RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte
Mehānikas un mašīnbūves institūts

Shravan Koundinya Vutukuru
Studiju programmas "Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve" doktorants

VIENKĀRŠAS FORMAS OBJEKTU MIJIEDARBĪBAS AR ŠĶIDRUMU ANALĪZE UN VADĪBAS OPTIMIZĀCIJA

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

profesors *Dr. sc. ing.*
IGORS TIPĀNS,

profesors *Dr. habil. sc. ing.*
JĀNIS VĪBA

RTU Izdevniecība
Rīga 2021

Vutukuru, S. K. Vienkāršas formas objektu mijiedarbības ar šķidrumu analīze un vadības optimizācija. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU izdevniecība, 2021. 41 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-04" 2021. gada 13. maija lēmumu, protokols Nr. 45

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

https://doi.org/10.7250/9789934226649
ISBN 978-9934-22-664-9 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2021. gada 17. septembrī plkst. 14.30 Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, 521. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Emeritētais profesors *Dr. sc. ing. Aļģimantas Bubulis*,
Kauņas Tehniskā universitāte, Lietuva.

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

Docente *Dr. sc. ing.* Marina Čerpinska,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

APLIECINĀJUMS

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.

Shravan Koundinya Vutukuru …… (paraksts)

Datums: ……..

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā. Tajā ir ievads, sešas nodaļas, secinājumi, 136 attēli; kopējais lappušu skaits ir 112, ieskaitot vienu pielikumu. Literatūras sarakstā ir 70 nosaukumi.

SATURS

VISPĀRĒJS PROMOCIJAS DARBA APSKATS 6
Aktualitāte 6
Darba mērķis un galvenie uzdevumi 6
Pētījuma mērķis 7
Pētījuma hipotēze 8
Pētījuma novitāte 8
Pētījuma praktiskais lietojums 9
Promocijas darba aprobācija un publikācijas 9
Autora ieguldījums publikācijās 10
Darba struktūra un galvenie rezultāti 11
Aizstāvamās tēzes 11
IEVADS 13
1. SKAITLISKO METOŽU PIEMĒROŠANA ĶERMEŅA UN PLŪSMAS MIJIEDARBĪBAS ANALĪZEI 15
1.1. Turpmākā izpēte par šo tēmu 15
2. APTUVENA ANALĪTISKĀ METODE ŠĶIDRUMA UN CIETA ĶERMEŅA MIJIEDARBĪBAI 16
2.1. Aproksimācijas metode objektu mijiedarbībai ar nekustīgu šķidrumu 16
2.2. Šķidruma analīzes metode gaisa plūsmas mijiedarbībai ar stacionāru objektu 18
2.3. Analītiskā metode plūstoša šķidruma un kustīga objekta mijiedarbībai 19
3. VIENKĀRŠAS FORMAS OBJEKTU MIJIEDARBĪBAS ANALĪZE 20
3.1. Romba un trijstūra prizmas mijiedarbības ar šķidrumu analīze 20
3.2. Šķidruma-ķermeņa mijiedarbības analīze poligonālai prizmai un plakanai plātnei 21
3.3. Perforētas plātnes mijiedarbības analīze 22
3.4. Plūsmas un izliektas un ieliektas formas objektu mijiedarbība 23
3.4.1. Šķidrumā iegremdētas izliektas lauztas sānu formas prizmas modeļa analīze 23
3.4.2. Ieliektas lauztas sānu formas prizmas mijiedarbības analīze 23
3.4.3. *ANSYS* aprēķina rezultāti 3D prizmai 24
3.5. Robotzivs astes svārstības, izmantojot šķidruma un ķermeņa mijiedarbību (niršanas kustība) 25
3.6. Šaurleņķu trijstūra prizmas kustība vertikālā plaknē – lidojošs objekts 26

4. PARAMETRU UN VADĪBAS OPTIMIZĀCIJA ŠĶIDRUMA UN CIETA ĶERMEŅA MIJIEDARBĪBAS PROBLĒMAI ... 27
4.1. Parametru optimizācija, vienkāršāko lidojošo un nirstošo objektu kustība šķidrumā .. 27
4.1.1. Poligonālas prizmas parametru optimizācija ... 27
4.2. Enerģijas iegūšana no šķidruma plūsmas ... 27
4.2.1. Enerģijas reģenerācija, izmantojot perforētu plātni šķidruma plūsmā ... 27
4.2.2. Enerģijas ieguve no rombveida vai plakanas plātnes ... 28
4.2.3. Enerģijas iegūšana, lietojot robotzivs duālas virsmas izpildmehānismu ... 28
4.2.4. Enerģijas iegūšana, izmantojot vienu robotzivs aktuatoru ... 29
4.3. Mijiedarbības svārstību slāpēšana, veicot parametrisko optimizāciju ... 30
4.3.1. Sistēmas ar vienu brīvības pakāpi svārstību slāpēšana ar triecienu un mijiedarbību ... 30
4.3.2. Sistēma ar vienu brīvības pakāpi un vienu lineāru vai nelineāru atsperi bez svārstību slāpēšanas, kas pakļauta harmoniskai ierosmei ... 30
4.3.3. Sistēmas šķidrumā ar vienu brīvības pakāpi slāpēšana pie harmoniskas ierosmes, neperiodisks gadījums ... 31
4.4. Vadības optimizācija attiecībā uz šķidruma mijiedarbību ar cietu ķermeni ... 31
4.4.1. Vienkārša horizontāla kustības modeļa optimizācija ar spēka vadību ... 31
4.4.2. Vienkāršs vertikālās kustības modelis ar spēka vadību ... 31
4.4.3. Sarežģītāki modeļi ... 32
5. JAUNU ENERĢIJAS IEGUVES SISTĒMU SINTĒZES UN KUSTĪBAS MODELĒŠANA ... 33
5.1. Sistēma ar vienu brīvības pakāpi, kas apraksta mainīgas virsmas prizmu ... 33
5.2. Sistēma ar divām brīvības pakāpēm, izmantojot rotējošu perforētu plātni ... 34
5.3. Sistēma ar trīs brīvības pakāpēm ... 35
6. EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI ... 37
6.1. Perforēto plātņu eksperiments vēja tunelī ... 37
6.2. Jaunas planēšanas/svārstību ierīces izpēte ... 38
6.3. Teorijas apstiprināšana ar eksperimentiem ... 38
6.3.1. Plānu plātņu rimstošas rotācijas svārstības gaisā ... 38
6.3.2. Teorijas un eksperimenta salīdzinājums attiecībā uz C = 0,5 ... 38
6.3.3. Teorijas un eksperimenta salīdzinājums attiecībā uz C = 0,25 ... 39
6.4. Patenta pieteikums ... 39
GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI ... 41

