

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte

Mehānikas un mašīnbūves institūts

Mārtiņš Irbe

Doktora studiju programmas “Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve” doktorants

**ENERĢIJAS IEGŪŠANAS NO FLUĪDU PLŪSMAS
IEKĀRTU DINAMIKAS ANALĪZE UN VADĪBAS
OPTIMIZĀCIJA**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

profesors *Dr. habil. sc. ing.*

JĀNIS VĪBA

profesors *Dr. sc. ing.*

IGORS TIPĀNS

RTU Izdevniecība

Rīga 2020

Irbe, M. Enerģijas iegūšanas no fluīdu plūsmas iekārtu dinamikas analīze un vadības optimizācija. Promocijas darba tematiski vienotu zinātnisko publikāciju kopas kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2020. 40 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Mašīnbūves un mehānikas zinātnes nozares promocijas padomes "P-04" 2020. gada 2. septembra lēmumu, protokols Nr. 43.

Promocijas darbs izstrādāts ar RTU Zinātņu prorektora dienesta un Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātes piešķirto doktorantūras pētniecības granta finansiālu atbalstu.

<https://doi.org/10.7250/9789934225550>

ISBN 978-9934-22-558-1 (print)

ISBN 978-9934-22-555-0 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2020. gada 22. decembrī plkst. 14.30 Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, 521. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Grigorijs Panovko,
Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э.Баумана, Maskava,
Krievija

Emeritētais profesors *Dr. sc. ing.* Ēriks Kronbergs,
Mehānikas institūts, Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Latvija

Asistents *Dr. sc. ing.* Oļegs Jakovļevs,
Mehānikas un mašīnbūves institūts, Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

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

Mārtiņš Irbe (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs – tematiski vienotu zinātnisko publikāciju kopa – ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 116 attēlu, divas tabulas, četri pielikumi, kopā 150 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 91 nosaukums.

SATURS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	5
Tēmas aktualitāte	5
Darba mērķis un galvenie uzdevumi	5
Pētījuma objekts	6
Pētījuma hipotēzes	6
Zinātniskā novitāte	7
Darba rezultātu praktiskā izmantošana	7
Publikāciju saraksts	8
Autora ieguldījums publikācijās	10
Darba struktūra un galvenie rezultāti	12
Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes	12
IEVADS	14
1. SKELETONS (GAISA PLŪSMA, ŪDENS ZEM SLIECĒM)	16
1.1. Skeletoņa un braucēja kustības matemātiskais modelis	16
1.2. Pretestības koeficientu noteikšanas analītiskās metodes izveide	17
1.3. Skeletoņa kamanu slīdes kustības vibrāciju analīze ar mainīgu slieču stingumu	19
2. FLUĪDA (GAISA) PLŪSMA	22
2.1. Vienkāršas formas objekta analīze nestacionārā fluīda plūsmā	22
2.2. Plakanas plāksnes kustības modelēšana fluīda plūsmā	24
2.3. Formas optimizācija un mijiedarbības analīze simetriskai prizmai gaisa plūsmā	25
2.4. Enerģijas ieguves optimizācija noteiktas ģeometriskās formas prizmām no gaisa plūsmas	27
2.4.1. Trīsstūrveida prizmas optimizēšana translācijas kustībā gaisa plūsmā	29
2.4.2. Spicas trijstūrveida prizmas kustība vertikālajā plaknē	30
3. CITI FLUĪDA DINAMIKAS PĒTĪJUMI	32
3.1. Vienas astes robota horizontālās kustības matemātiskais modelis šķidrumā	32
3.2. Dubultplāksnes vibrāciju analīze fluīda plūsmā	35
3.3. Ūdens pretestības pētījums motorizēta <i>SUP</i> dēļa piedziņas spuras formai	37
SECINĀJUMI	39

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Fluīda (šeit: gaiss, ūdens) plūsmas mijiedarbība ar objektiem tehnikā, tehnoloģiskajos procesos, transportā, sadzīvē, sportā un dabā ir sastopama ik uz soļa. Viena no šo mijiedarbību lietderīgas izmantošanas jomām ir iespēja no mijiedarbības iegūt enerģiju. Tas iespējams tad, ja fluīds kustas pret objektu, objekts kustas fluīdā vai kustas gan fluīds, gan objekts, piemēram, vēja ģenerators vai hidrauliskā turbīna. Ar jēdzienu “iegūt enerģiju” plašākā mērogā apzīmē papildu darbības, kas saistītas ar enerģijas ekonomiju dažādos procesos, piemēram, degvielas ekonomija, atkarība no auto virsbūves formas, skeletoņa kustības finiša laiks.

Promocijas darbu kopa aptver autora un viņa kolēģu pētījumus trīs mijiedarbību jomās: a) skeletoņa mijiedarbību ar ledu un gaisu; b) gaisa plūsmas un objektu gaisā mijiedarbības; c) ūdens plūsmas un objekta ūdenī mijiedarbības. Tēmas aktualitāte ir saistīta ar pētījumiem “zaļās” enerģijas jomā: ekonomēt vai iegūt enerģiju no zemeslodes aptverošā fluīda plūsmas.

Darba mērķis un galvenie uzdevumi

Darba mērķis ir izstrādāt metodes un metodikas, lai varētu veikt fundamentālus pētījumus enerģijas ekonomēšanas jomā, objektam kustoties fluīdā, vai iegūt enerģiju no fluīda plūsmas, izmantojot optimālās sintēzes teoriju. Papildus tam izstrādātas procesu modelēšanas datorprogrammas un veikti eksperimentālie pētījumi vēja tunelī un dabā, kas apliecina teorijas validāciju.

Darbā veikti pētījumi trīs galvenajos virzienos, tas izstrādāts kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa.

1. Skeletoņa pētījumi.

- 1.1. Pielāgota un pārbaudīta optimālās sintēzes teorija “zaļās” enerģijas jomā: ekonomēt vai iegūt enerģiju no zemeslodes aptverošā fluīda plūsmas.
- 1.2. Veikti skeletoņa eksperimentālie pētījumi Siguldas bobsleja un kamaniņu trasē.
- 1.3. Izveidots skeletoņa un dažāda ledus mehānisko parametru ledus (ūdens slāņa) matemātiskais modelis. Veikti modeļa skaitliskie testi.
- 1.4. Izstrādāts skeletoņa un ledus–gaisa lokālo mijiedarbību modelis, kas pārbaudīts skaitliski (ar datormodelēšanu) un eksperimentāli (Siguldas bobsleja un kamaniņu trasē).

2. Objektu un gaisa mijiedarbības pētījumi.

- 2.1. Izstrādāta teorija un metodika dažādas formas **nekustīgu** 2D objektu mijiedarbībai **ar kustīgu** fluīdu.
- 2.2. Izstrādāta teorija un metodika dažādas formas **kustīgu** 2D objektu mijiedarbībai **ar nekustīgu** fluīdu.
- 2.3. Izstrādāta teorija un metodika dažādas formas **kustīgu** 2D objektu mijiedarbībai **ar kustīgu** fluīdu.

- 2.4. Veikti 2D datormodelēšanas pētījumi mijiedarbību parametriskai identifikācijai.
- 2.5. Veikta dažāda veida vēja enerģijas iegūšanas reālu modeļu parametriskā optimizācija.
- 2.6. Veikti 3D eksperimentālie pētījumi vēja tunelī.
- 2.7. Izstrādāts, izprojektēts un izgatavots jauns vēja enerģijas iegūšanas rotācijas tipa prototips.
- 2.8. Veikts gaisa plūsmas mijiedarbību izstrādātās teorijas un prakses rezultātu noformējums zinātniskā grāmatā.

3. Objektu un ūdens mijiedarbību pētījumi.

- 3.1. Izmantota un pilnveidota fluīdu mijiedarbības teorija ūdens plūsmām.
- 3.2. Izstrādāta teorija robotizētas zivs astes enerģijas ieguvei no mainīga laukuma vibrācijām šķidrumā.
- 3.2. Izstrādāta teorija un metodika dubultplāksnes svārstību analīzei fluīda plūsmā.
- 3.3. Veikti 3D eksperimentālie pētījumi vēja tunelī dubultplāksnes modelim.
- 3.4. Veikta motorizētās SUP dēļa spuras motora vāka parametriskā optimizācija.
- 3.5. Izstrādāts patenta pieteikums fluīda plūsmas inducētu svārstību enerģijas ieguvei ar lineāru ģeneratoru.

Pētījuma objekts

Galvenais pētījuma objekts ir fluīda (ar bezgalīgu brīvības pakāpju skaitu) modeļa mijiedarbība ar cietiem ķermeņiem. Ar mijiedarbību šeit jāsaprot **tuvās mijiedarbības spēki** starp cieta ķermeņa bezgalīgi daudziem virsmas punktiem un bezgalīgi daudzām fluīda daļiņām. Redukcijas gaitā jānoskaidro spēku sistēmas galvenais vektors un to galvenais moments jebkurā punktā, piemēram, masas centrā. Tas atļauj tālāk sastādīt cietā objekta kustības aptuvenos diferenciālos vienādojumus un tos integrēt skaitliski. Ja tas ir paveikts, kaut aptuveni – ar pieņemtām hipotēzēm, nav nepieciešams izmantot darba ietilpīgus “telpas un laika” modeļus, kas arī ir aptuveni.

Pētījuma hipotēzes

Darba galvenā hipotēze balstās uz Ņūtona mehānikas pamata hipotēzēm:

- par fluīda daļiņu sistēmas kustības daudzuma izmaiņu diferenciālā formā;
- par fluīda daļiņu trieciena mijiedarbību ar cietu objektu spiediena zonā;
- par fluīda daļiņu veidoto spiedienu sūkšanas zonā;
- par viskozitātes ignorēšanu.

Minētās hipotēzes ir pierādītas datoreksperimentos un pārbaudītas praksē.

Tā rezultātā sāka jaunas, aptuvenas zinātniskas teorijas veidošana. Jaunā teorija atšķiras no esošajām teorijām ar to, ka pirms fluīdu dinamiskiem analīzes un sintēzes aprēķiniem nav nepieciešams veikt eksperimentus fluīda tuneļos (lai atrastu empīriskus “*Drag*” un “*Lift*” koeficientus).

Zinātniskā novitāte

Nepārtrauktas vides – fluīda dinamikas pētījumos ir problēmas aprakstīt bezgalīgu brīvības pakāpju (∞ BP) sistēmas kustību ap cietu vai deformējamu ķermeni, ievērojot visus citus ķermeņus un to plūsmas sākuma noteikumus. Tāpēc praksē tiek izmantotas aptuvenas metodes, piemēram, *RANS* (*Reynolds-averaged Navier–Stokes equations*), nekustīgu ķermeņu labirintu, uz kuru no noteikta attāluma sāk plūst daļiņu paralēlu ātrumu fluīds. Sākumā ir pārejas process, pēc kura (ievērojot viskozitāti) iestājas stacionāra plūsma. Šāds process var ilgt pat sekundi vai tās daļas. Nav saprotams, kā plūsmas kustības laikā mainīt fluīda tīklojumu, ja ķermenis sāk kustēties. Protams, iespējams nepārtraukti, pēc dažiem soļiem mainīt mijiedarbības ģeometrisko konfigurāciju un uzdot iepriekšējos beigu noteikumus. Tas ir darbietilpīgs process.

Piedāvātajā metodē (teorijā) un metodikās ir ierosināts izmantot klasiskās mehānikas metodes bezgalīgu daļiņu plūsmai un mijiedarbībai ar cietu ķermeņa virsmu, neņemot vērā viskozitāti. Tā rezultātā ir iespējams iegūt izkliedētu spēku redukcijā to galveno vektoru un galveno momentu sistēmas masas centrā. Iegūtie lielumi ļauj veidot objekta kustības diferenciālos vienādojumus, kas attiecīgi skaitliski integrējas. Ar integrēšanu ir iespējams veikt parametrisko optimizāciju ar datoru un sintezēt: jaunas, efektīvas sistēmas enerģijas lietderīgai izmantošanai pie kustības pa fluīdu; vai radīt jaunas “zaļās” enerģijas ieguves sistēmas no fluīda plūsmas ap cietu objektu.

Darba rezultātu praktiskā izmantošana

Galvenie praktiskās izmantošanas rezultāti

1. Siguldas bobsleja un kamaniņu trasē iegūtie eksperimentālie rezultāti un to aproksimācija izmantojami esošo konstrukciju modernizācijā un jaunu skeletonu projektēšanā.
2. Izveidotais skeletona un dažāda ledus mehānisko parametru (ūdens slāņa) matemātiskais modelis izmantojams rezultātu uzlabošanai sacensībās.
3. Izstrādātais skeletona un ledus–gaisa lokālo mijiedarbību modelis izmantojams citu renes sporta veidu (kamaniņu, bobsleja) kustības modelēšanā.
4. Izstrādātā teorija un metodika 2D objektu mijiedarbībai ar fluīdu trīs gadījumos (nekustīgs objekts, nekustīgs fluīds, abi objekti kustas) lietojami jaunu “zaļās” enerģijas objektu sintēzē, kā arī lidojošu aparātu projektēšanā.
5. Izstrādātā metodika un 2D datormodelēšanas modeļi dažādas formas prizmu (rombam, trīsstūrim, zvaigznei) mijiedarbības analīzei lietojami objektu formas optimizācijā.
6. Izstrādātā metodika un izgatavotās iekārtas izmantojamas jaunu iekārtu pārbaudei vēja tunelī.
7. Izstrādātā teorija robotizētas zivs astes aktuātorā piedziņai izmantojama objekta kustības piedziņai un enerģijas atjaunošanai tā apstāšanās fāzē.
8. Izstrādāts, izprojektēts un izgatavots jauns vēja enerģijas iegūšanas rotācijas tipa prototips.

9. Izstrādāts patenta pieteikums fluīda plūsmas inducētu svārstību enerģijas ieguvei ar lineāru ģeneratoru.
10. Veikts gaisa plūsmas mijiedarbību izstrādātās teorijas un prakses rezultātu noformējums zinātniskā grāmatā.

Publikāciju saraksts

Nodaļa zinātniskajā grāmatā, kas indeksēta *Web of Science* un/vai *Scopus* datubāzē

1. Viba J., Beresnevich V. and Irbe M., 2020, Synthesis and Optimization of Wind Energy Conversion Devices *Design Optimization of Wind Energy Conversion Systems with Applications* vol. I, ed. Maalawi Karam Y. (IntechOpen) p. 17.

Zinātniskais raksts, kas indeksēts *Web of Science* un/vai *Scopus* datubāzē

2. Tipans I., Viba J., Irbe M. and Vutukuru S. K., 2020, Investigation of dual varying area flapping actuator of a robotic fish with energy recovery *Agron. Res.* vol. 18, pp. 1046–55.
3. Tipans I., Viba J., Irbe M. and Vutukuru S. K., 2019, Analysis of non-stationary flow interaction with simple form objects *Agron. Res.* vol. 17, pp. 1227–34.

Publikācijas konferenču materiālos, kas indeksētas *Web of Science* un/vai *Scopus* datubāzē

4. Vutukuru S. K., Tipans I., Viba J. and Irbe M., 2020, Form optimization and interaction analysis of plane symmetry prism in AIR *Engineering for Rural Development* vol. 19, pp. 739–46.
5. Spade K., Vaicis I., Vutukuru S. K. and Irbe M., 2020, Analysis of granule layer impact interaction on vibrating 2D prism *Engineering for Rural Development* vol. 19, pp. 1463–9.
6. Irbe M., Cerpinska M. and Gross K. A., 2019, *Investigation of vibration induced by sliding down an ice plane* vol. 800, KEM.
7. Irbe M., Gross K. A., Viba J. and Cerpinska M., 2019, Modelling of stiffness variability of skeleton sled on inclined ice plane *Engineering for Rural Development* vol. 18, pp. 1215–20.
8. Vutukuru S., Viba J., Tipans I., Viksne I and Irbe M., 2019, Analysis of flat plate vibrations by varying frontal area to the flow *Engineering for Rural Development* vol. 18, pp. 1408–14.
9. Gulbis J., Viba J., Irbe M. and Spade K., 2019, Experimental optimization of annealing of cylindrical brass casings *Engineering for Rural Development* vol. 18, pp. 852–7.
10. Cerpinska M., Irbe M. and Elmanis-Helmanis R., 2019, Swirling flow in Francis turbines depending on guide vanes opening position *Engineering for Rural Development* vol. 18, pp. 1435–40.

