0,39294	106,50	29,58	5	1,429		
35	23,966085	56,949787	0,16755	19,50	5,42	6	0,515	78	23,950608	56,949622	0,38315	105,20	29,22	5	1,458		
36	23,965962	56,949777	0,22387	27,20	7,56	5	0,522	79	23,950148	56,949653	0,36506	101,50	28,19	5	1,487		
37	23,965825	56,949763	0,24312	30,50	8,47	6	0,531	80	23,949693	56,949692	0,35833	100,90	28,03	5	1,515		
38	23,965667	56,949758	0,26808	34,70	9,64	7	0,541	81	23,949238	56,949725	0,35281	100,60	27,94	5	1,542		
39	23,965492	56,949752	0,28807	38,40	10,67	5	0,551	82	23,948795	56,949768	0,34159	98,60	27,39	5	1,570		
40	23,965312	56,949742	0,28923	39,60	11,00	5	0,562	83	23,948347	56,949793	0,33776	98,70	27,42	5	1,597		
41	23,965103	56,949733	0,32575	45,90	12,75	5	0,575	84	23,947887	56,949833	0,34474	102,00	28,33	5	1,626		
42	23,964877	56,949725	0,34287	49,60	13,78	5	0,589	85	23,947440	56,949875	0,33204	99,40	27,61	5	1,653		
43	23,964622	56,949713	0,37770	56,10	15,58	5	0,604										

Ātruma grafiskais attēlojums:



5.18. att. Otrā eksperimenta grafiski attēlotas ātruma izmaiņas .



5.19. att. Nobrauktā attāluma atkarības no laika grafiskais attēlojums otrajā eksperimentā.

Rezultāts. Šajā eksperimentā, bremzējot un paātrinoties pēc ierīces rekomendācijām, izdevās apstāties noteiktajā punktā ar precizitāti 1 metrs (27 sekunde 5.2. tabulā) un sasniegt nepieciešamo ātrumu noteiktajā punktā (3) ar precizitāti 3 metri. Jāņem vērā, ka *GPS* uztvērējam kļūda šajā laika momentā bija ± 2 metri un ātrums tika aprēķināts ar noteiktu aizkavējumu (0,5 s). Veicot virkni izmēģinājumu (mainot ātrumu, distances garumu un bremzēšanas/paātrinājuma stilu) un ņemot vērā iepriekš minētās kļūdas, vidējā kopējā kļūda ir $\pm 3,7$ metri. Šajā eksperimentā kļūdas aprēķinu ietekmē arī cilvēka faktors, jo pastāv neliela aizkave starp momentu, kad ierīce parāda, ko darīt ar bremzēšanas/paātrinājumu koeficientu,

un momentu, kad operators to realizē, kā arī to, cik pareizi tas ir izdarīts. Tādējādi var secināt, ka, pieslēdzoties pie izpētes transporta sensoriem un ievadrīkiem, var vēl vairāk palielināt sistēmas precizitāti. Rezultātu ietekmē arī ātrums, distances garums un transportlīdzekļa masa. Ņemot vērā sensoru darbības principu, ir saprotams: jo lielāks transportlīdzeklis (garums, masa) un ātrums, jo lielāka būs precizitāte un atļautā novirze no tās (pieļaujama kļūda).

Veicot eksperimentus sliktos laika apstākļos (mazs saķeres koeficients ar asfaltu) un ievadot ierīcē īsas distances, kā arī neievērojot ierīces rekomendācijas par nepieciešamo paātrinājumu maiņu, ir pamanāma ļoti ātra ierīces reaģēšana uz situāciju. Pilnīgi visos gadījumos ierīcei izdevās pareizi aprēķināt to, ka paspēt sasniegt noteikto ātrumu noteiktajā punktā nebūs iespējams.

Kopumā eksperimenta rezultāts parāda, ka, izmantojot promocijas darba autora piedāvāto metodoloģiju paātrinājuma un bremsēšanas etapos, var sasniegt ieplānotus darba mērķus, t. i., droši paātrināties pacelšanās laikā ar pazeminātu dzinēja jaudu, ja to atļauj skrejceļa garums, un bremsēt līdz manevrēšanas ceļam tā, lai nebūtu jālieto dzinēja jauda, lai paātrinoties pēc bremsēšanas piebrauktu pie tā (jeb citiem vārdiem – bremsēt vājāk, ekonomējot GK resursus, ja to atļauj PNJ garums un apstākļi).

GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

Promocijas darba izstrādes gaitā apskatītas bremzēšanas metodes, nolaišanās un pacelšanās etapi, faktori, kas ietekmē noskrējiena ceļa garumu uz zemes, kā arī problēmas aktualitāte un mūsdienīgas risināšanas iespējas. Veikta analīze, lai noteiktu nepieciešamību izstrādāt sistēmu, kas spēj kontrolēt pacelšanās un nosēšanās procesus un noteikt atlikušo ceļa garumu līdz apstāšanās jeb atrašanās punkta pret PNJ beigām. Aprēķins balstīts inerciālās navigācijas sistēmas izejas datu integrēšanas rezultātos. Izveidota portatīva ierīce, kas var būt noderīga arī lidojumu kvalitātes analīzē un lidojumu negadījumu izmeklēšanā saistībā ar vieglajiem lidaparātiem un lidmašīnām, kas nav aprīkotas ar modernu lidojumu un navigācijas aprīkojumu.

Lai prognozētu laiku līdz lidmašīnas apstāšanās jeb atrašanās brīdim, izmantota aproksimācijas metode paātrinājuma integrēšanas rezultātam ar koriģējošiem koeficientiem, kas uzkrāta paātrinājuma statistikā. Šis uzdevums var arī tikt atrisināts arī ar citām metodēm, kas ir minētas šajā darbā. Tomēr dažādas citas metodes ir ļoti sarežģīti realizējamas, īpaši programmatūras daļā, tāpēc tika nolemts izvairīties no to izmantošanas, ņemot vērā samērā lielu algoritma precizitāti. Kāda no metodēm dos labākos rezultātus, varēs noskaidrot tikai praktiskā veidā, veicot virkni izmēģinājumu katram konkrētam lidaparāta tipam. Šo metodi var lietot ne tikai aviācijā, bet arī saistībā ar citiem transportlīdzekļiem (automobiļiem, kuģiem u. tml.), kur nepieciešams prognozēt distances un/vai to optimizēt.

Ierīces izstrādāšanas gaitā tika izprojektēta elektriskā shēma, aprēķināti un izvēlēti tās elementi, kā arī uzrakstīta programma C++ valodā, lai ieprogrammētu mikrokontrolleri. Rezultātā tika sakomplektēta pilnībā darbaspējīga ierīce, ko jebkurā brīdī var pieslēgt pie GK šajā darbā minētajām sistēmām. Ņemot vērā to, ka ierīce nav sertificēta, pašlaik to var lietot tikai kā portatīvo palīgierīci, nepieslēdzoties pie lidmašīnas aprīkojuma. Darba galvenais uzdevums bija izstrādāt tieši jaunu metodi, nevis gatavu produktu. Ierīce ir uzbūvēta, lai iegūtu datus par šiem procesiem un parādītu skaitīšanas algoritma dzīvotspējīgumu.

Pierakstot datus pacelšanās/nosēšanās etapos reāla lidojumā laikā ar izstrādātā prototipa palīdzību, izdevās pierādīt iespējamību aprēķināt atrašanās/apstāšanās punktu dinamiski laika gaitā visos etapa posmos. Ņemot vērā skaitīšanas algoritma būtību (paātrinājumu kontrole), metode dot iespēju kontrolēt absolūti visus faktorus, kas ietekmē mēroto ceļa garumu (piemēram, vēja parametra vai skrejceļa stāvokļa pēkšņa izmaiņa izraisīs paātrinājuma maiņu). Lai arī izmēģinājumu daudzums pagaidām neļauj neko pateikt tieši par to, cik lielā mērā šī metode paaugstina pacelšanas/nosēšanas drošumu, tomēr piedāvātais risinājums dod vairākas priekšrocības un iespējas:

- 1) krietni pazemina ekonomisko sastāvdaļu un pagarina GK resursu ilgmūžību, salīdzinot ar standarta pacelšanās/nosēšanās metodi (maksimāli pieļaujamo dzinējspēka jaudas izmantošanu pacelšanās etapā un maksimāli ātru bremzēšanas stilu izvēli nosēšanās etapā, kas pēc tam visbiežāk prasa atkārtota lidmašīnas paātrinājuma nepieciešamību līdz nobraukšanas ceļam);
- 2) pazeminot degvielas patēriņu, riepu/bremžu un citu GK resursu nolietojumu, pazemina vides piesārņojumu;
- 3) dod iespēju labāk orientēties visa skrejceļa garumā (nerunājot par slikta laika apstākļiem, cilvēks nav spējīgs redzēt kilometros garu skrejceļu un saprast/aprēķināt mēroto un atlikušo ceļa garumu), kā arī būt pārliecinātam par to, ka atrodas tieši pacelšanās-nosēšanās joslā (vēl viena samērā aktuāla mūsdienu problēma – ir bijuši vairāki gadījumi, kad pacelšanās etaps bija veikts no manevrēšanas ceļa);
- 4) palielina pacelšanās/nosēšanās etapu drošumu (galvenokārt, neizmantojot dzinēja maksimālo jaudu krietni, pazeminās dzinēja atteices varbūtība), kā arī paaugstina pacelšanās/nosēšanās etapu drošumu lidlaukos, kas nav aprīkotas ar ILS un līdzīgām sistēmām (piemēram, Spilves lidosta) jeb nesertificētām lidmašīnām (eksperimentālām), kas nav aprīkotas ar attiecīgajām sistēmām;
- 5) atvieglo apkopes darbu, sniedzot papildinformāciju par paātrinājumu/bremzēšanas gaitu un atrašanās vietu uz skrejceļa;