VISPĀRĒJS PROMOCIJAS DARBA APSKATS

Aktualitāte

Cieta ķermeņa un šķidruma plūsmas mijiedarbība ir ļoti svarīga parādība, kas jāizpēta, ņemot vērā tās plašo raksturu un lielo pieprasījumu izprast dažādus lietojumus inženierzinātnē un medicīnā. Viens no labākajiem šīs šķidruma un cieta ķermeņa mijiedarbības fenomena izmantošanas veidiem ir iegūt enerģiju no apkārtējās vides (gaisa, ūdens), kad objekts ir iegremdēts šķidrumā. Kopumā ir trīs galvenās cieta ķermena mijiedarbības iespējas ar šķidrumu: a) kustīga cieta ķermeņa mijiedarbība ar mierā esošu šķidrumu; b) mierā esoša ķerneņa mijiedarbība ar šķidruma plūsmu; c) kustīga ķermeņa mijiedarbība ar šķidruma plūsmu. Termins "enerģijas ieguve" ir attiecināms uz darbību, kas saistīta ar zaļās enerģijas ražošanu.

Promocijas darbs aptver jomas, kas ir tieši saistītas ar šķidruma struktūras mijiedarbības koncepciju: a) aptuvenu analītisko metodi attiecībā uz šķidruma mijiedarbību ar cietu ķermeni; b) vienkāršas formas objektu un šķidruma mijiedarbības analīzi; c) šķidruma un cieta ķermeņa mijiedarbības parametru un vadības optimizāciju; d) jaunu ierīču sintēzi enerģijas iegūšanai; e) eksperimentālos pētījumus, kas attiecas uz vienkāršas formas objektiem, kas pakļauti šķidruma plūsmai. Darbs saistīts ar enerģijas iegūšanu, vadības un formas optimizāciju, kad objekts ir pakļauts šķidruma ieteikmei.

Darba mērķis un galvenie uzdevumi

Promocijas darba galvenais mērķis ir detalizēti izpētīt šķidruma struktūras mijiedarbības fenomenu un analizēt mijiedarbības koncepciju attiecībā uz svārstībā esošiem ķermeņiem, lai iegūtu enerģiju, veicot parametru un vadības optimizāciju. Tiek piedāvāts vienkāršs un tiešs matemātiskais modelis (saskaņā ar klasiskās mehānikas likumiem), kura pamatā ir šķidruma un cieta ķermeņa mijiedarbības fenomens vienkāršas formas objektiem. Mijiedarbība tiek detalizēti analizēta, izmantojot *ANSYS* programmatūru telpiskiem un plakaniem objektiem, kas atrodas plūsmā ar zemu un mērenu ātrumu. Telpa ap šo mijiedarbību tiek iedalīta zonās. Tiek risināts optimizācijas uzdevums attiecībā uz deformācijas parametriem un spēka zonas vadību. Visi aprēķini un eksperimenti veikti atbilstoši valdošajiem vēja apstākļiem Latvijā (10 m/s). Veiktie pētījumi apkopoti vairākos galvenajos virzienos kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa.

1. nodaļa. Pārskats par esošajām analītiskajām metodēm un mijiedarbības fenomeniem

1.1. Mijiedarbības principu piemērošana
1.2. Zinātniskā pētījuma sarežģītība
1.3. Atzinumi un secinājumi

2. nodaļa. Jauna pieeja un aptuvena analītiskā metode šķidruma un cieta ķermeņa mijiedarbībai

2.1. Aplūkota vienkāršota teorija cieta ķermeņa un šķidruma mijiedarbības fenomena pētīšanai

2.2. Mijiedarbības analīze veikta objektiem dažādos šķidruma plūsmas apstākļos stacionāras un nestacionāras kustības gadījumā
2.3. Piedāvāts mijiedarbības matemātiskais modelis, lai saprastu mijiedarbības fenomenu, kas varētu palīdzēt risināt inženiertehniskos uzdevumus, analizējot un optimizējot lidojošus un nirstošus objektus

3. nodaļa. Vienkāršas formas objektu mijiedarbības analīze

3.1. Vienkāršas formas objektu, piemēram, romba, kvadrāta, perforētas plāksnes un poligonālas prizmas mijiedarbības analīze šķidruma plūsmā (gaisā) veikta un pārbaudīta, izmantojot *ANSYS* programmatūru
3.2. Izpētot mijiedarbības fenomenu izliektu un ieliektu sānu prizmām, piedāvāts vienkāršs un tiešs matemātiskais modelis
3.3. Apspriesti *ANSYS* rezultāti, un apstiprināta jaunā teorija

4. nodaļa. Parametru un vadības optimizācija šķidruma un cieta ķermeņa mijiedarbības problēmai

4.1. Risināts ķermenī esošās enerģijas pārveidošanas uzdevums, izmantojot vienkāršu formas priekšmetu, piemēram, plakanu plātni, perforētu plātni kā paraugu robotzivs astes plandīšanai/svārstībām, kas tiek analizēta, izmantojot parametru optimizāciju
4.2. Analizēts nirstošs un lidojošs objekts, izmantojot vides optimizāciju
4.3. Analizēta un skaidrota vibrācijas slāpēšana esošas harmoniskas ierosmes gadījumā, kas radusies šķidruma un struktūras mijiedarbības rezultātā
4.4. Analizēta vadības optimizācija robotzivju kustībai horizontālā un vertikālā virzienā ar spēka vadību

5. nodaļa. Jaunu enerģijas ieguves sistēmu sintēze un kustības modelēšana

5.1. Efektīvas un inovatīvas enerģijas ieguves sistēmas ar vienu, divām un trīs brīvības pakāpēm tiek analizētas un tiek skaidroti un apspriesti mijiedarbības teorētiskās modelēšanas process un rezultāti

6. nodaļa. Eksperimenti

6.1. Eksperimenti vēja tunelī ar vienkāršas formas objektiem
6.2. Jauna plandoša ierīce (patenta pieteikums)

Pētījuma mērķis

Pētījuma galvenais mērķis ir izpētīt šķidruma mijiedarbību ar nekustīgu cietu ķermeni šķidruma plūsmā un, pamatojoties uz eksperimentu rezultātiem, attīstīt nekustīga cieta ķermeņa un šķidras vai gāzveida vides mijiedarbības modelēšanu.