11. Tipans I., Viba J., Vutukuru S. K. and Irbe M., 2019, Vibration analysis of perforated plate in non-stationary motion *Vibroengineering Procedia* vol. 25, pp. 48–53.
12. Irbe M., Gross K. A., Viba J. and Cerpinska M., 2018, Analysis of acceleration and numerical modeling of skeleton sled motion *Engineering for Rural Development* vol. 17, pp. 1401–6.
13. Cerpinska M., Irbe M. and Elmanis-Helmanis R., 2018, Displacement of shaft during hydropower generator air gap measurements *Engineering for Rural Development* vol. 17, pp. 1673–8.
14. Cerpinska M., Irbe M. and Elmanis-Helmanis R., 2018, Vibration of foundation for rotary screw compressors installed on skid mounting *Engineering for Rural Development* vol. 17, pp. 1997–2002.
15. Cerpinska M. and Irbe M., 2017, Specifics of natural frequency measurements for floor vibration *Engineering for Rural Development* vol. 16, pp. 162–6.
16. Viba J., Beresnevich V., Irbe M. and Dobelis J., 2017, The control of blades orientation to air flow in wind energetic device *Energy Procedia* vol. 128, pp. 302–8.
17. Viba J., Beresnevich V., Noskovs S. and Irbe M., 2016, Investigations of rotating blade for energy extraction from fluid flow *Vibroengineering Procedia* vol. 8, pp. 312–5.
18. Viba J., Eiduks M. and Irbe M., 2015, Double pendulum vibration motion in fluid flow *Engineering for Rural Development* vol. 14, pp. 434–9.

Raksti konferenču tēžu krājumā

19. Jansons E., Irbe M., Kalniņa I., Gross K., The Influence of Environmental Conditions on Sliding Over Ice: an Experimental Study from the Bobsled Push-Start Facility *ECOTRIB 2019 7th European Conference on Tribology*, Austria, Vienna, 12–14 June, 2019, pp. 247–247.
20. Irbe M., Jansons E., Plūduma L., Gross K., The Effect of Runner Tension on Sliding over Ice at Different Ice Conditions *ECOTRIB 2019 7th European Conference on Tribology*, Austria, Vienna, 12–14 June, 2019, pp. 180–180.

Iesniegti trīs zinātniskie raksti, kas indeksēti *Web of Science* un/vai *Scopus* datubāzē.

21. Žurnālā “*Tribology international*” raksts par pētījumiem, kas apskatīti promocijas darba pirmajā nodaļā, ar nosaukumu – *Unveiling Ice Friction and Air Drag for Faster Sliding in Winter Sports*.
22. Žurnālā “*Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*” raksts par pētījumiem, kas apskatīti promocijas darba otrajā nodaļā, ar nosaukumu – *Optimization of Energy Extraction Using Ddefinite Geometry Prisms in Air*.
23. Žurnālā “*Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*” raksts par pētījumiem, kas apskatīti promocijas darba trešajā nodaļā, ar nosaukumu – *Resistance Estimation for Propulsion System of a Motorized SUP Board Equipped with Waterjet*.

Iesniegtas publikācijas konferenču materiālos, kas indeksētas *Web of Science* un/vai *Scopus* datubāzē

24. “14th International Conference on Vibration Problems 2019” konferences raksts par pētījumiem, kas apskatīti promocijas darba pirmajā nodaļā, ar nosaukumu – *Analysis of the Skeleton Sled with Different Runner Stiffnesses Sliding Motion Induced Vibrations on an Inclined Ice Track*.
25. “43rd National Systems Conference on Innovative and Emerging Trends in Engineering Systems 2019” konferences raksts par pētījumiem, kas apskatīti promocijas darba trešajā nodaļā, ar nosaukumu – *Varying Area Vibrating Structure in a Fluid for Energy Gain*.

Izgdrojums

26. LR patents Nr. 14978, 20.02.2015. Rīgas Tehniskā universitāte, “Vienmasas vibrovesera uz elastīgas piekares darba režīma vadības paņēmiens”, līdzautors.

Autora ieguldījums publikācijās

Visas zinātniskās publikācijas tapušas sadarbībā ar promocijas darba vadītājiem profesoru Jāni Vību un profesoru Igoru Tipānu (līdzautori vai konsultanti). Darbs pie zinātniskajām publikācijām ir autoru kopīgi plānots un realizēts. Autora ieguldītais pētnieciskais darba apjoms zinātniskajās publikācijās procentuāli parādīts 1. tabulā.

1. tabula

Ieguldījums zinātnisko publikāciju izstrādē

Publikācijas Nr.	Aktivitātes publikācijā	Ieguldījums
1.	Eksperimentālās iekārtas projektēšana, prototipēšana, eksperimenti vēja tunelī, objekta kustības analīze un datu apstrāde	25 %
2.	Literatūras izpēte, vienkāršas formas objekta analīze, skaitliskā modelēšana un grafiskais atainojums	25 %
3.	Literatūras izpēte, projektēšana, prototipēšana, 2D plūsmas simulācijas un kustības analīze, eksperimenti vēja tunelī, datu apstrāde un grafiskais atainojums	35 %
4.	Formas ģeometrijas optimizācijas analīze šķidrums un ķermeņa mijiedarbībām	25 %
5.	Granulētas frakcijas kustības modelēšana, izmantojot aptuveno spēku noteikšanas metodi spiediena un vakuuma zonām	15 %
6.	Literatūras izpēte, eksperimenti klimata simulācijas kamerā, 3D slīdes kustības modelēšana, datu apstrāde, grafiskais atainojums un apkopošana	75 %

1. tabulas turpinājums

7.	Literatūras izpēte, eksperimenti starta estakādē, 2D slīdes kustības analīze modelim ar 8BP, datu apstrāde, grafiskais atainojums un apkopošana	75 %
8.	Nestacionāra šķidrums un ķermeņa mijiedarbības analīze, optimizācija un sintēze, eksperimenti vēja tunelī, skaitliskā modelēšana	25 %
9.	Parametriskā optimizācija	5 %
10.	Datu analīze	10 %
11.	Nestacionāra šķidrums un ķermeņa mijiedarbības analīze, optimizācija un sintēze, eksperimenti vēja tunelī, skaitliskā modelēšana	25 %
12.	Literatūras izpēte, eksperimenti starta estakādē, matemātiskā modelēšana, datu apstrāde, grafiskais atainojums, validēšana un apkopošana	75 %
13.	Datu analīze	10 %
14.	Pašsvārstību frekvenču noteikšana ar <i>SolidWorks Simulation</i>	10 %
15.	Vibrāciju mērījumi	10 %
16.	Eksperimentālās iekārtas projektēšana, prototipēšana, eksperimenti vēja tunelī, datu apstrāde	30 %
17.	Eksperimentālās ierīces projektēšana, prototipēšana, eksperimenti vēja tunelī, objekta kustības analīze	25 %
18.	Eksperimentālā modeļa izveide, eksperimenti vēja tunelī, datu apstrāde, grafiskais atainojums, skaitliskā modelēšana	40 %
19.	Eksperimenti starta estakādē	10 %
20.	Literatūras izpēte, eksperimenti starta estakādē, 2D modelēšana, datu apstrāde, grafiskais atainojums, validēšana un apkopošana	80 %
21.	Literatūras izpēte, eksperimenti starta estakādē, 2D modelēšana, datu apstrāde, apkopošana un grafiskais atainojums, metodes validēšana	60 %
22.	2D plūsmas simulācijas, skaitliskā modelēšana un grafiskais atainojums	25 %
23.	3D plūsmas simulācijas, datu apstrāde un grafiskais atainojums	40 %
24.	Literatūras izpēte, eksperimenti starta estakādē, 3D modeļa projektēšana, konstrukcijas svārstību simulācijas, datu apstrāde, grafiskais atainojums, validēšana un apkopošana	80 %
25.	Literatūras izpēte, skaitliskā modelēšana un grafiskais atainojums	25 %
26.	Eksperimentālā modeļa izveide	10 %

Darba struktūra un galvenie rezultāti

Promocijas darba (kā tematiski vienotas zinātnisko publikāciju kopas) struktūra apkopota trīs nodaļās.

Pirmajā nodaļā ir veikti skeletoņa pētījumi, kas apkopoti 6., 7., 12., 14., 15., 19., 20., 21. un 24. zinātniskajā publikācijā, tajās apskatīti trīs galvenie temati:

- 1) objekta slīdes kustību uz ledus (ūdens slāņa) virsmas ar dažādiem ledus mehānisko īpašību parametriem un aerodinamisko pretestību;
- 2) pretestības ledus (ūdens slāņa) un aerodinamiskā (gaisa) pretestības koeficienta noteikšanas analītiskās metodes izveide un pārbaude, izmantojot skeletoņa kamanas Siguldas bobsleja un kamanīņu trases starta ieskrējiena estakādē;
- 3) skeletoņa kamanu slīdes kustības un konstrukcijas vibrāciju analīze.

Otrajā nodaļā ir apkopotas fluīda (gaiss) plūsmas zinātniskās publikācijas (1., 3., 4., 5., 8., 11., 16., 17. un 22.), tajās apskatīti četri galvenie temati:

- 1) vienkāršas formas objekta analīze nestacionārā fluīda plūsmā;
- 2) plakanas un perforētas plāksnes vibrāciju analīze nestacionārā fluīda plūsmā;
- 3) formas optimizācija un mijiedarbības analīze simetriskai prizmai gaisa plūsmā;
- 4) enerģijas ieguves optimizācija noteiktas ģeometriskās formas prizmām no gaisa plūsmas.

Trešajā nodaļā ir apkopoti citi fluīda dinamikas pētījumi (2., 9., 10., 13., 18., 23. un 25. zinātniskā publikācija), šajās zinātniskajās publikācijās apskatīti četri galvenie temati:

- 1) mainīga laukuma cieta ķermeņa struktūras vibrācijas šķidrumā enerģijas ieguvei;
- 2) dubultā pievada modelis mainīga laukuma cieta ķermeņa struktūras vibrācijām šķidrumā enerģijas ieguvei un zivs robota vienas astes horizontālās kustības matemātiskais modelis šķidrumā;
- 3) dubultplāksnes svārsta tipa modeļa vibrāciju analīze fluīda plūsmā;
- 4) ūdens pretestības pētījums motorizēta SUP dēļa piedziņas spuras formai.

Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes

1. Fluīda un cieta ķermeņa mijiedarbības literatūrā sastopamie standarta skaidrojumi nav precīzi: darbā pierādīts, ka ne vienmēr pie vizuāli garākās fluīda plūsmas līnijas (t. i., it kā lielākais lokālais ātrums) rodas mazākais spiediens (*lifting force*). Patiesībā eksistē sūkšanas parādība, kas arī samazina spiedienu.
2. Fluīda un cieta ķermeņa mijiedarbības analīzē inženieru aprēķinos var neņemt vērā viskozitāti. Tas ir attaisnojams, jo visas datormodelēšanas programmas (kas ievēro viskozitāti) arī ir aptuvenas.
3. Gaisa un cieta ķermeņa mijiedarbības analīzē nestacionārās plūsmas vai relatīvās kustībās var izmantot superpozīcijas principu, t. i., mijiedarbību var iedalīt divās zonās: spiediena zonā un sūkšanas zonā. Abās zonās lietojami klasiskās mehānikas likumi, ietverot daļiņu Brauna haotisko kustību.

4. Inženieru aptuvenos aprēķinos ūdens un cieta ķermeņa mijiedarbības aprakstam var izmantot aptuveno teoriju, kas iegūta gaisa un cieta ķermeņa mijiedarbības aprakstā, jo, pieaugot viskozitātei, ievērojami pieaug arī blīvums (līdz ~1000 reizēm).
5. Darbā iegūtie fluīda un cieta ķermeņa mijiedarbības diferenciālie vienādojumi izmantojami analīzes, optimizācijas un sintēzes problēmu risināšanā, nelietojot sarežģītas un laiktelpīgas “telpas laika” programmēšanas aptuvenās metodes.

IEVADS

Promocijas darbs kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa izstrādāts, piedaloties dažādos pētniecības virzienos. Pirmā daļa veidojusies, piedaloties ERAF praktiskās ievirzes pētījumu projektā “Virsmas īpašību ietekmes uz slīdamību pa ledu pētījumi” un veicot vibrāciju pētījumus. Otrā daļa izstrādāta, pateicoties profesora Jāņa Vības jaunajai teorijai par cieta ķermeņa mijiedarbību ar nestacionāru plūsmu, kur, izmantojot klasiskās mehānikas principus, izstrādātas vienkāršotas analītiskas sakarības šķidrums un cieta ķermeņa mijiedarbībai plūsmā un veikti analīzes un optimizācijas uzdevumi. Darba trešā daļa ir papildinājums otrajai, lielāku uzmanību veltot praktiskiem pētījumiem. Darba struktūras koncepcijas (vienota zinātnisko publikāciju kopa) izveides pamatā ir izmantota J. Vības¹ grāmatā izklāstītais dinamisku iekārtu analīzes, optimizācijas un sintēzes algoritms. Balstoties uz to, darbs izstrādāts vairākos etapos (2. tabula).

2. tabula

Promocijas darba kā tematiski vienotas zinātnisko publikāciju kopas izstrādes etapi

Etapi	1. Skeletons (gaisa plūsma, ūdens zem slicēm)	2. Fluīda (gaisa) plūsma	3. Citi fluīda dinamikas pētījumi
1. Sākotnējā problēmas analīze	+	+	+
2. Galveno apakšsistēmu optimizācija		+	
3. Ideālā likuma analīze		+	
4. Strukturālās shēmas sintēze	+	+	+
5. Optimālo parametru noteikšana	+	+	+

Pirmā daļa – skeletoņa pētījumi

- 1.1. Pielāgota un pārbaudīta optimālās sintēzes teorija “zaļās” enerģijas jomā: ekonomēt vai iegūt enerģiju no zemeslodi aptverošā fluīda plūsmas.
- 1.2. Veikti skeletoņa eksperimentālie pētījumi Siguldas trasē.
- 1.3. Izveidots skeletoņa un dažāda ledus mehānisko parametru (ūdens slāņa) matemātiskais modelis. Veikti modeļa skaitliskie testi.
- 1.4. Izstrādāts skeletoņa un ledus–gaisa lokālo mijiedarbību modelis, kas pārbaudīts skaitliski (ar datormodelēšanu) un eksperimentāli (Siguldas trasē).

¹ Я. Виба. “Оптимизация и синтез виброударных машин.” – Рига: Зинатне, 1988. 253 с.