- 6) ļauj veikt nosēšanos pēc *ILS Cat I* kategorijas noteikumiem lidostās, kas nav aprīkotas ar instrumentālās nolaišanās sistēmām ar *GPS* uztvērēja palīdzību, kas iebūvēts ierīcē, kā arī veikt nosēšanos pēc sarežģītajām glisādes trajektorijām (piemēram, kalnu apvidū). Tādās sistēmas jau eksistē, tāpēc novitātes trūkuma dēļ šī funkcija darbā nav aprakstīta;
- 7) pazemina prasības laika apstākļiem lidmašīnām, kas nav aprīkotas ar pilnu *IFR (instrument flight rules)* instrumentu kompleksu;
- 8) palīdz lidojumu kvalitātes analīzē un lidojumu negadījumu izmeklēšanā saistībā ar vieglajiem lidaparātiem un lidmašīnām, kas nav aprīkotas ar modernu lidojumu un navigācijas aprīkojumu.

Pielikumā pievienota pilota, kurš palīdzēja veikt prototipa izmēģinājumus, atsauksme.

Darbā nav aprakstīts, kā sistēma var palīdzēt 1.1. tabulā minētajos gadījumos dažādu iemeslu dēļ. Pirmkārt, darbā izstrādātais paņēmieni vairāk paredzēts standartam lidojumu gadījumiem, nevis tam, lai tieši/tikai samazinātu incidentu skaitu. Otrkārt, lai izmantotu izstrādāto sistēmu tieši incidentu novēršanai, obligāti jāpieslēdzas pie lidmašīnas aprīkojuma un vadības rīkiem. Lai sistēma būtu gatava novērst nelaimes gadījumus, lidmašīna jāaprīko ar papildagregātiem (piemēram, tādiem, kas minēti darbā nodaļā “GK bremsēšanas iespējas” jeb raķešu bremzes, ko diezgan bieži izmanto militārajā aviācijā). Lai veiktu šādu pētījumu, ir jāaprēķina katra konkrēta lidaparāta tipa iespējamība izmantot katru konkrētu bremsēšanas palīgierīci, spēku, svaru, izmaksas u. tml., un tas ir pamats jau citam plašam pētījumam

Tālāko pētījumu un izstrādes gaitā ierīci iespējams paplašināt ar citu ražotāju papildu blokiem (*GPS*, akselerometru utt.), kas, pirmkārt, var palielināt ierīces precizitāti, otrkārt, ļaus kļūt par autonomu ierīci, kas nav atkarīga no INS un citām sistēmām. Ir iespējams arī pieslēgties GK aprīkojumam, kas dos, visticamāk, vislabāko rezultātu. Ļoti ieteicams paaugstināt ierīces darbības drošumu – izmantot sertificētus mikrokontrollerus, kā arī organizēt daudzprocesoru sistēmu, kā tas tiek praktizēts avionikas ražošanas procesā (divi neatkarīgi procesori, kas kontrolē viens otru).

Pirms izmēģinājumu un drošuma analīzes veikšanas ierīce ir izgatavojama kā atsevišķa ierīce, kas neietekmē lidmašīnas vadības rīkus vai citas iekārtas, tādēļ galīgais lēmums par rīcību būs jāpieņem lidmašīnas apkalpei.



Artūrs Suharevs dzimis 1990. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskā universitātē ieguvis bakalaura grādu (2013) un maģistra grādu (2015). Strādājis SIA "PSAC Rīgas Aeroklubs" par aviācijas tehniķi. Patlaban ir AS "Air Baltic Corporation" sertificēts tehniķis B1/B2 un SIA "Air Baltic Training" instruktors. Zinātniskās intereses saistītas ar aviācijas drošības un avionikas tēmām.