Šo matemātisko modelēšanu, izmantojot **aptuvenus** kustības diferenciālvienādojumus, var lietot skaitliskiem risinājumiem, izmantojot integrēšanu, kas ļauj nerisināt sarežģīto telpas un laika uzdevumu ar skaitlisko metožu lietošanu, lai atrisinātu vienkāršas inženierproblēmas. Darbā analizēts jaunais matemātiskais modelis, lai risinātu efektīvas enerģijas pārvades sistēmu optimizācijas un sintēzes uzdevumus.

Pētījuma hipotēze

Darba galvenā hipotēze balstās uz Ņūtona mehānikas pamathipotēzi:

1) superpozīcijas principa vienādojums diferenciālā formā daļiņu sistēmai šķidrā vidē;
2) cietu ķermeņu un šķidruma daļiņu ietekme vēja pusē (spiediena zonā);
3) šķidruma daļiņu radītais spiediens uz aizmuguri (sūkšanas zonā);
4) šķidruma viskozitāte netika ņemta vērā;
5) tiek pieņemts, ka šķidrums ir nesaspiežams, t. i., blīvums ir konstants;
6) spiediena zonā šķidruma plūsmas V_0 absolūtā ātruma vektors visos objekta saskares punktos ir vienāds.

Hipotēze ir analizēta, izmantojot datorsimulācijas un eksperimentu datus. Eksperimenti tika veikti vēja tunelī, tika analizēta arī svārsta kustība. Rezultātā izstrādāta jauna un precīzāka šādas mijiedarbības teorija. Piedāvātā teorija no esošajām teorijām atšķiras ar to, ka, to lietojot, ne vienmēr ir nepieciešams veikt dinamisku analīzi par cieta ķermeņa un šķidruma mijiedarbību. Nekustīga ķermeņa un šķidruma plūsmas mijiedarbību var labi izprast, izmantojot stacionāru nekustīgu ķermeņa un šķidruma plūsmas mijiedarbības parādību, kas nozīmē, ka nav nepieciešams lietot sarežģītas telpas un laika aprēķina metodes.

Pētījuma novitāte

1. Komerciāli pieejamā programmatūra skaitļošanas šķidruma dinamikas izpētei ar "kosmosa-laika" programmēšanas metodēm ietver pastāvīgu centrēšanu uz ģeometriju nestacionārā kustībā, kad to pakļauj šķidruma plūsmai, turklāt tās ir skaitļošanas ziņā ļoti dārgas un piedāvā aptuvenu risinājumu. Tāpēc ir svarīgi meklēt alternatīvu pieeju, kas palīdz veikt vienkāršus inženiertehniskus uzdevumus, kas saistīti ar nestacionāru cieta ķermeņa kustību nepārtrauktā vidē (šķidrumā vai gaisā), neizmantojot darbietilpīgas telpas un laika plānošanas metodes.
2. Piedāvātā metode (teorija) un darba metodika liecina par klasiskās mehānikas metožu izmantošanu, lai izprastu nestacionāro cieta ķermeņa un šķidruma mijiedarbību nepārtrauktā (gaisā vai šķidrumā), ignorējot šķidruma vides viskozitāti, un tādējādi ir iespējams iegūt izkliedētus spēkus, samazinot galvenos vektorus un galvenos momentus cietā objekta (sistēmas) masas centrā. Iegūtās atbilstošās ekvivalentās attiecības ļauj veidot atšķirīgus ķermeņa kustības vienādojumus, kas atbilstoši integrēti skaitļos. Integrējot ir iespējams veikt parametru optimizāciju ar datoru un sintezēt jaunas sistēmas efektīvai enerģijas izmantošanai šķidruma kustības laikā vai radīt jaunas "zaļās enerģijas" sistēmas šķidruma plūsmai ap cieta ķermeņa objektu, vai realizēt lidojošu vai nirstošu objektu šķidrā barotnē.

Pētījuma praktiskais lietojums

Praktiskās izmantošanas galvenie virzieni

1. Teoriju un metodiku 2D objektu mijiedarbībai ar šķidrumu dažādiem gadījumiem (stacionārs objekts, nekustīgs šķidrums un nestacionārs objekts plūstošā šķidrumā) var izmantot jaunu "tīras enerģijas" ierīču sintēzē un arī lidojošu un nirstošu robotu/mehānismu projektēšanā.
2. 2D un 3D datormodelēšanas rezultāti palīdz optimizēt formu.
3. Robotzivs astes izpildmehānisma vadību var izmantot enerģijas iegūšanai, piemēram, nodrošinot robota uzlādi.
4. Ir izstrādāts un iesniegts patenta pieteikums, kura pamatā ir šķidruma un cieta ķermeņa mijiedarbības princips ar lineāru ģeneratoru, patenta pieteikuma nosaukums – "Vēja enerģijas pārveidošanas ierīce".

Promocijas darba aprobācija un publikācijas

Zinātniskie raksti, kas indeksēti *Scopus* vai *Web of Science* datu bāzē

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

Pilna teksta konferences dokumenti, kas publicēti konferenču materiālos, kas indeksēti *Scopus* vai *Web of Science* datubāzē.

3. Vutukuru S. K., Tipans I., Viba J., Irbe M. 2020. Form optimization and interaction analysis of plane symmetry prism in air. *Engineering for Rural Development.* vol. 19, pp. 739–46.
4. Spade K., Vaicis I., Vutukuru S. K., Irbe M. 2020. Analysis of granule layer impact interaction on vibrating 2D prism. *Engineering for Rural Development.* vol. 19, pp. 1463–1469.
5. Vutukuru S., Viba J., Tipans I., Viksne I., Irbe M. 2019. Analysis of flat plate vibrations by varying frontal area to the flow. *Engineering for Rural Development.* vol. 18, pp. 1408–1414.
6. Tipans I., Viba J., Vutukuru S. K., Irbe M. 2019. Vibration analysis of perforated plate in non-stationary motion. *Vibroengineering Procedia.* vol. 25, pp. 48–53.
7. Tipans I., Viba J., Vutukuru S. K., Irbe M. 2021.Varying area vibrating structure in a fluid for energy gain. *Advances in Systems Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore.* pp. 757–770.
8. Tipans I., Viba J., Vutukuru S. K., Irbe M. 2021. Optimization of energy extraction using definite geometry prisms in air. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. Vol. 58 (2), pp. 19–31.
9. Tipans I., Viba J., Vutukuru S. K., Irbe M. 2021. Action of pendulum in transient fluid

flow. *Engineering for Rural Development.* vol. 20, pp. 275–280.
10. Beresnevich V., Vutukuru S.K., Irbe M., Kovals E., Eiduks M., Burbeckis K., Viba J. Wind energy conversion generator. *Engineering for Rural Development.* Vol. 20. pp. 955–960.