Otrā daļa – objektu un gaisa mijiedarbības pētījumi

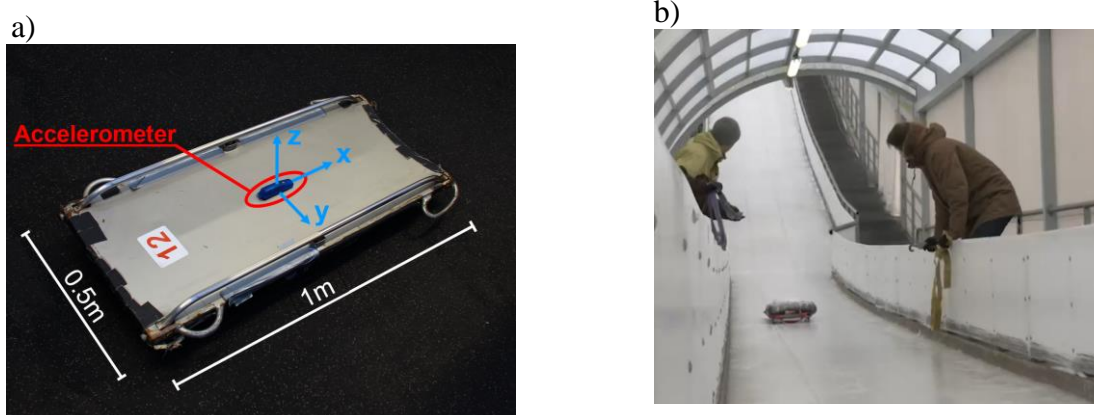
- 2.1. Izstrādāta teorija un metodika dažādas formas **nekustīgu** 2D objektu mijiedarbībai **ar kustīgu** fluīdu.
- 2.2. Izstrādāta teorija un metodika dažādas formas **kustīgu** 2D objektu mijiedarbībai **ar nekustīgu** fluīdu.
- 2.3. Izstrādāta teorija un metodika dažādas formas **kustīgu** 2D objektu mijiedarbībai **ar kustīgu** fluīdu.
- 2.4. Veikti 2D datormodelēšanas pētījumi mijiedarbību parametriskai identifikācijai.
- 2.5. Veikta dažāda veida vēja enerģijas iegūšanas reālu modeļu parametriskā optimizācija.
- 2.6. Veikti 3D eksperimentālie pētījumi vēja tunelī.
- 2.7. Izstrādāts, izprojektēts un izgatavots jauns vēja enerģijas iegūšanas rotācijas tipa prototips.
- 2.8. Veikts gaisa plūsmas mijiedarbību izstrādātās teorijas un prakses rezultātu noformējums zinātniskā grāmatā.

Trešā daļa – objektu un ūdens mijiedarbību pētījumi

- 3.1. Izmantota un pilnveidota fluīdu mijiedarbības teorija ūdens plūsmām.
- 3.2. Izstrādāta teorija robotizētas zivs astes enerģijas ieguvei no mainīga laukuma vibrācijām šķidrumā.
- 3.2. Izstrādāta teorija un metodika dubultplāksnes svārstību analīzei fluīda plūsmā.
- 3.3. Veikti 3D eksperimentālie pētījumi vēja tunelī dubultplāksnes modelim.
- 3.4. Veikta motorizētās *SUP* dēļa spuras motora vāka parametriskā optimizācija.
- 3.5. Izstrādāts patenta pieteikums fluīda plūsmas inducētu svārstību enerģijas ieguvei ar lineāru ģeneratoru.

1. SKELETONS (GAISA PLŪSMA, ŪDENS ZEM SLIECĒM)

Šis pētījums ir daļa no fundamentālā pētījuma par ledus slīdamību un procesiem starp slieci un ledu, kur tiek analizēts konkrēts modelis – skeletona un braucēja kustība pa slīpu ledus plakni. Kā starpslāni izmantojot ūdens cieto agregātstāvokli, iespējams ievērojami samazināt berzes spēka ietekmi un palielināt kustības ātrumu, padarot sporta veidus dinamiskākus un aizraujošākus. Lai palielinātu lietojamību, papildus tiek veidota sadarbība ar sportistiem un treneriem (Latvijas olimpiskā skeletona izlase), kuri var sniegt gan praktiskus padomus, gan atgriezenisko saiti par saviem novērojumiem trasē. Atšķirībā no citiem tehniskajiem sporta veidiem, kas izmanto bobsleja un kamaniņu trasi (1.1. att.), tieši skeletona kamanām ir iespēja regulēt slieču stingumu.



1.1. att. a) skeletona kamanas ar piestiprinātu trīsasu paātrinājumu mērītāju asu virzienos;
b) eksperiments Siguldas bobsleja un kamaniņu trases starta estakādē.

Kamanu konstrukcija ir veidota tā, ka tās abas slieces darbojas kā uzspriegotas atsperes starp braucēju un ledus virsmu. Tā ir principiāla atšķirība, salīdzinot ar citiem ledus renes sporta veidu aprīkojumiem. Tas nozīmē, ka brauciena laikā slieces ir pakļautas sarežģītiem kompleksiem slogojumiem, t. i.: ir ievērojami lielākas lokālās deformācijas; slieces tiek spiestas un liektas virāžu ieejās un izejās; tās pakļautas dažādām vibrācijām, pārvarot ledus nelīdzenumus un paverot plašas iespējas inženiertehniskiem pētījumiem. Promocijas darba zinātnisko publikāciju darba kopa nodaļas pētījumus var iedalīt trīs posmos.

1.1. Skeletona un braucēja kustības matemātiskais modelis

Pirmajā posmā izveidots matemātiskais modelis, ar kuru var modelēt skeletona un braucēja kustību slīpā plaknē, analizēt kontaktvirsmas (ledus nelīdzenumu) un slieces elastības parametru ietekmi uz slīdes kustību un noskaidrot, kā rezultātu ietekmē aerodinamiskās pretestības koeficients (6^2 , 7^3 , 10^4 un 12^5 publikācija, 19. un 20.

² <https://www.scientific.net/KEM.800.298>.

³ <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2019/Papers/N424.pdf>.

⁴ <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2019/Papers/N229.pdf>.

⁵ <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2018/Papers/N179.pdf>.

konferences tēzes). Divu brīvības pakāpju modelis, kur pirmais vienādojums apraksta kustību x ass virzienā:

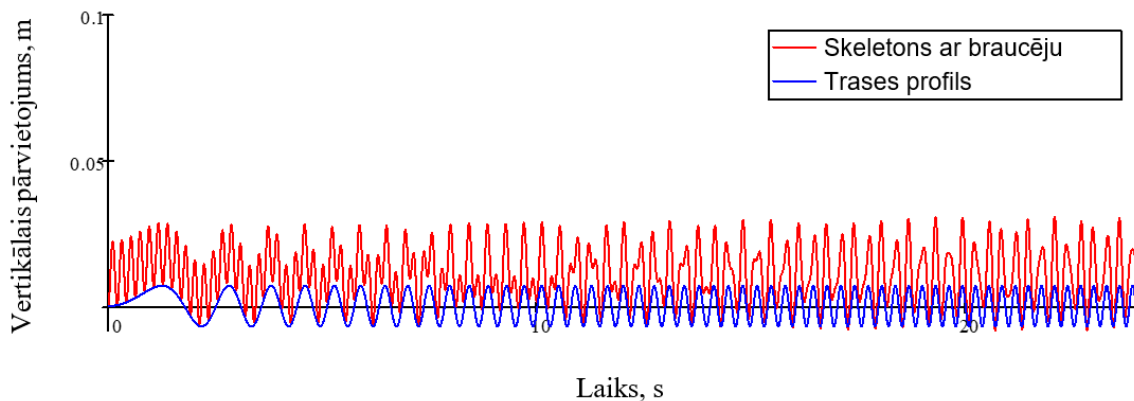
$$m\ddot{x} = mg \sin \alpha - \mu \left(\begin{array}{l} [-c(z + A \sin x) - b(\dot{z} + A\dot{x} \cos x)] \\ \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{sgn}(z + A \sin x) \right] \end{array} \right) - C_D \dot{x}^2. \quad (1.1.)$$

Otrs vienādojums apraksta kustību z ass virzienā:

$$m\ddot{z} = -mg \cos \alpha + \left(\begin{array}{l} -c(z + A \sin x) \\ -b(\dot{z} + A\dot{x} \cos x) \end{array} \right) \cdot \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{sgn}(z + A \sin x) \right], \quad (1.2.)$$

kur A – harmoniska kontaktvirsmas profila amplitūda, m; g – brīvās krišanas paātrinājums, m/s^2 ; μ – sausās berzes koeficients; c, b – stinguma un slāpēšanas parametri no slieces un ledus; \dot{x}, \ddot{x} un \dot{z}, \ddot{z} attiecīgo asu ātrumi un paātrinājumi; sgn – lieluma vērtība $+1$ vai -1 (piemēram, $\operatorname{sgn} = 1$).

Skeletoņa kamanas un braucēja masas centra kustība pār harmonisku trases ledus virsmas profilu redzama 1.2. attēlā.



1.2. att. Divu brīvības pakāpju modeļa harmoniska trases profila ($A = 1$ cm) un masas centra pārvietojums pēc laika.

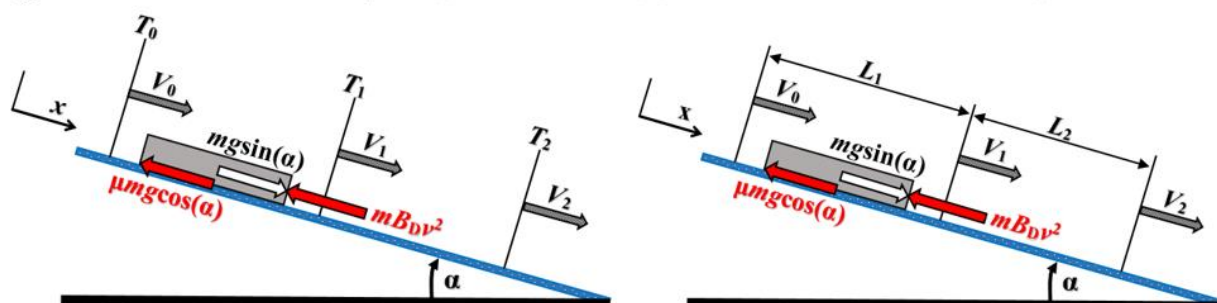
1.2. Pretestības koeficientu noteikšanas analītiskās metodes izveide

Otrajā posmā pēc sākotnējās problēmas analīzes tiek identificēti divi galvenie skeletoņa un braucēja slīdes kustību sistēmas ietekmējošie parametri – ledus berzes koeficients μ un aerodinamiskās pretestības koeficients B_D . Tiek izvirzīts hipotētisks jautājums, vai abu pretestības spēku koeficientus iespējams noteikt, neizmantojot speciālas laboratoriju iekārtas un apstākļus, zinot tikai laika mērījumus un attālumus, un, izmantojot tiešās integrēšanas metodi, atrast ātruma sakarību atkarībā no integrēšanas veida, laika un pārvietojuma. Šīs promocijas darba apakšnodaļas mērķis ir izveidot un eksperimentāli pārbaudīt abas integrēšanas metodes un skaitliski noteikt metožu precizitāti (21. publikācija; pilns raksts – promocijas darba pielikumā). Šeit tiek izstrādātas divas metodes, lai noteiktu koeficientus μ un B_D . Pirmā metode ņem vērā nobrauciena laiku, otrā metode – nobraukto attālumu. Šīs

metodes ļauj aprēķināt pretestības koeficientus, izmantojot ieejas datus no momentāno ātrumu ierakstiem, ar laika vai attāluma datiem, kā parādīts 1.3. a un b attēlā.

a) pēc laika un ātruma koeficientu μ un B_D noteikšana

b) pēc distances un ātruma koeficientu μ un B_D noteikšanai



1.3. att. Spēku, kas darbojas uz slīdošo objektu un trīs datu ņemšanas punktiem
a) pēc laika; b) pēc attāluma, modelis.

Pirmās metodes vienādojumi koeficientu noteikšanai:

$$\frac{a \tan\left(\frac{\sqrt{B_D} V_1}{\sqrt{\mu g \cos \alpha - g \sin \alpha}}\right)}{\sqrt{B_D \mu g \cos \alpha - B_D g \sin \alpha}} = -T_1 + \frac{a \tan\left(\frac{\sqrt{B_D} V_0}{\sqrt{\mu g \cos \alpha - g \sin \alpha}}\right)}{\sqrt{B_D \mu g \cos \alpha - B_D g \sin \alpha}}, \quad (1.3.)$$

$$\frac{a \tan\left(\frac{\sqrt{B_D} V_2}{\sqrt{\mu g \cos \alpha - g \sin \alpha}}\right)}{\sqrt{B_D \mu g \cos \alpha - B_D g \sin \alpha}} = -T_2 + \frac{a \tan\left(\frac{\sqrt{B_D} V_1}{\sqrt{\mu g \cos \alpha - g \sin \alpha}}\right)}{\sqrt{B_D \mu g \cos \alpha - B_D g \sin \alpha}}. \quad (1.4.)$$

Otrās metodes vienādojumi koeficientu noteikšanai:

$$\frac{\ln\left[\frac{g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) - B_D v_1^2}{2B_D}\right]}{2B_D} = -L_1 + \frac{\ln\left[\frac{g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) - B_D v_0^2}{2B_D}\right]}{2B_D}, \quad (1.5.)$$

$$\frac{\ln\left[\frac{g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) - B_D v_2^2}{2B_D}\right]}{2B_D} = -L_2 + \frac{\ln\left[\frac{g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) - B_D v_1^2}{2B_D}\right]}{2B_D}. \quad (1.6.)$$

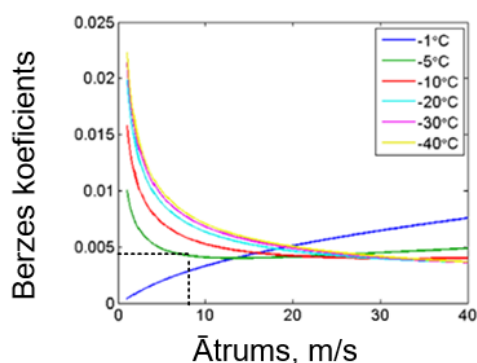
Salīdzinot ar citiem pētījumiem, šeit tiek izmantots berzes koeficienta vidējais lielums no eksperimentiem ar iegūto vērtību 0,0045. Šī vērtība ir desmit reizes mazāka nekā Blau⁶ uzrādītā vērtība, taču labi saskan ar citu pētnieku sniegtajiem rezultātiem. 5.8. attēlā (Blau, attēls adaptēts no *Tribology Handbook*, 1991), redzams, ka berzes koeficients nerūsējošam tēraudam un ledum pie -5°C ir aptuveni 0,03. Savukārt Poirier u. c.⁷ konstatēja, ka berzes koeficients ir aptuveni 0,0042. Makkonen u. c.⁸ izmantoja eksperimentālos datus par ledus

⁶ P. J. Blau (2008) Friction science and technology, From Concepts to Applications, Second Edition. CRC press. DOI: 10.1201/9781420054101.

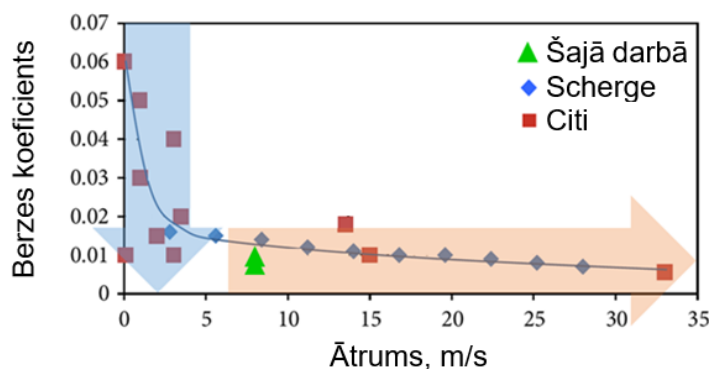
⁷ L. Poirier, E. P. Lozowski, S. Maw, D. J. Stefanyshyn, R. I. Thompson (2011) Experimental analysis of ice friction in the sport of bobsleigh Sport. Eng. 14 67–72. DOI: 10.1007/s12283-011-0077-02.