Patenta pieteikums

1. Vēja enerģijas pārveidošanas iekārta (Wind energy conversion device) submitted on 18.12.2020., RTU, LVP2020000092.

Autora ieguldījums publikācijās

Visas zinātniskās publikācijas rakstītas sadarbībā ar profesoru Jāni Vību un profesoru Igoru Tipānu, *Ph. D.* Mārtiņu Irbi kā līdzautoriem un konsultantiem publikāciju izstrādē. Pētniecības darbu procentuālā daļa, kas atspoguļo autora ieguldījumu zinātniskajās publikācijās, apkopota 1. tabulā.

1. tabula

Ieguldījums zinātnisko publikāciju izstrādē

Publikācijas Nr.	Darbība	Ieguldījums
1.	Eksperimentālo iekārtu projektēšana, literatūras analīze, eksperimentu izpilde, datu apstrāde, skaitliskā modelēšana	75 %
2.	Vienkārša formas objekta analīze, skaitliska modelēšana un grafiskais attēlojums, 2D un 3D plūsmas simulācijas	75 %
3.	Eksperimentu plānošana, prototipi, 2D un 3D plūsmas simulācija, vēja tuneļu eksperimenti, datu apstrāde un grafiskais attēlojums, matemātiskā modelēšana	75 %
4.	Granulāru daļiņu kustības modelēšana, izmantojot aptuvenu spiediena un sūkšanas zonu spēka noteikšanas metodi	5 %
5.	Cieta ķermeņa formas ģeometrijas optimizācijas analīze par šķidruma un ķermeņa mijiedarbību, eksperimentālais modelis, eksperimenti vēja tunelī, 2D un 3D simulācijas	75 %
6.	Nestacionāro šķidrumu un ķermeņa mijiedarbības analīze, optimizācija un sintēze, vēja tuneļu eksperimenti, skaitliskā modelēšana, 3D simulācijas, eksperimentālais modelis	100 %
7.	Parametru optimizācija, attiecīgās literatūras analīze, skaitliskā modelēšana, ķermeņa kustību analīze	40 %
8.	Ģeometrijas projektēšanas un pētniecības literatūras apskats	100 %
9.	Eksperimenti, simulācija un rezultātu analīze	50 %
10.	Literatūras apskats, rezultātu analīze un matemātiskā simulācija	50 %

Darba struktūra un galvenie rezultāti

Promocijas darba struktūra apkopota sešās nodaļās.

1. nodaļā veikts apskats par pētījumiem attiecīgajā jomā.

2. nodaļā, pamatojoties uz 8. zinātnisko publikāciju, aplūkotas trīs galvenās tēmas:

1) šķidruma struktūras mijiedarbības fenomens ar mazāk kustīgu šķidrumu;
2) nekustīga objekta mijiedarbība ar gaisu vai šķidrumu zemā ātrumā;
3) kustīgs objekts šķidruma plūsmā ar zemu ātrumu.

3. nodaļā apkopota 2., 3., 5. un 6. zinātniskā publikācija par šķidruma vai gaisa plūsmu, aplūkojot četras galvenās tāmas:

1) vienkāršas formas cieta ķermeņa mijiedarbības analīze, ķermenim atrodoties nestacionārā šķidruma plūsmā;
2) veselas un perforētās plātnes mijiedarbības fenomens un vibrācijas analīze, plātnei atrodoties nestacionārā šķidruma plūsmā;
3) formu optimizācija un simetrisku prizmu mijiedarbības ar gaisa plūsmu analīze;
4) enerģijas iegūšanas no gaisa plūsmas optimizācija īpašas ģeometriskas formas prizmām.

4. nodaļā apkopoti 2., 3. un 7. zinātniskajā publikācijā analizētie šķidruma dinamikas pētījumi par četrām galvenajām tēmām:

1) mainīga virsmas laukuma struktūras svārstības šķidruma plūsmā enerģijas ieguvei;
2) matemātisks modelis robotzivs vienas astes vai dubultastes horizontālās kustības modelim šķidrumā;
3) vibrācijas slāpēšana, kas rodas, ķermenim mijiedarbojoties ar zema ātruma šķidruma plūsmu;
4) vadības optimizācijas metodes (spēka un laukuma vadībai) ķermeņa horizontālai un vertikālai kustībai.

5. nodaļā apkopoti 3. un 7. zinātniskajā publikācijā aprakstītie pētījumi par šķidruma dinamiku šādām galvenajām tēmām:

1) jaunu iekārtu sintēze enerģijas ieguves vajadzībām;
2) optimizācijas uzdevums.

6. nodaļā apkopoti 3., 5. un 6. zinātniskajā publikācijā aprakstītie pētījumi par šķidruma dinamiku, iekļaujot šādas galvenās tēmas:

1) eksperimenti, kas saistīti ar plakano plātni;
2) ar perforētu plātni saistīti eksperimenti;
3) mijiedarbības teorijas matemātiskā modeļa validācija.

Aizstāvamās tēzes

1. Zinātniskajā literatūrā atrodamie standarta skaidrojumi par šķidruma un cieta ķermeņa mijiedarbību nav precīzi: ir pierādīts, ka zemākais spiediens ne vienmēr rodas vizuāli garākajā šķidruma plūsmas līnijā (atbilstoši lielākajam lokālajam ātrumam). Patiesībā novērojams sūkšanas fenomens, kas tad samazina spiedienu

un var realizēties uzreiz blakus ķermenim plūsmai pretējā pusē.

2. Tehniskajos aprēķinos attiecībā uz šķidruma-cieta ķermeņa mijiedarbības analīzi (tikai attiecībā uz gaisa vidi) viskozitāti var neņemt vērā. Tas ir pamatoti, jo visas datormodelēšanas programmas, ko lietojot, tiek ievērota viskozitāte, arī dod aptuvenu rezultātu. Turklāt, ņemot vērā mijiedarbības fenomenu, primāri svarīga ir objekta forma un plūsmas veids (laminārs vai turbulents). Šķidruma viskozitāte gaisā ir otršķirīga.
3. Gaisa un cieta ķermeņa mijiedarbības analīzē var piemērot superpozīcijas principu nestacionārā kustībā esošam ķermenim vai arī relatīvas kustības principu šķidruma plūsmā, t. i., mijiedarbības fenomenu var iedalīt divās zonās: spiediena zonā un sūkšanas zonā. Lai veiktu labāku analīzi, ir jāņem vērā klasiskās mehānikas likumi, ieskaitot Brauna haotisko kustību.
4. Aptuveno teoriju, kas iegūta, aprakstot mijiedarbību starp gaisu un cietu ķermeni, var piemērot inženieraprēķiniem ūdens un cietu ķermenu mijiedarbības aprakstam, ņemot vērā blīvumu un viskozitāti.
5. Darbā iegūtās šķidrumu un cieta ķermeņa mijiedarbības diferenciālās vienādības var lietot, lai atrisinātu analīzes, optimizācijas un sintēzes problēmas, neizmantojot sarežģītas un laikietilpīgas telpas un laika programmēšanas aptuvenās metodes.

IEVADS

Promocijas darbs kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa atspoguļo vairākus veikto praktisko pētījumu virzienus. Promocijas darba izstrādes posmi apkopoti 2. tabulā. Tika izmantots sistēmu sintēzes un optimizācijas uzdevumu algoritms atbilstoši J. Vības grāmatā[1] aprakstītajam.

2. tabula

Promocijas darba attīstības stadijas kā vienota zinātnisko publikāciju kopa

Posmi	Mijiedarbības fenomens	Šķidruma vai gaisa plūsma	Vadības un parametru optimizācija
Problēmas sākotnējā analīze	+	+	
1. Jaunas pieejas izpēte	+	+	
2. Mijiedarbības fenomena analīze	+	+	
3. Vienkāršas formas objekti un mijiedarbība	+	+	
4. Mijiedarbības problēma	+	+	+
5. Jaunu ierīču sintēze	+	+	+
6. Eksperimenti		+	

1. nodaļa. Esošo analītisko metožu un mijiedarbības fenomena apskats

1.1. Mijiedarbības principu piemērošana

1.2. Sarežģītu pētījumu veikšana

1.3. Atzinumi un secinājumi

2. nodaļa. Jauna pieeja un aptuvena analītiskā metode šķidruma un cieta ķermeņa mijiedarbībai

2.1. Vienkāršotas teorijas apraksts cieta ķermeņa mijiedarbībai ar šķidrumu, pamatojoties uz superpozīcijas principu

2.2. Mijiedarbības analīze veikta objektiem dažādos šķidruma plūsmas apstākļos (stāvošas, stacionāras un nestacionāras plūsmas)

2.3. Piedāvāts matemātiskās mijiedarbības modelis, lai aprakstītu mijiedarbības fenomenu. Modelis var palīdzēt atrisināt inženiertehniskos uzdevumus, analizējot un optimizējot lidojošus un nirstošus objektus

3. nodaļa. Vienkāršas formas objektu darbības analīze

3.1. Vienkāršas formas objektu – romba, kvadrāta, perforētas plāksnes un poligonālas prizmas – mijiedarbības ar šķidruma vai gaisa plūsmu analīze ar datorprogrammatūras *ANSYS* palīdzību

3.2. Izpētot mijiedarbības fenomenu izliektu un ieliektu sānu prizmām, piedāvāts vienkāršs matemātisks modelis

[1] J. Viba "Optimization and Synthesis of Impact Vibration Machines" (in Russian) , "Zinatne" Publishers. 1988, 253 p.

3.3. Apspriesti *ANSYS* modelēšanas rezultāti, un apstiprināta jaunā teorija

4. nodaļa. Parametru un vadības optimizācija šķidruma un cieta ķermeņa mijiedarbības problēmai

4.1. Ķermenī esošās enerģijas pārveidošanas uzdevuma izpēte, izmantojot vienkāršas formas priekšmetus – plāksni, perforētu plāksni kā paraugu robotzivs astes svārstību iniciēšanai. Analīze veikta, izmantojot parametru optimizāciju

4.2. Analizēti objektu niršanas un lidojuma režīmi, izmantojot mediālo optimizāciju

4.3. Analizēta un skaidrota svārstību slāpēšana apkārtējās vides īpašību rezultātā, kā arī harmoniska ierosme no šķidruma un ķermena mijiedarbības

4.4. Analizēta spēka vadības optimizācija robotzivs horizontālai un vertikālai kustībai

5. nodaļa. Jaunu enerģijas ieguves sistēmu sintēze un ķermeņa kustības modelēšana

5.1. Efektīvas un inovatīvas enerģijas ieguves sistēmas ar vienu, divām un trīs brīvības pakāpēm analīze, skaidrota un apspriesta teorētiskās mijiedarbības modeļu izveide

6. nodaļa. Eksperimenti

6.1. Eksperimenti ar plūsmā novietotiem vienkāršas formas objektiem vēja tunelī

6.2. Jauna plandoša ierīce (patenta pieteikums)

1. SKAITLISKO METOŽU PIEMĒROŠANA ĶERMEŅA UN PLŪSMAS MIJIEDARBĪBAS ANALĪZEI

Šķidruma un cieta ķermeņa mijiedarbības analīze galvenokārt tiek veikta, lai prognozētu un mazinātu šādas mijiedarbības parādības:

- plandīšanās;
- galopēšana;
- šļakstīšana;
- Vorteksa iniciētas svārstības.

Iepriekš minētajai mijiedarbības analīzei attiecībā uz šķidruma struktūru ir plašs pieprasījums aerokosmisko tehnoloģiju jomā (spārnu plandīšanās, plūsma pār turbīnu lāpstiņām), biomedicīnā (elastīgo artēriju modelēšanai stentu konstrukcijām), autorūpniecībā (siltumapmaiņas ierīču projektēšana) un jūras tehnoloģijās, radot drošas un funkcionālas konstrukcijas.