⁸ L. Makkonen, M. Tikanmäki (2014) Modeling the friction of ice. Cold Reg Sci Technol, 102, pp. 84-93. DOI: 10.1016/j.coldregions.2014.03.002.

berzi, pārbaudot matemātisko modeli visdažādākajos apkārtējās vides apstākļos. Šī pētījuma salīdzinājums ar *Makkonen* u. c. ir parādīts 1.4. attēlā. Šajā darbā ledus berzes koeficients μ trešajā braucienā $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrā bija 0,0043. *Makkonen* u. c. slīdes kustības analīzē $\sim 8\text{ m/s}$ ātrumā $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrā ledus berzes koeficients μ ir aptuveni 0,0045. Berzes koeficients, ko ieguvis *Scherge* u. c.⁹ bija lielāks. Konkrētā berze tika iegūta eksperimentu laikā ar bobsleju, kas bija smagāks par šī pētījuma skeletonu, izskaidrojot lielāku berzi. Atšķirību var aplūkot 1.5. attēlā, attēls modificēts no *Scherge* u. c.



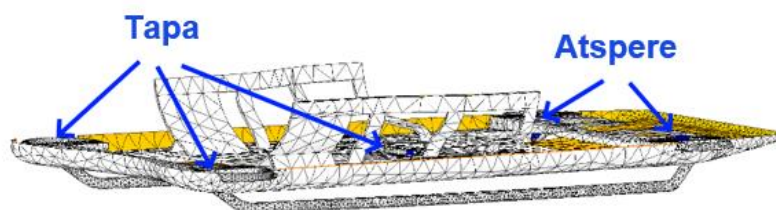
1.4. att. Modelētais berzes koeficients μ tēraudam ar ledu, kā ātruma funkcija dažādās temperatūrās, modificēts no *Makkonen* u. c.



1.5. att. Berzes koeficients μ un ātrums ar šī un citu pētījumu rezultātiem, modificēts no *Scherge* u. c.

1.3. Skeletoņa kamanu slīdes kustības vibrāciju analīze ar mainīgu slieču stingumu

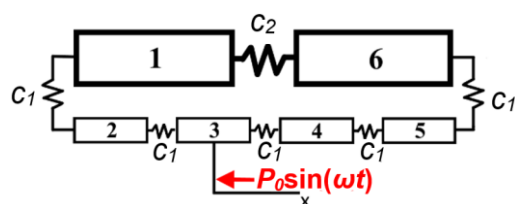
Trešajā posmā pēc matemātiskās analīzes modelis tiek simulēts ar *SolidWorks Simulation*. Uzdevums ir noteikt, kā skeletoņa kamanu slieču stinguma maiņa ietekmē skeletoņa kamanu konstrukcijas struktūras pašsvārstības. Pēc ledus trases eksperimentālo datu apstrādes iegūtas galvenās dominējošās frekvences, ko var iedalīt kustības berzes procesa raksturojošajās un tādās, kas attiecas uz struktūras pašsvārstībām. Rezultāti salīdzināti un analizēti ar datorsimulāciju 3D vidē (1.6. att.)



1.6. att. 3D skeletoņa kamanu modelis ar vienkāršotiem slieču stinguma izmaiņu modelēšanas savienojumiem.

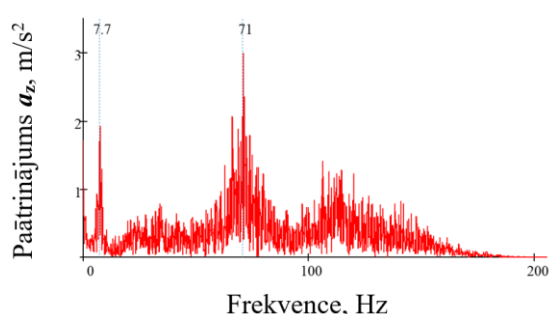
⁹ M. Scherge, R. Böttcher, M. Richter, U. Gurgel (2013) High-speed friction experiments under lab conditions: on the influence of speed and normal force ISRN Tribol. 2013 1–7. DOI: 10.5402/2013/70320.

Papildus izstrādāts vienkāršots pašsvārstības frekvenču noteikšanas matemātiskais modelis 2D telpā 6 BP ķēdes veida sistēmai (1.7. att.), 24. publikācija, papildus analizēti citu konstrukciju vibrāciju mērījumi, 14.¹⁰, 15.¹¹ publikācija.

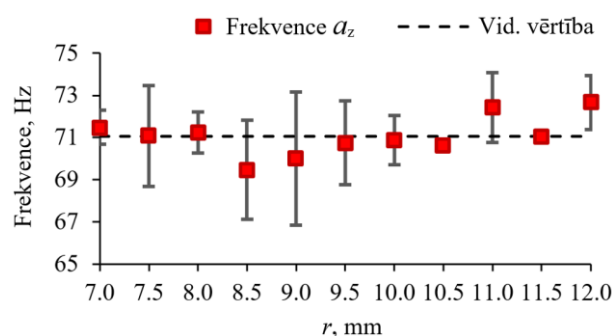


1.7. att. Skeletona un braucēja matemātiskais ķēdes modelis (c_1, c_2 – atsperes stingumi; x – pārvietojums; $P_0 \sin(\omega t)$ – ierosmes spēks).

Analizējot eksperimenta datus, var secināt, ka nozīmīgākās paātrinājuma vērtības veidojas no kontakta ar pamatni, skeletonam slīdot pa ledus virsmu. To apliecina vertikālā komponente A_z spektrālajā grafikā, kas parādīts 1.8. attēlā. Veikti mērījumi ar dažādiem skeletona slieces stinguma rādiusiem r un noteikta tā ietekme uz pašsvārstību frekvences izmaiņu kamanas konstrukcijai (1.9. att.). No iegūtā rezultāta var secināt, ka svārstības būtiski nemainās sportistu izmantotajā r diapazonā un ir ap 71 Hz.



1.8. att. Vertikālo paātrinājumu spektrs.



1.9. att. Frekvences izmaiņa atkarībā no skeletona kamanas slieces stinguma rādiusa r .

3D modelēšanas rezultāti parāda, ka, palielinot atsperes spriegojumu, palielinās pašsvārstību frekvences vērtība. Tika noteiktas pirmās 20 modeļa pašsvārstību frekvences (1.10. att.). 3D modelēšanas rezultāti apstiprina, ka starp atrastajām 20 rezonanses pašsvārstību formas modam atbilst modas pie frekvences vērtībām 15 Hz un 71 Hz (1.10. attēls).

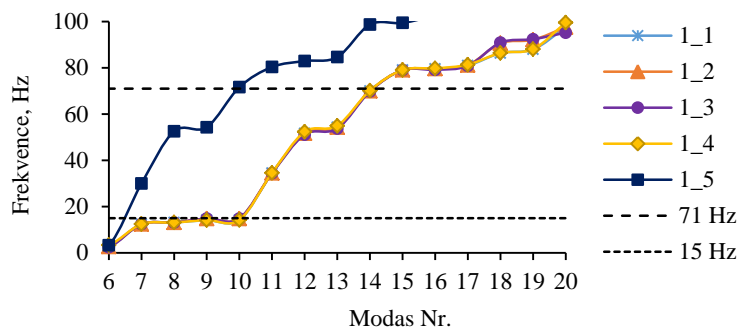
Matemātiskās ķēdes metodes modeļa (1.7. att.) analītiskā risinājuma rezultāti tika iegūti, atrisinot 1.7. vienādojumu:

$$\begin{aligned}
 & -4,100\,625 \cdot 10^{71} \omega^{12} + 1,702\,706\,378\,269\,617\,706\,2 \cdot 10^{78} \omega^{10} \\
 & -2,330\,550\,006\,758\,863\,037\,2 \cdot 10^{84} \omega^8 + 1,173\,048\,438\,913\,584\,662 \cdot 10^{95} \omega^4 \quad (1.7.) \\
 & -1,655\,977\,938\,480\,901\,193 \cdot 10^{95} \omega^4 + 2,267\,791\,336\,595\,195\,112\,8 \cdot 10^{99} \omega^2 = 0,
 \end{aligned}$$

ar leņķiskā ātruma ω funkcijas krustpunktiem ar nulli (1.11. att.).

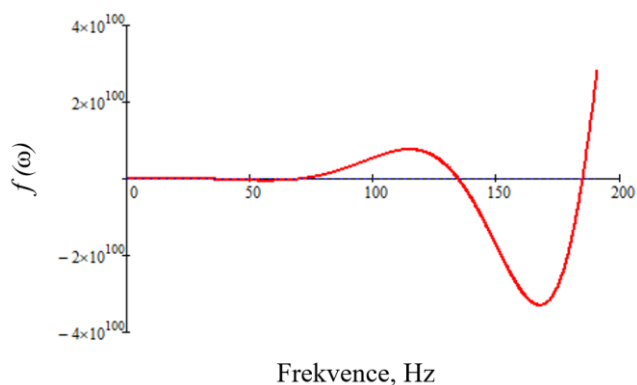
¹⁰ <http://tf.llu.lv/conference/proceedings2018/Papers/N094.pdf>.

¹¹ <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2017/Papers/N031.pdf>.



	Stingums, $c, (\text{N}\cdot\text{m}^{-1})\cdot\text{m}^{-2}$	Sloojums, N/m^2
1_1	Mazs	Liels
1_2	Liels	Liels
1_3	Liels	Mazs
1_4	Mazs	Mazs
1_5	Fiksēts savienojums	

1.10. att. 3D frekvenču simulāciju rezultāti skeleta kamanai ar dažādiem slieču stingumiem un fiksētu savienojumu.



Nr.	Frekvence, Hz
1	0
2	19,69
3	71,13
4	134,63
5	185,13
6	217,57

1.11. att. Leņķiskā ātruma funkcijas krustpunkti ar nulli – rezonanses frekvences.

2. FLUĪDA (GAISA) PLŪSMA

Promocijas darba – zinātnisko publikāciju darba kopas – otrā nodaļa veltīta cieta ķermeņa mijiedarbības analīzei šķidrums plūsmā. Nodaļā izstrādāta jauna analītiska teorija par gaisa un ūdens mijiedarbību, ja tajā kustas ciets ķermenis, vai otrādi. Šādas vienkāršotas metodes praktiskais lietojums paver iespējas analizēt plūsmas mijiedarbību ar dažādiem objektiem ar daudz mazāku resursu daudzumu, nav jāizmanto sarežģītas un dārgas specializētas datorprogrammas, kuru aprēķins nereti ir ļoti laikietilpīgs. Šīs zinātnisko publikāciju darba kopas nodaļas pētījumus var iedalīt četrās apakšnodaļās.

2.1. Vienkāršas formas objekta analīze nestacionārā fluīda plūsmā

Pirmajā apakšnodaļā – vienkāršas formas objekta analīze. Apakšnodaļā piedāvāta aptuvena metode spēku noteikšanai, kas saistīti ar šķidrums mijiedarbību ar cietu ķermeni, un apskatīta mehāniskā sistēma plaknē, kas atrodas šķidrums plūsmā ar bezgalīgu BP (brīvības pakāpju) skaitu, kas tiek samazināts līdz 5 BP, kur 3 BP cietam ķermenim un 2 BP spiediena un vākuma zonām. Nestacionāras kustības diferenciālvienādojumus veido klasiskās mehānikas likumi. Aptuvenās metodes tiek skaitliski pārbaudītas ar datormodelēšanas palīdzību. Šķidrums (gaisa) mijiedarbības analīze tiek veikta divu veida ģeometrijas cietiem ķermeņiem – plakanai plāksnei un dimanta formas objektam. Modelēšanas rezultātus izmanto, lai precizētu piedāvātās aptuvenās metodes parametrus. Apakšnodaļas beigās iegūtie teorētiskie rezultāti tiek izmantoti prizmatisko ķermeņu kustības analīzē, lai iegūtu enerģiju no šķidrums plūsmas. Pēc tam veikta plakanas plāksnes parametriskā optimizācija plāksnes kustības ātruma un pagrieziena leņķa parametriem pie maksimālas jaudas iegūšanas kritērija (1.¹², 3.¹³, 5.¹⁴, 16.¹⁵, 17.¹⁶ publikācija).

Jaunizveidotais matemātiskais modelis mijiedarbības analizēšanai sastāv no divām daļām, spiediena un vakuuma puses (2.1. att.).

Spiediena puse tiek aprakstīta ar kustības daudzuma izmaiņas teorēmu diferenciālā formā (Meriami u. c.¹⁷):

$$Vdm \cos \beta = dNdt, \quad (2.1.)$$

$$dm = \rho VB \cos \beta dt dL, \quad (2.2.)$$

kur dm – fluīda plūsmas elementārdaļas masas tilpums ar ātrumu v pret slīpu virsmu; β – leņķis starp plūsmu un virsmu normāles kontaktpunkts; dN – trieciena spēks normāles

¹² <https://www.intechopen.com/books/design-optimization-of-wind-energy-conversion-systems-with-applications/synthesis-and-optimization-of-wind-energy-conversion-devices>.

¹³ <https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/4796>.

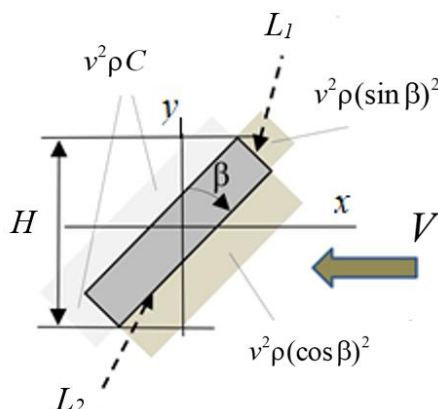
¹⁴ <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2020/Papers/TF365.pdf>.

¹⁵ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217338377>.

¹⁶ <https://www.jvejournal.com/article/17676>.

¹⁷ Meriam JL, Kraige LG and Bolton JN. Engineering Mechanics: Dynamics. 8th ed. New York: John Wiley & Sons; 2016. 736 p. ISBN: 9781119044819 1119044812.

virzienā pret virsmas elementārlaukumu; t – laiks; dL – virsmas elementārgarums; B – objekta garums (šajā 2D gadījumā konstants).



2.1. att. Spiediena sadalījums: taisnstūra plāksnei.

Integrējot 2.1. vienādojumu, var aprēķināt papildu spiedienu plūsmas virzienā malām L_1 , L_2 plakanai plāksnei. Spiediena sadalījums malās L_1 , L_2 šeit dotajiem ķermeņiem, kas parādīti (2.1. att.):

$$p_{L1} = V^2\rho \cos^2 \beta, \quad (2.3.)$$

$$p_{L2} = V^2\rho \sin^2 \beta. \quad (2.4.)$$

Piedāvātajā jaunajā modelī, vakuuma pusē gar malu, kas atrodas tieši aiz attiecīgā objekta, ieteicams ņemt konstantu spiedienu Δp_2 , proporcionālu blīvumam ρ , kas reizināts ar plūsmas ātrumu v kvadrātu:

$$\Delta p_2 = V^2\rho C, \quad (2.5.)$$

kur C – konstante, kas jānosaka eksperimentāli vai datorsimulācijās.

Tādējādi cietajam ķermenim ir iespējams atrast kopējo spēku plūsmas virzienā.

Aproksimējot taisnstūra cietu ķermeni, iegūst spēku F_{xr} , kas dots 2.6. vienādojumā:

$$F_{xr} = -HBv^2\rho \left(C + \frac{\cos^3 \beta + d \sin^3 \beta}{\cos \beta + d \sin \beta} \right), \quad (2.6.)$$

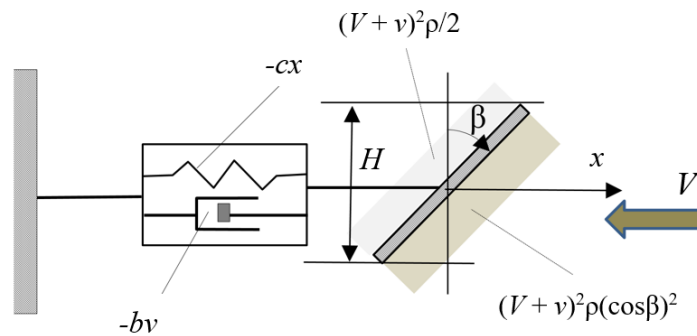
kur d – malu attiecība L_2/L_1 ; B – platums; H – šķērsriezuma augstums (perpendikulāri plūsmai, 2.1. att.).