1.1. Turpmākā izpēte par šo tēmu

Šajā promocijas darba daļā īpaša uzmanību veltīta tikai cieta ķermeņa un šķidruma vai gaisa mijiedarbībai, neaplūkojot plūsmas atkalpievienošanās vai plūsmas atdalīšanās fenomenu, un tiek piedāvāta alternatīva pieeja mijiedarbības fenomena un tā priekšrocību pētīšanai. Galvenā metodoloģijas ideja šajā darbā ir radīt vienkāršotu metodi mijiedarbības fenomenam, izmantojot samērā vienkāršu matemātisku modeli un neņemot vērā šķidruma vai gaisa viskozitāti. Tā ir aptuvena teorija par nestacionāra ķermeņa un šķidruma mijiedarbību, kas ņem vērā stacionāra cieta ķermeņa un šķidruma mijiedarbības modeļa rezultātus, kas iegūti, izmantojot *ANSYS Fluent* programmatūru. Šajā gadījumā stacionārs *RANS* (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) vienādojums tiek atrisināts, izmantojot turbulences modeli. Darbā apspriestā koncepcija programmēšanas metodēm piedāvā alternatīvu pieeju telpas un laika, kā arī palīdz atrisināt tehnoloģiskos uzdevumus attiecībā uz vienkāršas formas objektu optimizāciju un sintēzi bez lielu skaitļošanas resursu izmantošanas.

Turpmākajās nodaļās sīkāk iztirzāta analītiskā pieeja, kas attiecas uz šo pētniecības darbu saistībā ar šķidruma un cieta ķermeņa mijiedarbības parādību.

2. APTUVENA ANALĪTISKĀ METODE ŠĶIDRUMA UN CIETA ĶERMEŅA MIJIEDARBĪBAI

Šajā nodaļā pētīti trīs dažādi šķidruma un cieta ķermeņa mijiedarbības gadījumi: a) kustīgs ķermenis (prizma), kas novietots nekustīgā gaisa plūsmā vai plūsmā ar mazu ātrumu; b) stacionāri ķermeņi (prizma) gaisa plūsmā; c) kustīgs ķermenis (prizma) gaisa plūsmā. Cieta ķermeņa (prizmas) un gaisa mijiedarbības fiziku aplūkota vienkāršoti, izmantojot superpozīcijas principu, t. i., ņemot vērā attiecībā pret plūsmu dažādi novietoto cieta ķermeņa (prizmu) un šķidruma mijiedarbības fenomenu, kas dažādos plūsmas ātrumos ir atšķirīgs.

2.1. Aproksimācijas metode objektu mijiedarbībai ar nekustīgu šķidrumu

Tiek pētīta telpa ap cieta ķermeņa un šķidruma mijiedarbības zonu, ņemot vērā ļoti mazu gaisa elementu spiediena zonā (8.[2] publikācija). Saskaņā ar kustības daudzuma izmaiņas teorēmu, lai analizētu gaisa plūsmas un plāksnes mijiedarbību diferenciālā formā saskaņā ar *Meriam* u. c.[3], tiek izmantots superpozīcijas princips, ņemot vērā projekciju uz normāles pirms un pēc sadursmes attiecībā uz šķidruma un ķermeņa mijiedarbību no Brauna kustības un prizmu (2.1., 2.2. att.):

$$\begin{gathered} m_{10}VB_1 - (-m_{10}VB_1) = -N_1 \mathrm{d}t, \\ m_{10} = VB_1 \mathrm{d}t \mathrm{d}L_1 B\rho, \\ p_{10} = \frac{|N_1|}{\mathrm{d}L_1\, B}, \end{gathered} \tag{1.}$$

kur m_{10} – Brauna kustībā esošo daļiņu masa; VB_1 – vidējais gaisa normālais ātrums spiediena zonā; N_1 – gaisa normālspēks uz mazu elementu; dt – bezgalīgi mazs laika intervāls; dL_1 – bezgalīgi maza elementa platums; B – prizmas augstums perpendikulāri kustības plaknei; ρ – gaisa blīvums; p_{10} – atmosfēras spiediens spiediena zonā. No prizmas un gaisa mijiedarbības spiediena pusē tiek iegūti vienādojumi:

$$\begin{gathered} m_1 v \cos(\beta_1) - 0 = \Delta N_1 \mathrm{d}t \\ m_1 = v \cos(\beta_1)\, \mathrm{d}t \mathrm{d}L_1 B\rho, \\ \Delta p_1 = \frac{|\Delta N_1|}{\mathrm{d}L_1\, B}, \end{gathered} \tag{2.}$$

kur m_1 – mijiedarbības robežslāņa masa; v – prizmas ātrums; β_1 – leņķis starp ātrumu v un normālspēku N_1; ΔN_1 – papildu normālspēks, kas darbojas uz prizmu; Δp_1 – spiediena pieaugums spiediena zonā.

[2] https://www.sciendo.com/article/10.2478/lpts-2021-0009

[3] Meriam J. L., Kraige L. G. un Bolton J. N. Engineering Mechanics: Dynamics. 8th edition, New York John Wiley & Sons, 2016, 736 p. ISBN: 9781119044819 1119044812.

No 1. un 2. vienādojumu sistēmas ir iespējams atrast sešus nezināmus. Diviem nezināmajiem ir jāveic šādi aprēķini:

$$p_{10} = 2VB_1{}^2\rho dt, \tag{3.}$$

$$\Delta p_1 = v^2\rho dt\,(\cos(\beta_1))^2, \tag{4.}$$

Attiecībā uz sūkšanas zonu ir izvirzītas divas hipotēzes. Šīs hipotēzes ir jātestē eksperimentāli vai ar skaitlisko datorprogrammu palīdzību.

Pirmā hipotēze: sūkšanas zonas spiediena samazināšanas Δp_{21} visā virsmā ir nemainīga un proporcionāla ātruma v kvadrātam:

$$\Delta p_{21} = -\rho C_1 v^2, \tag{5.}$$

$$p_{20} = 2VB_2{}^2\rho dt, \tag{6.}$$

kur C_1 – konstante; VB_2 – vidējais gaisa normālais ātrums sūkšanas zonā.

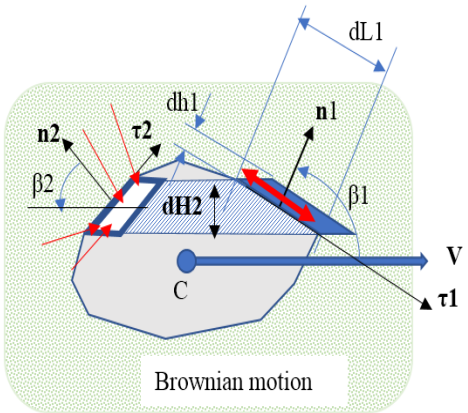
Otrā hipotēze: sūkšanas zonā spiediena samazināšanas Δp_{22} pa visu virsmu nav konstanta un ir proporcionāla ātruma v kvadrātam, kā arī atkarīga no normālspēka N_2 pret virsmu un leņķa β_2 , kā parādīts 7. un 8. vienādojumā:

$$\Delta p_{22} = -v^2\rho C_2 \cos(\beta_2), \tag{7.}$$

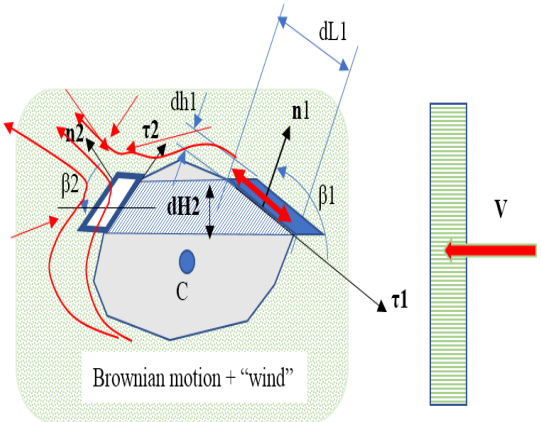
$$p_{20} = 2VB_2{}^2\rho dt, \tag{8.}$$

kur C_2 – otra konstante.

3.–8. diferenciālo sakarību var izmantot inženieranalīzē mazu ātrumu gadījumā. Praktiskos inženiertehniskajos aprēķinos zema ātruma gadījumā $VB_1 = VB_2$, t. i., diapazonā $v << VB_1$, $v << VB_2$. Tad $p_{01} = p_{02} = p_0$, kur p_0 ir vidējais atmosfēras spiediens ap prizmu. Ar mijiedarbības fenomenu tiek saprasta stacionārs ķermenis gaisā vai prizmas taisnvirziena kustība gaisā, ievērojot relatīvo kustību (3.–8. vienādojums).

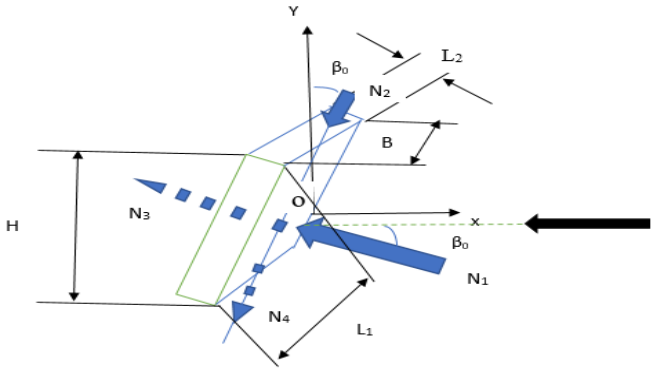


2.1. att. Ķermenis taisnvirziena kustībā attiecībā pret nekustīgu gaisu.



2.2. att. Modelis gaisa mijiedarbībai ar nekustīgu prizmu.

2.2. Šķidruma analīzes metode gaisa plūsmas mijiedarbībai ar stacionāru objektu



2.3. att. Modelis plakanas plāksnes gadījumā.

2.3. att.: L_1, B – plakano plātņu malu garums; L_2 – plātnes biezums; A_1, A_2 – malu laukums; N_1, N_2 – papildu spiediena centrālie spēki frontālajās pusēs; N_3, N_4 – vakuuma (aizmugures) puses centrālie spēki; V – plūsmas ātrums no labās uz kreiso pusi.

Mijiedarbības fenomens šķidruma un cieta ķermeņa mijiedarbības matemātiskajam modelim vienkāršas plakanas plātnes ģeometrijas gadījumā redzams 2.3. att. (5.[4] publikācija). Kustības daudzuma izmaiņas teorēmas diferenciālā forma plūsmas spiediena pusē tiek izteikta ar 9. un 10. vienādojumu:

$$\mathrm{d}m \cdot v \cos(\beta_{\mathrm{fp}}) = \mathrm{d}N\mathrm{d}t, \tag{9.}$$

$$\mathrm{d}m = v \cos(\beta_{\mathrm{fp}})\, \mathrm{d}L\mathrm{d}tB\rho, \tag{10.}$$

kur dm – plūsmas tilpuma elementa masa; v – ātrums; β_{fp} – leņķis starp plūsmu un virsmu normālā trieciena punktā; dN – trieciena spēks elementa normālas virsmas virzienā; t – laiks; dL – virsmas elementārais garums; B – objekta platums, ρ – šķidruma vai gaisa blīvums.

Integrējot 9. un 10. vienādojumu, iegūst papildu spiedienu un spēkus N_1, N_2 perpendikulāri abām pusēm:

$$N_1 = A_1 v^2 \rho \left[\cos(\beta_{\mathrm{fp}})\right]^2, \tag{11.}$$

$$N_2 = A_2 v^2 \rho \left[\sin(\beta_{\mathrm{fp}})\right]^2, \tag{12.}$$

kur A_1, A_2 – sānu laukums attiecīgi uz spiediena un sūkšanas pusēm.

Pie sūkšanas vakuuma pusē gar ķermeņa malu ir redzams, ka spiediens ir nemainīgs, kā parādīts 8. attēlā, un ir proporcionāls blīvumam ρ, kas reizināts ar plūsmas ātruma kvadrātu, kā norādīts 13. un 14. vienādojumā:

$$N_3 = A_1 v^2 \rho C, \tag{13.}$$

$$N_4 = A_2 v^2 \rho C, \tag{14.}$$

[4] http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2019/Papers/N147.pdf

kur C ir konstante, kas atkarīga no ienākošās plūsmas formas un zemskaņas ātruma, $0 < C < 1$.