Ar iegūto analītisko sakarību (2.6. vienādojums) var pierādīt, ka fluīda un cieta ķermeņa mijiedarbības problēmu **identificēšanai** var izmantot aptuveno analītisko metodi. Analītiskā risinājuma rezultātu validēšanai var izmantot datorsimulācijas eksperimentus. Koeficienta C noteikšanai tiek izmantotas skaitliskās simulācijas ar *SolidWorks Flow*, plašāk – 3. publikācijā.

2.2. Plakanas plāksnes kustības modelēšana fluīda plūsmā

Otrā apakšnodaļā veikta ķermeņa mijiedarbības analīze, optimizācija un sintēze, lai analizētu vibrācijas, kas rodas no šķidruma un cietās ķermeņa mijiedarbības, mainot plakanās plāksnes leņķi pret plūsmu. Šeit galvenais izaicinājums ir nestacionāra šķidruma un ķermeņa mijiedarbības analīze, optimizācija un sintēze. Izmantotas telpas un laika programmēšanas metodes un aptuvenas analītiskās metodes. Apskatīta aptuvena analītiskā metode, kurā objekta mijiedarbība ar šķidruma plūsmu ir iedalīta divās daļās šķidruma ķermeņa mijiedarbības telpā. Pirmā ir frontālās daļas spiediena puse, kas rodas, izmantojot kustības daudzuma izmaiņas likumu un ko var ērti aprakstīt diferenciālā formā. Otrajā daļā tiek aprakstītas mijiedarbības aiz plāksnes, plāna vakuuma veidojoša puse. Šī plānā vakuuma puse ir atkarīga arī no frontālās zonas plūsmas mijiedarbības. Aptuvenās analītiskās metodes pārbaudītas ar eksperimentiem vēja tunelī (8.¹⁸, 11.¹⁹ publikācija).

Plakanas plānas ($d \sim 0$) plāksnes (2.2. a att.) divdimensiju modelis translācijas kustībā parādīts 2.4. attēlā. Modelis sastāv no lineāras atsperes ar stingumu c un slāpēšanu b .



2.2. att. Atjaunojamās enerģijas ieguves no fluīda plūsmas modelis.

Diferenciālvienādojums plāksnes kustībai x ass virzienā:

$$m\ddot{x} = -cx - b\dot{x} - A\rho(0,5 + \cos^2 \beta)(V + \dot{x})^2 \frac{V + \dot{x}}{|V + \dot{x}|}, \quad (2.7.)$$

kur $A = LB$ plāksnes virsmas laukums; ρ – fluīda blīvums; β – plāksnes leņķis pret plūsmu; m – plāksnes masa; V – fluīda plūsmas ātrums; v – plāksnes kustības ātrums pa x asi; relatīvais ātrums $V_r = V + v$.

Atjaunojamo enerģiju attēlo kā slāpēšanas spēku ($-b\dot{x}$). Jauda P :

$$P = b\dot{x}^2. \quad (2.8.)$$

Attiecīgi vidējā jauda P_a būs:

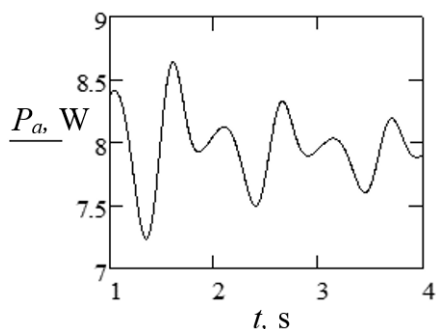
$$P_a = \frac{\int_0^t b\dot{x}^2 dt}{t}. \quad (2.9.)$$

¹⁸ <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2019/Papers/N147.pdf>.

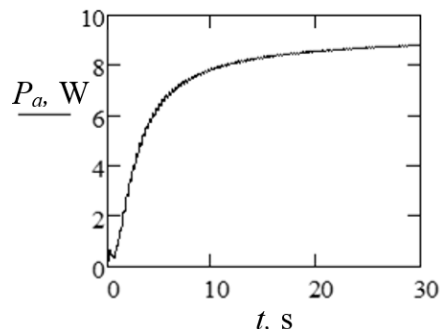
¹⁹ <https://www.jvejournal.com/article/20801/abs>.

2.7. vienādojuma analīze ļauj secināt, ka dotās sistēmas efektivitāti ir iespējams analizēt pēc diviem sistēmas parametriem – c un b – un trīs laika vai fāzes koordinātu vadības darbībām – β , V un A .

Skaitliskā modelēšana 2.7. vienādojumam tika veikta ar programmu *MathCad*. Skaitliskās modelēšanas rezultāti vadības kontrolei pie leņķa $\beta = (\pi/2, 5)\sin(7t)$ parādīti 2.3. attēlā, ar ātruma vadības kontroli $V = V_0[2 - 0,5\sin(10t)]$ – 2.4. attēlā.



2.3. att. Vidējā jauda P_a no ģenerators spēka $b\dot{x}$ ar harmoniskas vadības leņķa izmaiņu β .



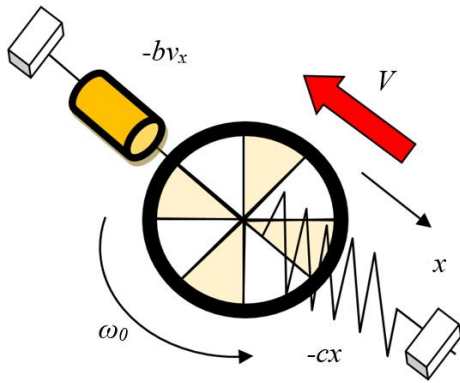
2.3. att. Vidējā jauda P_a no ģenerators spēka $b\dot{x}$ ar harmoniskas vadības ātruma izmaiņu V .

2.3. Formas optimizācija un mijiedarbības analīze simetriskai prizmai gaisa plūsmā

Trešajā apakšnodaļā veikta formas optimizācija. Darbs veltīts šķidrums (gaisa) un cietā ķermeņa (prizmas) mijiedarbības, formas ģeometrijas optimizācijas analīzei, ņemot vērā dažādus kritērijus. Enerģijas iegūšanai no gaisa plūsmas, izmantojot aksiāli simetrisku ķermeni, kuram pa aploci ir izveidoti simetriski izgriezumi šķērsriezuma laukuma maiņai (2.5. att.). Inženiertehniskajiem aprēķiniem tiek piedāvāts vienkāršots matemātiskais modelis. Arī šī modeļa pamatā tiek izmantots spiediena un vakuuma zonas jēdziens, pakļaujot ķermeni fluīda (gaisa) plūsmai. Sākumā visi aprēķini tiek veikti, pieņemot, ka pētāmā ķermeņa ģeometriskie izmēri ir nemainīgi. Pēc tam, lai uzlabotu kopējās sistēmas efektivitāti, sistēmas parametri tiek mainīti ar konstantu soli, veicot sīku šķidrums un ķermeņa mijiedarbības reakcijas virsmas analīzi. Matemātiskajam modelim ir šādi pieņēmumi: šķidrums (gaisa) plūsma ir lamināra, nespiežama (konstants blīvums) un fluīda (gaisa) viskozitāte netiek ņemta vērā (4.²⁰ publikācija).

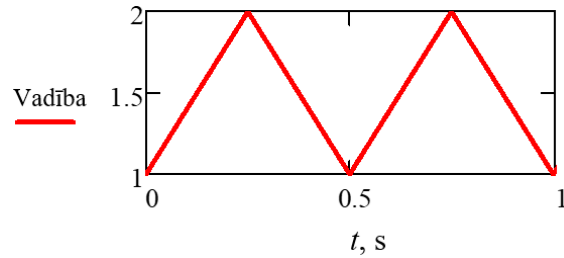
Apskatītā sistēma sastāv no: diviem koncentriskiem apļveida diskiem, kas savienoti centrā; atsperes; lineārā ģenerators plūsmā $V_0 = 10$ m/s. Virsējā diskveida plāksne brīvi griežas virs otra (kas negriežas), abām plāksnēm ir vienāds laukums un pārmaiņus tiek atvēti/aizvērti perforējumi pēc vadības kontroles, kā parādīts 2.6. attēlā.

²⁰ <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2020/Papers/TF170.pdf>.



2.5. att. Diskveida formas maiņas modelis:
 V – plūsmas ātrums; $-bv_x$ – spēks no ģeneratora; $-cx$ – atsperes spēks; ω_0 – rotējošā diska leņķiskais ātrums.

$$\text{Vadība} = 1 + \frac{\arccos[\cos(\omega_0 t)]}{\pi}$$



2.6. att. Diska laukuma maiņas kontrolēšanas vadība.

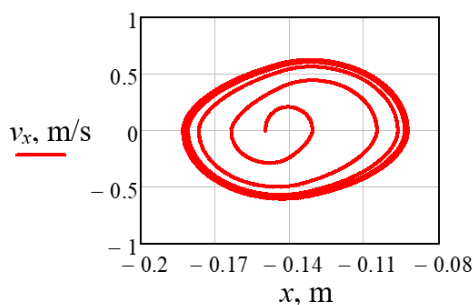
Kustības diferenciālvienādojums diskveida plāksnes kustībai:

$$m\ddot{x} = -cx - (F_0 \operatorname{sgn} \dot{x} - b\dot{x}) + (1 + C) \cdot \frac{A}{\pi} \cdot \{\arccos[\cos(\omega_0 t)] + \pi\} \rho (-V_0 - \dot{x})^2 \operatorname{sgn}(-V_0 - \dot{x}), \quad (2.10.)$$

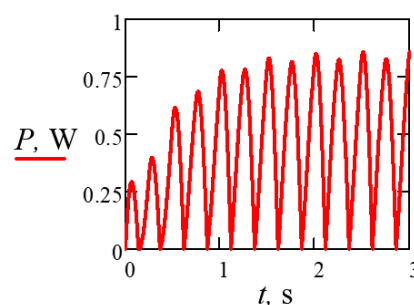
kur c – lineārā atsperes stingums, F_0 un b – lineārā ģeneratora slāpēšanas konstantes, $(1 + C)$ – spiediena un sūkšanas pušu mijiedarbības koeficients, V_0 – plūsmas ātrums, ω_0 – harmonikas vadības leņķiskā frekvence, A – nemainīgs laukums, ρ – gaisa blīvums, sgn – +1 vai –1.

Parametriskās optimizācijas uzdevums ir atrast kombināciju septiņu parametru ($m, c, F_0, b, \omega_0, A, V_0$) telpā ar dotajām konstantēm, lai no plūsmas iegūtu maksimālo jaudu.

Šeit apskatīta trīs parametru kombinācija (m, c, ω_0) optimālās vērtības noteiktas tuvu rezonansei $\omega_0 = \sqrt{c/m}$. Kustības analīze 2D telpā šim gadījumam parādīta 2.7.–2.8. attēlā.



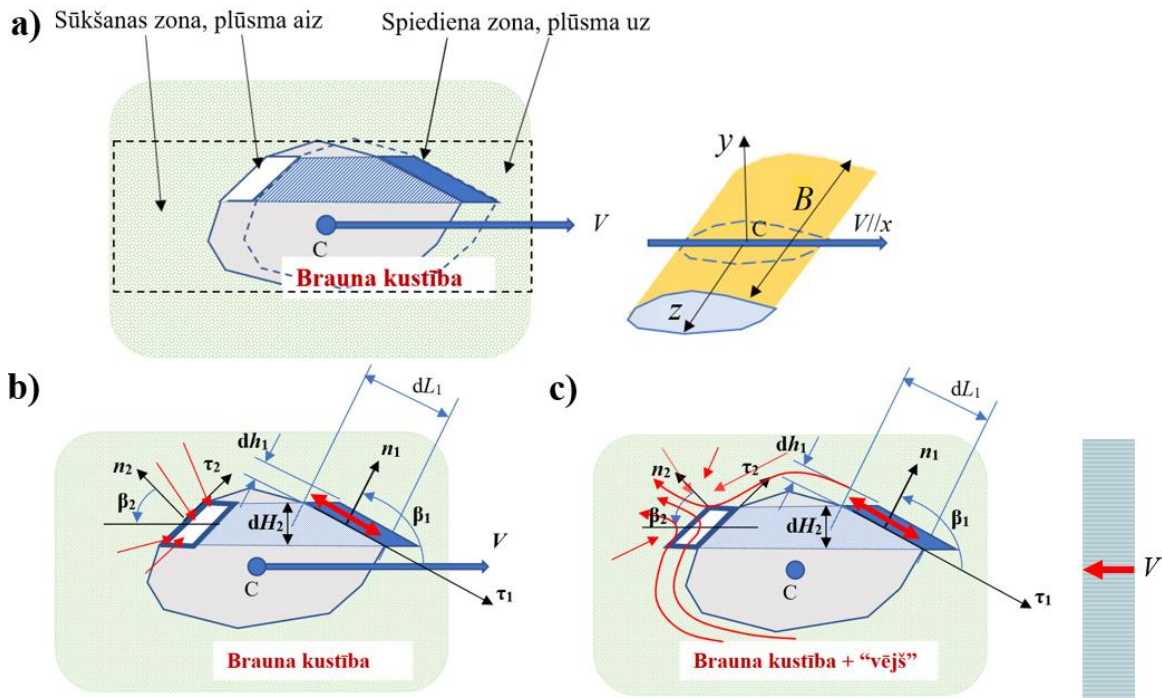
2.7. att. Kustība fāzu plaknē: x – plāksnes pārvietojums; v – plāksnes ātrums.



2.8. att. Jauda plāksnes modelim, kad plūsmas ātrums $V_0 = 10$ m/s; $A = 0.2$ m \times 0.2 m; $\omega_0 = 4\pi$ s⁻¹.

2.4. Enerģijas ieguves optimizācija noteiktas ģeometriskās formas prizmām no gaisa plūsmas

Ceturtajā apakšnodaļā aprakstīta analītiskā metode kustīgu vai nekustīgu ķermeņu (prizmu) mijiedarbības analizēšanai un kustības sintēzei gaisa plūsmā, neizmantojot telpas un laika programmēšanas skaitliskās metodes.



2.9. att. Prizmas modelis: a) ārējā relatīvā plūsma ap prizmu pie ļoti maziem plūsmas ātrumiem; b) lēna prizmas kustība bezvējā; c) gaisa mijiedarbības modelis ar stacionāru prizmu.

Šim nolūkam inženieru aprēķiniem izmantots vienkāršots fluīda (gaisa) daļiņu un cietā ķermeņa mijiedarbības matemātiskais modelis, izmantojot kustības daudzuma izmaiņas likumu. Cietā ķermeņa (prizmas) un gaisa mijiedarbība aplūkota dažādos gadījumos: kustīgs ķermenis (prizma) gaisā; nekustīgs ķermenis (prizma) gaisa plūsmā; kustīgs ķermenis (prizma) gaisa plūsmā. Cietā ķermeņa (prizmas) un gaisa mijiedarbības sarežģīto uzdevumu vienkāršo, izmantojot superpozīcijas principus, t. i., ņemot vērā plūsmas augšpus un leļpus (vai priekšpusi un aizmuguri) cietā ķermeņa apgabalus. Noskaidrots, kā šajos divos apgabalos rodas spiediena un sūkšanas zonas ar analītiski aprēķināmiem gaisa spiedieniem, kas atkarīgi no plūsmas ātruma kvadrāta un ķermeņa formas. Visi vienādojumi tiek veidoti, pamatojoties uz klasiskās mehānikas likumiem. Veidojot aptuveno matemātisko modeli, viskozos spēkus neievēro. Tiek salīdzināti dažādu prizmu un gaisa plūsmas mijiedarbību skaitliskie rezultāti, un tiem detalizēti apskatīti teorētiskie rezultāti. Matemātiskais modelis šajā darbā ir piemērojams tikai tiem ķermeņiem, kam tiek veikta taisna translācijas kustība (22. publikācija; pieņemta publicēšanai, sk. promocijas darba 1. pielikumu). Matemātiskais modelis ir aprakstīts noteiktas ģeometriskās formas prizmas gadījumam (2.9. att.).

Salīdzinot ļoti mazu gaisa elementu spiediena zonā, tiek izmantota kustības daudzuma izmaiņas teorēma diferenciālā formā. Saskaņā ar iepriekš minēto principu (superpozīcijas princips), ņemot vērā n_1 normāles laukuma projekciju pirms un pēc sadursmēm (šķidrums un ķermeņa mijiedarbība), iegūst Brauna vienādojumu (2.11. vienādojums) mijiedarbībai ar prizmu:

$$\begin{aligned} m_{10}V_{B1} - (-m_{10}V_{B1}) &= -N_1 dt, \\ m_{10} &= V_{B1} B \rho dt dL_1, \\ p_{10} &= \frac{|N_1|}{B dL_1}, \end{aligned} \quad (2.11.)$$

kur m_{10} – Brauna mijiedarbības masa; V_{B1} – vidējais gaisa normāles ātrums spiediena zonā; N_1 – normāles spēks mazam elementam no gaisa; dt – laika solis; dL_1 – apskatītā mazā elementa platums; B – prizmas augstums perpendikulāri kustības plaknei; ρ – gaisa blīvums; p_{10} – atmosfēras spiediens spiediena zonā.

No prizmas vēja puses gaisa mijiedarbības (spiediena pusē):

$$\begin{aligned} m_1 v \cos \beta_1 - 0 &= -\Delta N_1 dt, \\ m_1 &= v B \rho \cos \beta_1 dt dL_1, \\ \Delta p_1 &= \frac{|\Delta N_1|}{B dL_1}, \end{aligned} \quad (2.12.)$$

kur m_1 – prizmas un gaisa mijiedarbības robežslāņa masa; v – prizmas ātrums; β_1 – leņķis starp ātrumu v un normāli n_1 ; ΔN_1 – papildu normāls spēks, kas darbojas uz prizmu; Δp_1 – spiediena pieaugums spiediena zonā.

No sešu vienādojumu (2.11. un 2.12. vienādojums) sistēmas ir iespējams atrast sešus nezināmos. Diviem nezināmajiem ir papildus jāatrisina:

$$p_{10} = 2V_{B1}^2 \rho dt, \quad (2.13.)$$

$$\Delta p_1 = \rho v^2 dt \cos^2 \beta_1. \quad (2.14.)$$

Attiecīgi ir iespējams lietot 2.11.–2.14. vienādojumu sūkšanas zonā (vakuuma pusē). Tomēr uzdevums ir nedaudz sarežģītāks ar kustības daudzuma diferenciāļiem sūkšanas zonā: nav skaidrs, kā vienkāršot vienādojumus diferenciālā formā. Tāpēc tiek ierosināts izmantot vienu vai otru hipotēzi. Hipotēze jāpārbauda eksperimentāli vai izmantojot datoru lietojumprogrammas.

Pirmā hipotēze. Iesūkšanas zonā spiediena samazinājums Δp_{21} visā virsmā ir nemainīgs un proporcionāls ātruma v kvadrātam. No kā izriet:

$$\Delta p_{21} = -\rho C_1 v^2, \quad (2.15.)$$

$$p_{20} = 2V_{B2}^2 \rho dt, \quad (2.16.)$$

kur C_1 – konstante, kas atrasta saskaņā ar eksperimentālo vai skaitlisko modelēšanu; V_{B2} – vidējais normālais gaisa ātrums sūkšanas zonā.

Otrā hipotēze. Sūkšanas zonas spiediena samazinājumā Δp_{22} visā virsmā nav konstants, bet ir proporcionāla ātruma v kvadrātam, un tas ir atkarīgs arī no virsmas laukuma normālā n_2 un arī novietojuma leņķa β_2 , tādējādi iegūstot:

$$\Delta p_{22} = -\rho C_2 v^2 \cos \beta_2, \quad (2.17.)$$

$$p_{20} = 2V_B^2 \rho dt, \quad (2.18.)$$

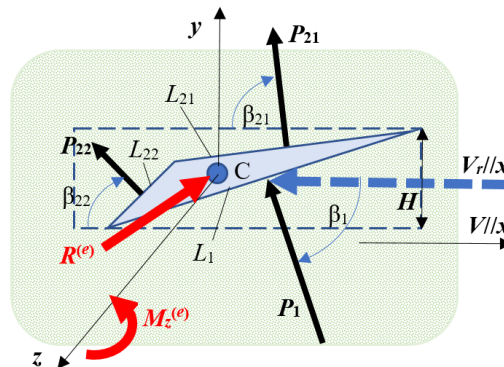
kur C_2 ir otrā konstante, kas atrodama tāpat kā C_1 .

Iegūtās diferenciālās attiecības (2.13.–2.18. vienādojums) var izmantot inženiertehniskās analīzes un sintēzes uzdevumos zemu ātrumu diapazonā. Lai to izdarītu, jāizmanto šīs konfigurācijas prizmas parametri kopā ar objekta virsmas integrālo vienādojumu risinājumu.

Praktiskiem inženiertehniskiem aprēķiniem ieteicams izmantot $V_{B1} = V_{B2}$ zema ātruma $v \ll V_{B1}$ un $v \ll V_{B2}$ diapazoniem. Tad $p_{01} = p_{02} = p_0$, kur p_0 ir vidējais atmosfēras spiediens ap doto prizmu.

2.4.1. Trīsstūrveida prizmas optimizēšana translācijas kustībā gaisa plūsmā

Kustības modelis ar noteiktu garumu un leņķiem ir parādīts 2.10. attēlā, kur $R^{(e)}$ ir ārējie spēki un $M_z^{(e)}$ moments, nodrošinot trīsstūra prizmas taisnu translācijas kustību.



2.10. att. Trīsstūrveida prizmas kustība vēja virzienā $V_r // V // x$.

Optimizācijas uzdevumam vajadzētu noteikt prizmas bremzēšanas ātrumu V , kas nodrošina maksimālu jaudu mehatroniskajā sistēmā. Kustības diferenciālvienādojums:

$$m\ddot{x} = -(V_0 - V)^2 C_0 + Q. \quad (2.19.)$$

Šeit $C_0 = B\rho \left[\left(L_1 \cos^3 \beta_1 + C_2 \cos \beta_{21} \right)^2 L_{21} + C_2 \cos^2 \beta_{22} \right] L_{22}$, kur m – prizmas masa; \ddot{x} – ierobežots paātrinājums pa x asi; Q – bremzēšanas spēks.

Seko optimizācijas uzdevums, kur dotajiem kustības parametriem C_0 , m stacionārā kustībā, ja paātrinājums ir nulle ($\ddot{x} = 0$). Prizmas bremzēšanas spēks Q mehatroniskajā sistēmā jāatrod ar maksimālo jaudu P , ko rada gaisa plūsmas spēks.

Šajā gadījumā bez papildu ierobežojumiem ir viens optimālais risinājums:

$$V = \frac{V_0}{3}, \quad P = \frac{4C_0V_0^3}{27}, \quad Q = \frac{4C_0V_0^3}{9}. \quad (2.20.)$$

Kā var secināt no 2.20. vienādojuma (ja mainās plūsmas ātrums V_0), reālai sistēmai nepieciešama mehatroniska spēka vadības Q sistēma.

2.4.2. Spicas trijstūrveida prizmas kustība vertikālajā plaknē

Apskatīta asa prizma (kad pret plūsmu vērstās virsotnes iekšējais leņķis ir ļoti mazs) kustība vertikālā plaknē, kad leņķi ir vienādi $\beta_{22} = \beta_{21} = \beta_1$ (2.11. att.).

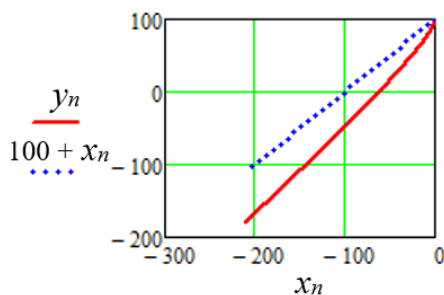
Saskaņā ar iepriekšminēto pirmā modeļa teoriju (izmantojot konstanti C_1) asas prizmas kustību vertikālā plaknē raksturo diferenciālvienādojumi:

$$m\ddot{x} = -[\rho LB(\dot{x} \sin \alpha - \dot{y} \cos \alpha)^2 (1 + C_1) \sin \alpha \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x} \sin \alpha - \dot{y} \cos \alpha) \sin \alpha], \quad (2.21.)$$

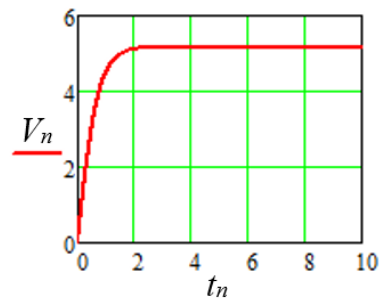
$$m\ddot{y} = \left[\rho LB(\dot{x} \sin \alpha - \dot{y} \cos \alpha)^2 (1 + C_1) \sin \alpha \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x} \sin \alpha - \dot{y} \cos \alpha) \cos \alpha \right] - mg, \quad (2.22.)$$

kur \dot{x} un \dot{y} ir paātrinājuma projekcijas; α – leņķis starp parasto un vertikālo virzienu; sgn ir ± 1 , atkarībā no funkcijas iekavās; g – brīvās krišanas paātrinājums.

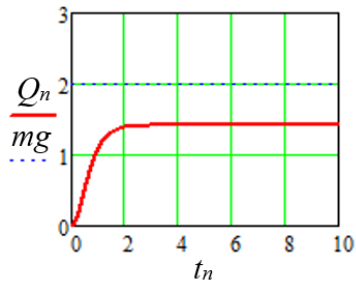
Iegūtie vienādojumi ļauj atrisināt analītiskās un parametriskās optimizācijas problēmas šajā nestacionārā kustības gadījumā. Turklāt jāatzīmē, ka šī kustība ir tuvu putna planēšanai vai niršanas kustībai gaisā. Planēšanas kustības aprēķina piemērs parādīts zemāk. 2.11.–2.14. attēlā. Visi parametri doti SI sistēmā $\rho = 1,25$; $LB = 0,04$; $mg = 2$; $C_1 = 0,5$; $\alpha = \pi / 4$.



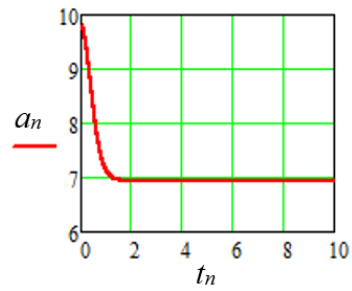
2.11. att. Masas centra kustības trajektorija vertikālā plaknē, sākum koordinātas $(x, y) = (0, +100)$.



2.12. att. Ātruma projekcija uz prizmas normāli.



2.13. att. Gaisa mijiedarbības frontālais spēks.



2.14. att. Kopējais prizmas paātrinājums ar kritienu un planēšanu. Attēlā redzams, ka viskozie spēki, kas minēti raksta sākumā, netiek ņemti vērā.

Iegūtie modelēšanas rezultāti apliecina, ka ātruma projekcija perpendikulāri asai prizmai sasniedz terminālā ātruma vērtību un turpmāk nemainās. Tomēr šajā virzienā nav paātrinājuma komponenta. Attiecīgi paātrinājums tangentes virzienā kļūst nemainīgs, savukārt ātruma komponents ar laiku palielinās lineāri. Tas nozīmē, ka, lietojot praksē, ir jāievēro gaisa viskozitāte, vai jāizmanto reāla prizma ar neasu priekšējo virsmu.

3. CITI FLUĪDA DINAMIKAS PĒTĪJUMI

Pieprasījums pēc autonomām efektīvām borta enerģijas ierīcēm mūsdienās ir ļoti liels, īpaši veicot uzdevumu bezpilota iekārtās, kur enerģijas iegūšana no vides ir kritiski svarīga. Autonomiem transportlīdzekļiem, kas pārvietojas ar šķidrums palīdzību, ir iespējas izmantot dažādus enerģijas ieguves paņēmienus, apvienojot tos ar kustības nodrošināšanas piedziņas mehānismu. Promocijas darba zinātnisko publikāciju kopas trešās daļas pirmajās divās apakšnodaļās tiek apskatīta zivs astes darbības principa piedziņa ar plaknes locīšanos/vibrēšanu kustības nodrošināšanai. Elastīgas laukuma maiņas tipa vibrējoša (astes vai spārnu) struktūra ir labāka, lai palielinātu enerģijas efektivitāti, salīdzinot ar fiksēta laukuma tipa konstrukcijām, taču šādas elastīgās struktūras galvenais trūkums ir tāds, ka to ietekmē dotā šķidrums viskozā daba. Šis pētījums vērsts uz jaunas pieejas izstrādi enerģijas ieguvei borta resursu akumulatora papildināšanai no apkārtējā vides. Mērķis ir izveidot autonomu transportlīdzekli, izmantojot struktūras vibrācijas ar mainīgu laukumu (perforēta plāksne kā astes spura). Robotizētās zivis ir konstruētas tā, ka astes spuras pārvietojoties izmanto ūdeni, bet uzlādes laikā vērš asti ārā no ūdens gaisa plūsmā. Tiek samazināts nepieciešamo akumulatoru novietošanas daudzums, samazinot svaru un telpu. Līdz ar to parādās arī negatīvie aspekti, jāveic daudz enerģijas atjaunošanas etapu, lai veiktu uzlādi, patērējot vairāk laika misijas veikšanai. Visi procesu raksturojošie vienādojumi tiek veidoti saskaņā ar klasiskajiem mehānikas likumiem, plašāk par pētījumu – 2.²¹, 25. publikācijā (publicēšanas procesā). Papildus pie šīs zinātnisko publikāciju kopas sadaļas jāatzīmē darbs pie Frānsisa turbīnas tipa enerģētiskās iekārtas, plūsmas izraisītās vibrāciju un to radīto efektu dažādos darba režīmos izpētes, par šo jautājumu vairāk 13.²² publikācijā.

3.1. Vienas astes robota horizontālās kustības matemātiskais modelis šķidrumsā

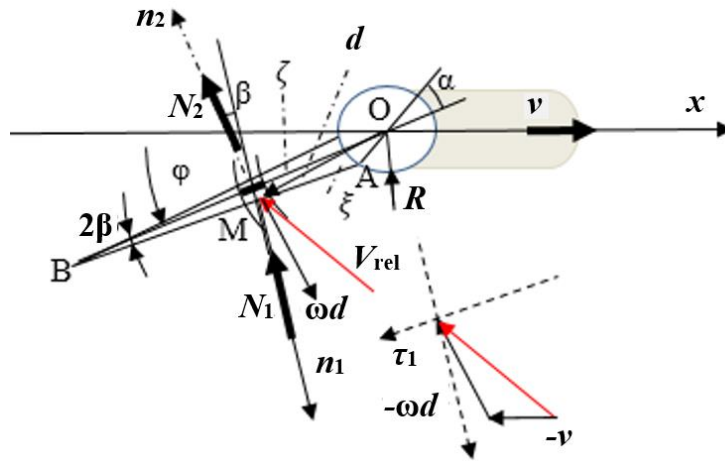
Tiek pieņemts, ka robotam horizontālas niršanas kustībai ir vienkāršots viena virziena pievads (3.1. att.) un ka modelis veic vienkāršu, lineāru kustību laikā, svārstoties ap asi O . Korpusu un aste tiek aprakstīta kā mehāniskā sistēma ar vienu brīvības pakāpi, ko nosaka koordināta x . Lai izvairītos no nestabilitātes – objekta rotācijas kustības, robotizētās zivs astes masas centrs sakrīt ar rotācijas asi O . Robota kustības diferenciālvienādojums:

$$(m_0 + m)\ddot{x} = -N_{1x} - N_{2x} - bx^2 \operatorname{sgn}(\dot{x}), \quad (3.1.)$$

kur m_0 – korpusa masa; m – astes masa; \ddot{x}, \dot{x} – attiecīgi korpusa paātrinājums un ātrums; N_{1x} – šķidrums mijiedarbības komponents spiediena zonā; N_{2x} – šķidrums mijiedarbības komponents ar asti sūkšanas (vākuma) zonā; bx^2 – korpusa nelineāra mijiedarbība ar šķidrums taisnā kustībā atkarībā no kustības ātrums $v = \dot{x}$; b – konstante.

²¹ https://agronomy.emu.ee/wp-content/uploads/2020/06/AR2020_Vol18SI1_Tipans.pdf.

²² <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2018/Papers/N092.pdf>.



3.1. att. Shematisks astes un šķidruma mijiedarbības aprēķina modelis.

Lai noteiktu vektora N_{1x} un N_{2x} komponentus, tiek ņemta vērā mijiedarbība divos bezgalīgi mazos astes apgabalos spiediena un sūkšanas zonās, kā parādīts 3.1. attēlā. Jāņem vērā arī astes leņķiskā ātruma griešanās virziens, kā arī zivs korpusa relatīvās kustības virziens. Rotācijas ātruma komponents plāksnes laukumam ir atkarīgs no attāluma līdz rotācijas asij, to izsaka no 3.1. vienādojuma kā integrālo diferenciālvienādojumu, ko var aptuveni atrisināt, izmantojot skaitliskās metodes.

Pirms integrēšanas tiek izveidoti analītiski saišu vienādojumi (3.2. un 3.3. vienādojums) spiediena zonai (uzplūdes virzienam) trīsstūriem OAB un OMB:

$$\xi = \frac{R \sin \gamma}{\sin(\alpha + \beta - \gamma)}; \quad (3.2.)$$

$$d = \frac{R \sin(\alpha + \beta)}{\sin(\alpha + \beta - \gamma)}, \quad (3.3.)$$

ja ξ , d un R ir parādīti 3.1. attēlā, bet γ ir \sphericalangle MOB leņķis.

Saskaņā ar otrajā nodaļa aprakstīto inženiertehnisko aprēķinu metodi, lai noteiktu spēkus N_{1x} un N_{2x} , vispirms tiek atrasti spēki normālā virzienā N_1 , N_2 (3.1. att.). Tie ir atkarīgi no relatīvā ātruma projekcijas kvadrātiem:

$$|N_1| = B\rho \left| \int_0^\beta (v \sin(\varphi - \beta) + \omega \xi)^2 d\xi \right|; \quad (3.4.)$$

$$|N_2| = B\rho C \left| \int_R^{R_2} (v \sin \varphi + \omega \zeta)^2 d\zeta \right|, \quad (3.5.)$$

kur ξ – attālums no sāna AMB un $d\xi$ ir diferenciālis no tā, abus aprēķinot no 3.3. vienādojuma; ζ – radiālais attālums gar OB (3.1. att.); C – konstante, aptuveni 0,5 (sk. 2.1 apakšnodaļu).

Aptuvenam 3.1. vienādojuma risinājumam spēkus N_{1x} un N_{2x} var izteikt kā:

$$F_{1x} = |N_1| \cdot \operatorname{sgn} \left[v \sin(\varphi - \beta) + \omega \frac{R + R_2}{2} \right] \sin(\varphi - \beta); \quad (3.6.)$$

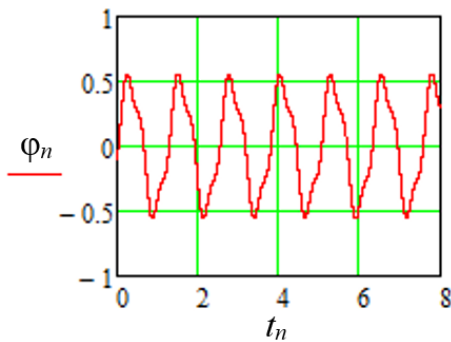
$$F_{2x} = |N_2| \cdot \operatorname{sgn} \left(v \sin \varphi + \omega \frac{R + R_2}{2} \right) \sin \varphi. \quad (3.7/)$$

Tālāk ir sniegts skaitliskās modelēšanas piemērs ar parametriem: $R = 0,05$ m; $R_2 = 0,25$ m un rezultātiem 3.2.–3.7. attēlā. Astes spuras griešanās leņķi un leņķisko ātrumu izsaka:

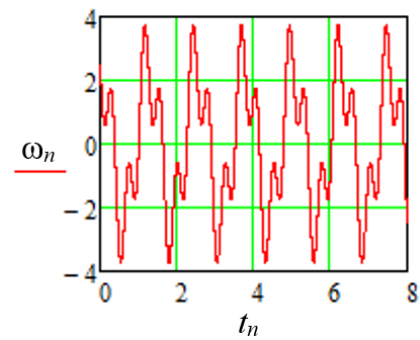
$$\varphi = a [\sin(pt) + 2\lambda_3 \sin(3pt + \varepsilon_3)]; \quad (3.8.)$$

$$\omega = a [\sin(pt) + 6p\lambda_3 \cos(3pt + \varepsilon_3)], \quad (3.9.)$$

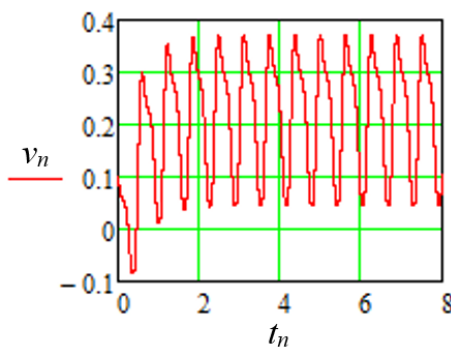
kur $\varepsilon_3 = -1,571$; $\lambda_3 = \pm 0,1$; $p = 5$ un $a = 0,5$.



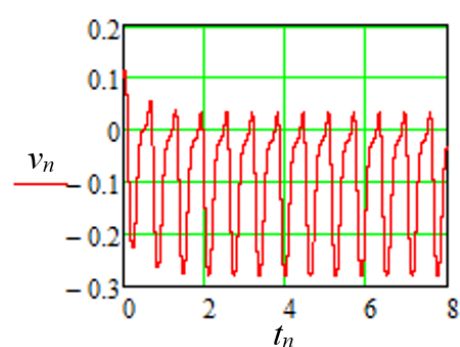
3.2. att. Astes pagrieziņa leņķis kā laika t funkcija.



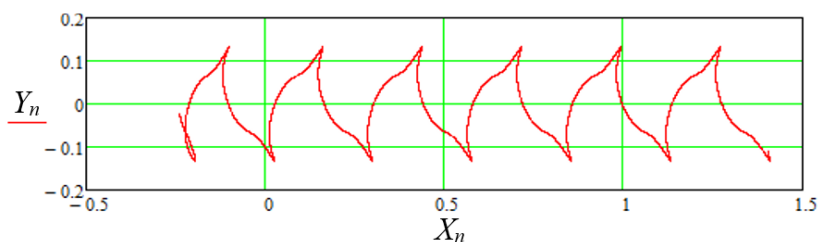
3.3. att. Astes pagrieziņa leņķiskais ātrums kā laika t funkcija, $\lambda_3 = -0,1$.



3.4. att. Korpusa ātrums v kā laika t funkcija $\lambda_3 = -0,1$.

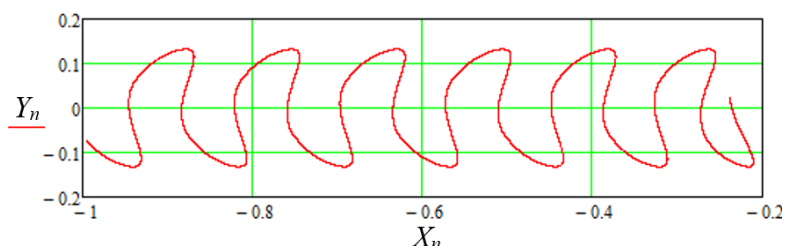


3.5. att. Korpusa atpakaļgaitas ātrums v kā laika t funkcija $\lambda_3 = +0,1$.



3.6. att. Astes punkta B trajektorija, virzoties uz priekšu absolūtajās

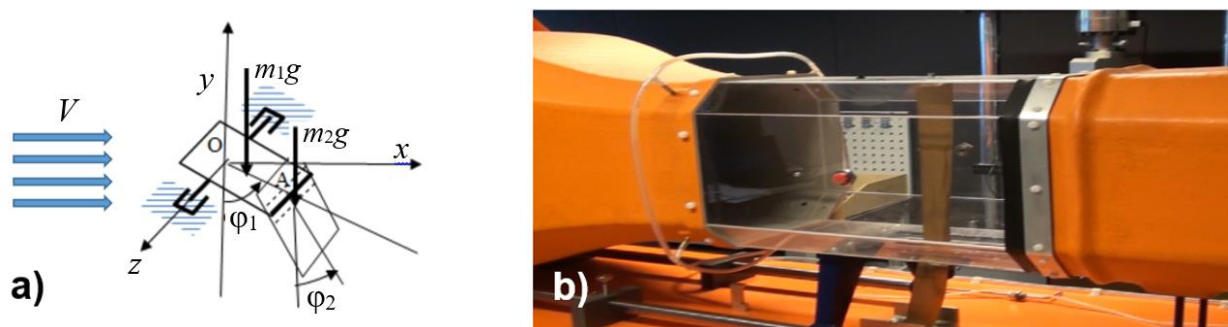
koordinātās XY plaknē, $\lambda_3 = -0,1$.



3.7. att. Astes punkta B trajektorija, virzoties atpakaļgaitā absolūtajās koordinātās XY plaknē, $\lambda_3 = +0,1$.

3.2. Dubultplāksnes vibrāciju analīze fluīda plūsmā

Promocijas darba zinātnisko publikāciju kopas trešās daļas nākamajā apakšnodaļā analizēta dubultplāksnes svārstību kustība vertikālajā plaknē, mijiedarbojoties ar fluīda (gaisa) plūsmu. Modeļi veido divas plāksnes, kas savstarpēji savienotas ar rotācijas šarnīru, un viena no tām pievienota pie pamatnes arī ar rotācijas šarnīru. Apskatīts gadījums, kad fluīds plūst horizontālā virzienā, bet plāksnes pārvietojas ap šarnīriem vertikālā plaknē (3.8. a att.). Veikts eksperiments vēja tunelī (3.8. b att.) pie dažādiem plūsmas ātrumiem, pēc tā analīzes izveidots analītiskais modelis.

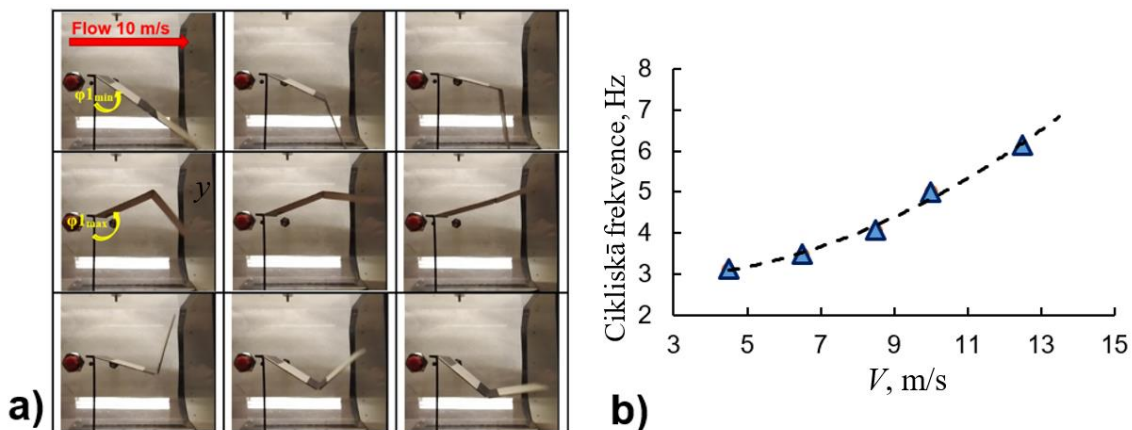


3.8. att. a) dubultplāksnes shematiskais modelis; b) “*Armfield*” zemskaņas vēja tunelis.

Tiek pieņemts, ka šķidruma plūsma ir lamināra. Plāksņu mijiedarbība ar plūsmu apraksta kā lokalizētu daļiņu mijiedarbību ar plāksnēm, izmantojot masas centra un rotācijas momenta izmaiņas teorēmu mehāniskai sistēmai. Tiek pētīta sistēma ar divām brīvības pakāpēm. Mijiedarbība ar šķidrumu tiek tuvināta ar kvadrātisku sakarību plūsmas relatīvajam ātrumam, ņemot vērā kustības virzienu. Iegūto vienādojumu sistēmu izmanto kustības simulēšanai (18.²³ publikācija).

Palielinoties plūsmas ātrumam, attiecīgi pieaug plāksņu svārstību cikla frekvence (3.32. att.). Aproximējot ar otrās kārtas polinomu, pie visiem plūsmas ātrumiem korelācijas koeficients R^2 ir tuvu 1.

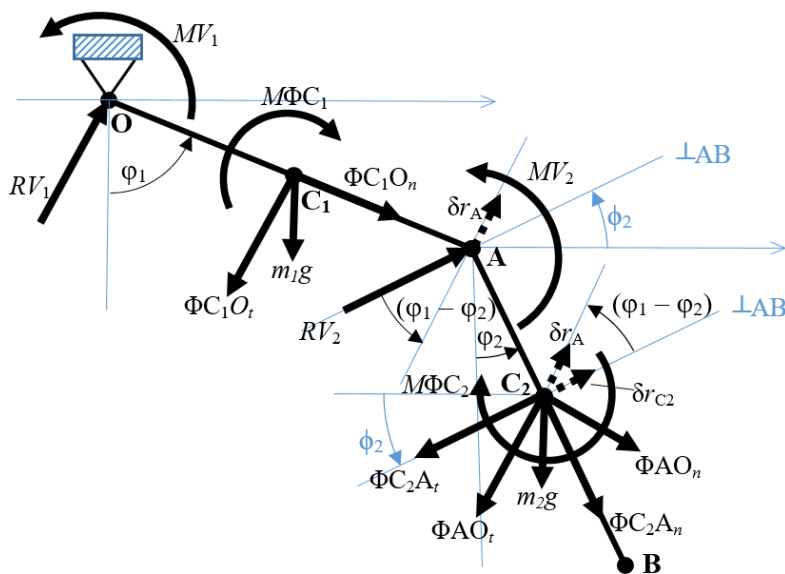
²³ http://tf.llu.lv/conference/proceedings2015/Papers/071_Viba.pdf.



3.9. att. a) dubultplāksnes modeļa viens svārstību cikls pie plūsmas ātruma 10 m/s;
b) viena svārstību cikla frekvence atkarībā no plūsmas ātruma.

Kustības diferenciālvienādojumi

Lai atrastu sistēmas (3.10. att.) kustības diferenciālvienādojumus ar divām brīvības pakāpēm, tika izmantots virtuālā darba princips²⁴. Punktu A un C₂ virtuālie pārvietojumi δr_A un δr_{C_2} var tikt izteikti kā: $\delta r_A = L_1 \delta \varphi_1$; $\delta r_{C_2} = r_2 \delta \varphi_2$, kur $\delta \varphi_1, \delta \varphi_2$ ir virtuālie leņķiskie pārvietojumi pirmajai un otrajai plāksnei.



3.10. att. Spēku shēma virtuālā darba principam.

Kustības diferenciālvienādojumi plāksnēm:

$$\begin{aligned}
 & MV_1 - (J_1 + m_1 \cdot r_1^2 + m_2 \cdot L_1^2) \ddot{\varphi}_1 - m_1 g r_1 \sin \varphi_1 \\
 & + RV_2 L_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - m_2 r_2 \ddot{\varphi}_2 L_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \\
 & - m_2 r_2 \dot{\varphi}_2^2 L_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) - m_2 g L_1 \sin \varphi_1 - MG_1 = 0;
 \end{aligned}
 \tag{3.10.}$$

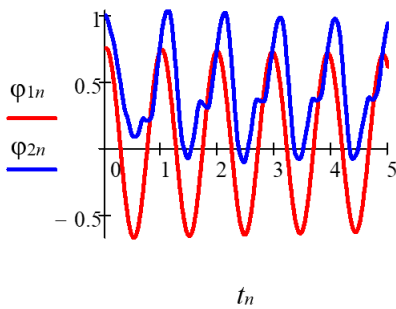
²⁴ Goldstein H., Poole C., Safko J. Classical Mechanics, third edition, Addison-Wesley, 2002, 647 p.

$$\begin{aligned}
 & MV_2 - (J_2 + m_2 r_2) \ddot{\varphi}_2 - m_2 L_1 \ddot{\varphi}_1 r_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \\
 & + m_2 \dot{\varphi}_1^2 L_1 r_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) - m_2 g r_2 \sin \varphi_2 - MG_2 = 0,
 \end{aligned}
 \tag{3.11.}$$

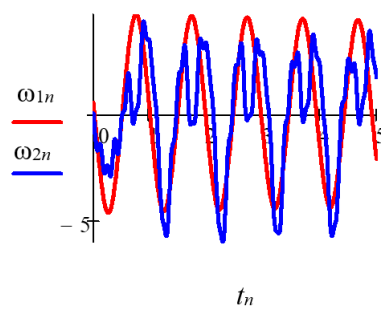
kur plūsmas mijiedarbības galvenie vektori RV_1, RV_2 un galvenie momenti MV_1, MV_2 punktos O un A; g – brīvās krišanas paātrinājums; J_1, J_2 – attiecīgās plāksnes inerces momenti; $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \ddot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_2$ – leņķiskais ātrums un paātrinājums attiecīgajām plāksnēm ar masu m_1 un m_2 ; MG_1, MG_2 – slāpējošā spēka moments, piemēram, no ģeneratora.

Modelējot 3.10 un 3.11. vienādojumu ar lineāras mijiedarbības spēku, grafiskais rezultāts parādīts 3.10.–3.12. attēlā ar parametriem $V_0 = 2$ m/s, $\lambda_1 = 0,2$; $\lambda_2 = 0,4$; $\alpha_2 = 0$, (plūsmas ātruma funkcija izteikta Furjē rindā $V = V_0 [1 + \lambda \sin(pt) + \lambda_2 \sin(2pt + \alpha_2) + \lambda_3 \sin(3pt + \alpha_3) + \dots]$).

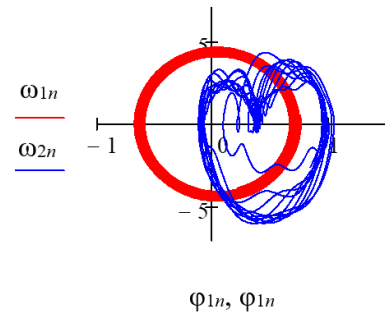
Komentāri par kustības īpašībām doti grafikos.



3.10. att. Plāksņu rotācijas leņķa izmaiņas pēc laika. Kustība izteikti stabila ar zemu pārejas procesu.



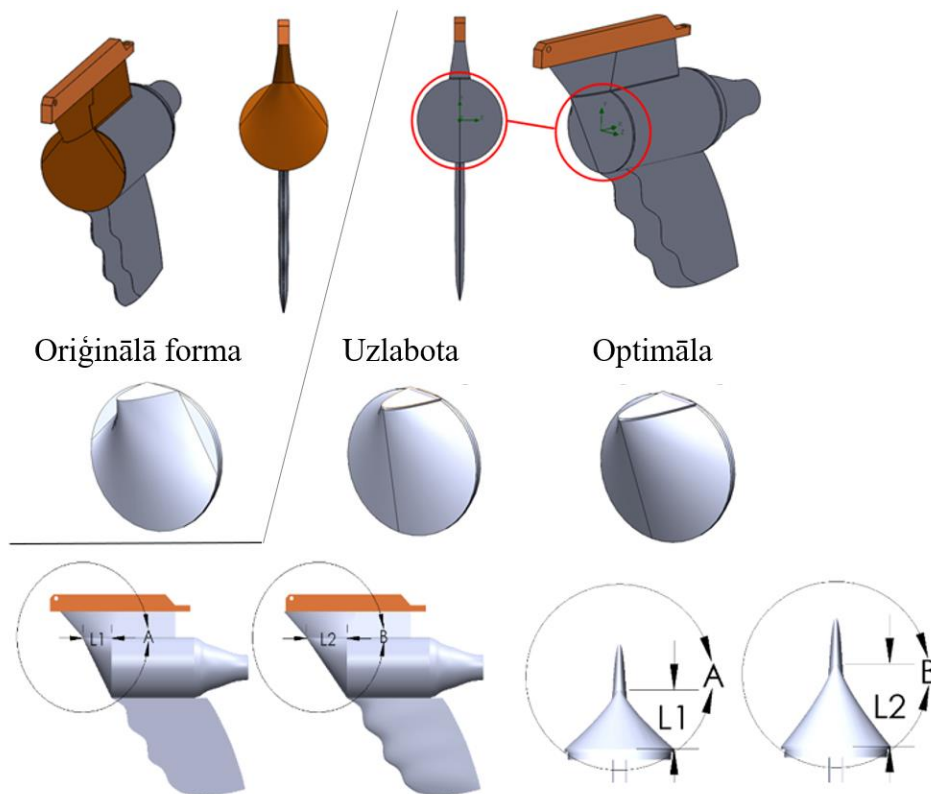
3.11. att. Leņķiskā ātruma izmaiņas pēc laika. Abām plāksnēm leņķiskā ātruma amplitūda ir gandrīz vienāda un svārstās vienā frekvencē.



3.12. att. Plāksņu kustības fāzu plakne. Pēc pārejas procesa kustība otrajai plāksnei nostabilizējas.

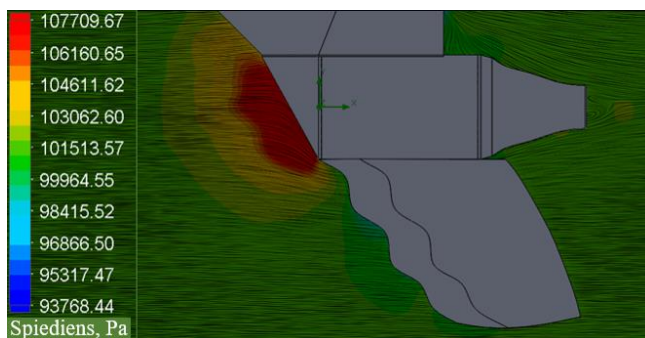
3.3. Ūdens pretestības pētījums motorizēta SUP dēļa piedziņas spuras formai

Promocijas darba zinātnisko publikāciju kopas trešās daļas pēdējā apakšnodaļā veiktas ūdens pretestības simulācijas motorizēta SUP (*Stand Up Paddle*) dēļa piedziņas spuras ūdens ieplūdes/izplūdes kanāla konstrukcijai (3.13. att.). Piedziņas spura ir piestiprināta pie dēļa un fiksējas ar standarta mehānismu. Skaitļošana tika veikta, izmantojot *SolidWorks Flow Simulation* programmatūru, ar mērķi pilnveidot piedziņas spuras spiediena zonas formu ar minimālu pretestības spēku no šķidrums plūsmas un, iespējams, lielāku ieplūdes ātruma attiecību.

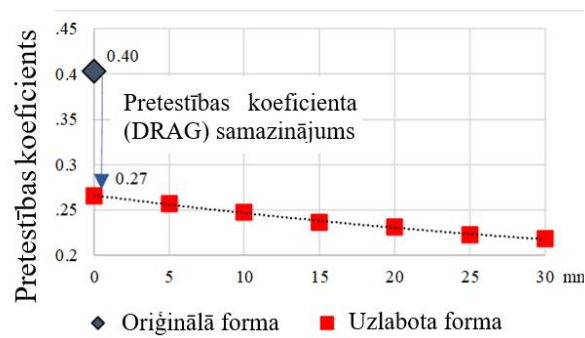


3.13. att. Motorizētās spuras oriģinālā forma (kreisajā pusē) un pēc modifikācijām (labajā pusē).

Modelēšanas rezultāti parādīja, ka spiediena zonas forma rada ievērojamu frontālo pretestību, aprēķini parādīja, ka malu noapaļošana nodrošina 35 % no pretestības koeficienta samazinājumu, bet turpmāka pilnveidošana samazināja to līdz papildu 10 % (23. publikācija; pieņemta publicēšanai, sk. promocijas darba 1. pielikumu).



3.14. att. Plūsmas līniju un spiediena sadalījums ap motorizēto SUP dēļa spuru.



3.15. att. Hidrodinamiskās pretestības koeficients (pa kreisi) un pretestības spēks (pa labi) oriģinālajai un uzlabotajai motorizētās spuras formai.

SECINĀJUMI

1. Promocijas darba kā tematiski vienotas zinātnisko publikāciju kopas pirmajā nodaļā skaitliskā modeļa izveide skeletonam ar braucēju uz slīpas plaknes sniedz iespēju: prognozēt kustību daudz garākā trases posmā, ņemot vērā ledus berzes koeficientu, aerodinamisko pretestību, slieces elastību raksturojošos parametrus un virsmas profilu (eksperimentos izmantotās starta estakādes maksimālais garums ir 50 m, sportistu sacensībās izmantoto trašu garumi ir vidēji 1200 m).
2. Izmantojot mehānikas likumus, ir iespējams analītiski noteikt ledus berzes koeficientu un aerodinamiskās pretestības koeficientu. Pie ievades parametriem nepieciešams kustības ātrums noteiktos laika vai pārvietojuma punktos, pie laika mērīšanas sensoriem, vismaz divos etapos. Skeletoņa sportā un citos ziemas renes sporta veidos metodi var izmantot, ja ātrums pārsniedz 6 m/s un apskatītie etapi pietiekami īsi, lai pieņemtu, ka pretestības koeficienti etapos ir konstanti. Metodes novitāte sniedz iespēju vienlaikus noteikt gan ledus berzes koeficientu, gan gaisa pretestības koeficientu, paverot plašas iespējas tās lietošanai praksē.
3. No praktiskajiem eksperimentiem var secināt, ka, palielinot slieces stingumu sportistu izmantotajā skeletoņa kamanu slieču spriegošanas diapazonā, berzes spēku radīto svārstību frekvence samazinās kustības virzienā un praktiski nemainās vertikālajā virzienā. Slieces stinguma izmaiņas praktiski neietekmē noteiktās skeletoņa kamanas struktūras pašsvārstību rezonanses frekvences 15 Hz un 71 Hz kustības laikā. Izstrādātais 6 BP matemātiskais modelis skeletoņa kamanu pašsvārstības frekvenču noteikšanai ļauj viegli un ātri noteikt aptuvenās rezonanses frekvences, zinot skeletoņa kamanas un slieces stinguma parametru vērtības. Eksperimentālos rezultātus papildus ietekmē vides apstākļi, kuros mainās slieces elastīgās īpašības (papildus šajā darbā netiek apskatīti).
4. Promocijas darba otrajā nodaļā ir izstrādāta jauna metode aptuvenas plūsmas un nekustīgas ķermeņa mijiedarbības aprēķināšanai: kustīgam ķermenim ar mazu gaisa plūsmas ātrumu, nekustīgam ķermenim gaisa plūsmā un kustīgai prizmai gaisa plūsmā. Tiek pieņemts, ka šķidrums ir laminārs un šķidrums ir nesaspiežams, matemātiskajā modelēšanā netiek ņemta vērā fluīda viskozitāte, bet kā alternatīva tiek izmantots mijiedarbības koeficients (konstante).
5. Tiek iegūts stabils rezultāts enerģijas ieguvei ar mainīga laukuma prizmām. Lai arī iegūtā jauda ir maza, piedāvātā teorija (superpozīcijas princips) palīdz identificēt cēloni un dod iespēju strādāt pie efektivitātes uzlabošanas. Ierosinātais princips viegli saprotamā un tiešā veidā izskaidro matemātisko būtību. Ir konstatēts, ka alternatīva pieeja cieta ķermeņa un fluīda (gaisa) mijiedarbības parādības enerģijas ieguves aprēķināšanā, izmantojot vienkāršu matemātisko modeli, ir praktiski lietojama, neizmantojot tradicionālās CFD virpuļa izraisītās vibrāciju metodes.

6. Šajā darbā izstrādātā metode palīdz vienkāršoti veikt analīzes, optimizācijas un sintēzes uzdevumus objektu mijiedarbībai ar šķidrumiem objektam translācijas kustībā, ņemot vērā tikai ķermeņa un šķidruma mijiedarbības koeficientu. Teoriju var attiecināt uz jebkuras sarežģītības ķermeņa šķidruma mijiedarbību, ja tas paredzēts matemātiska rakstura darbībām.
7. Promocijas darba trešajā nodaļā apskatīti zemūdens transportlīdzekļi, kur stabilas konstrukcijas, piemēram, astes spārna vai spārnu, svārstības no pastāvīgas fluīda plūsmas var izraisīt, ja mehatroniskā vadības sistēma maina plāksnes darbības laukumu. Stacionāras svārstības notiek ļoti ātri, dažu ciklu laikā. Iegūtā ģenerators momentānā jauda ir neliela mazo perforēto plākšņu laukuma dēļ. Efektivitātes uzlabošanai jāveic parametru optimizēšana.
8. Zemūdens robotu ilgstošas darbības nodrošināšanai ir jābūt iespējai pārslēgt mehatronisko vadības sistēmu no korpusa niršanas cikla kustības uz jaudas uzpildes cikla kustību gaisa plūsmā. Enerģijas papildināšana ir iespējama arī zem ūdens. Šajā gadījumā ir jāizmanto zemūdens straume. Pētījumā piedāvātā inženiertehniskā aprēķina metode ļauj analizēt dažādu objektu kustības un šķidrumu mijiedarbību. Metode ļauj modelēt objekta sarežģīto kustību šķidrumā.
9. Reālā fluīda plūsmā (gaisa vai ūdens) ātrums nav konstants, bet mainās laika apgabalā. Šī īpašība rada stabilu vibrācijas kustību dubultā svārsta sistēmā. Praktiskie eksperimenta rezultāti vēja tunelī parāda, ka modelim ir daudz iespēju turpmākiem pētījumiem: enerģijas ieguves prototipa izveide; jaudas mērījumi matemātiskā modeļa validācijai; ģenerators vadības optimizācija pie mainīgiem plūsmas ātrumiem.
10. Pēc 3D plūsmas stimulācijām var secināt, ka plūsmas pretestības koeficienta noteikšanā var izmantot divu veidu metodes. Pirmajā, fokusējoties tikai uz lokālu apskatītā objekta tilpuma laukumu. Otrajā gadījumā, apskatot visu objektu tilpumā ar automātiski precizētu – adaptīvo tīklojuma elementa izmēru. Rezultātu atšķirība ir mazāka par 5 %, līdz ar to pretestības koeficienta noteikšanai lietderīgi izmantot pirmo metodi, vairākkārtīgi samazinot aprēķina laiku un datu saglabāšanas resursus un samazinot iespēju kļūdaini interpretēt plūsmas turbulences ietekmes, ja tās netiek skatītas atsevišķi.