No plāksnes O centra iziet divas mijiedarbības spēku komponentes – plūsmas virzienā un perpendikulāri plūsmai:

$$f_x = -HB\rho v^2 \left[C + \frac{\cos(\beta_{fp})^3 + d\sin(\beta_{fp})^3}{\cos(\beta_{fp}) + d\sin(\beta_{fp})} \right], \tag{15.}$$

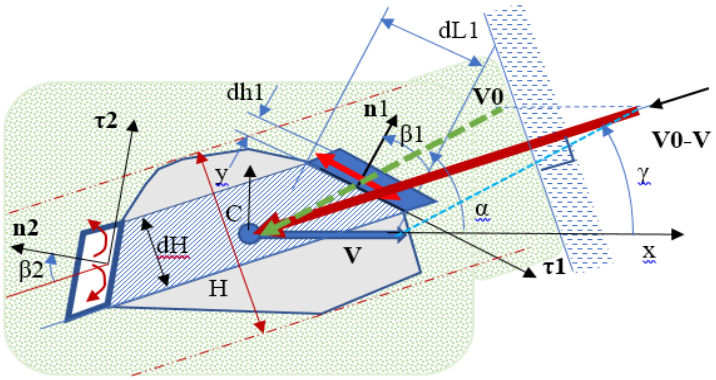
$$f_y = L_1 B\rho v^2 \left(C\left[\sin\left(\beta_{fp}\right) - d\cos\left(\beta_{fp}\right)\right]\right) + \sin\left(\beta_{fp}\right)\left[\cos\left(\beta_{fp}\right)\right]^2 + d\left[\cos\left(\beta_{fp}\right)\right]^3. \tag{16.}$$

Saskaņā ar 2.3. attēlā redzamo:

$$H = L_1\left[\cos\left(\beta_{fp}\right) + d\sin\left(\beta_{fp}\right)\right];\ d = \frac{L_2}{L_1}, \tag{17.}$$

kur d – malu attiecība L_2/L_1; f_x – spēka komponente x ass virzienā, ko šķidruma dinamikā sauc par pretestības spēku; f_y – spēka komponente y virzienā, ko šķidruma dinamikā sauc par par cēlējspēku; H – šķēluma augstums perpendikulāri plūsmai.

2.3. Analītiskā metode plūstoša šķidruma un kustīga objekta mijiedarbībai



2.4. att. Modelis kustīgai prizmai gaisa plūmā.

Kustīgas prizmas mijiedarbība ar kustīgu gaisa plūsmu redzama 2.4. attēlā. Projicējot uz asīm, tiek iegūts 18. un 19. vienādojums:

$$V_r = \sqrt{[-V_0\cos(\alpha) - V]^2 + [-V_0\sin(\alpha)]^2}. \tag{18.}$$

$$\cos(\gamma) = \frac{-V_0\cos(\alpha) - V}{\sqrt{[-V_0\cos(\alpha) - V]^2 + [-V_0\sin(\alpha)]^2}}. \tag{19.}$$

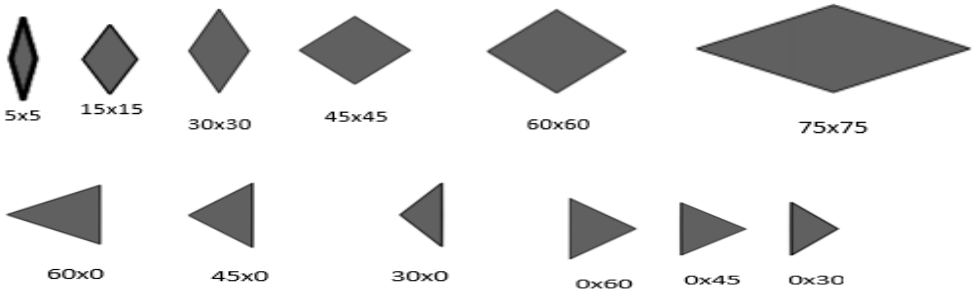
kur V_r – relatīvais ātrums; V_0 – vēja ātrums; V – prizmas taisnvirziena kustības ātrums kā vektors; α – V_0 plūsmas leņķis.

3. VIENKĀRŠAS FORMAS OBJEKTU MIJIEDARBĪBAS ANALĪZE

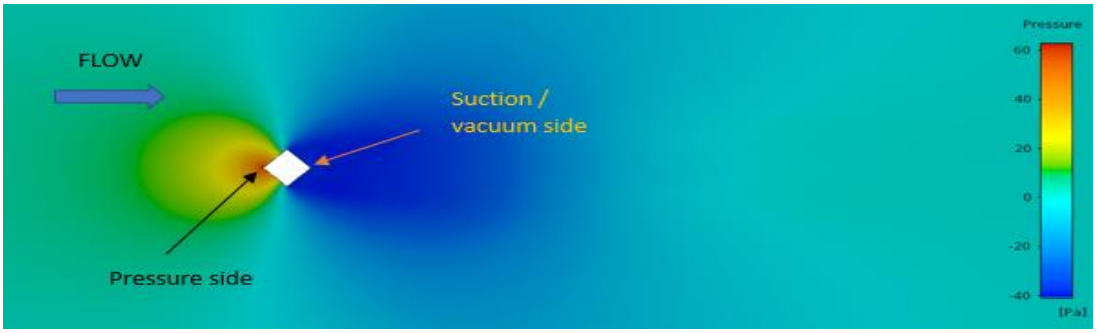
ANSYS Fluent programmatūra tika izmantota, lai veiktu skaitliskās simulācijas. Stacionārais *RANS* (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) vienādojums tiek atrisināts, izmantojot realizējamu turbulences modeli ar nemainīgu ātrumu 10 m/s, ņemot vērā dominējošo vēju un laika apstākļus Rīgā, Latvijā. Visu formu garums un dziļums ir 0,16 m.

No skaitlisko simulāciju rezultātiem var secināt, ka zona ap mijiedarbībā esošu šķidrumu un ķermeni ir iedalāma divās zonās. Augšējā zona ir spiediena zona, ķermenim lejpusē esošā zona ir sūkšanas vai vakuuma zona (3.2. att.). Mijiedarbības konstantes *C* vērtība ir jāaprēķina skaitliski, izmantojot 15. un 16. vienādojumu, vai arī jānosaka eksperimentāli. Tika konstatēts, ka zemos ātrumos mijiedarbības konstantes *C* vērtība ir pozitīva un mazāka par 1.

3.1. Romba un trijstūra prizmas mijiedarbības ar šķidrumu analīze



3.1. att. Dažādas prizmas formas.



3.2. att. Zonas koncepcija rombveida (45 × 45) prizmai, ja ir nemainīgs ātrums 10 m/s.

Mijiedarbības spēks (pretestības spēks) 2D analīzē ir mainīgs, tāpēc tiek pieņemts vidējais mijiedarbības spēks.

Līdzīgs matemātiskais modelis, kas iepriekš tika izstrādāts plakanajai plātnei, tiek piemērots attiecībā uz rombveida cietu ķermeni f_{xd}, plūsmas virzienā, kas izteikts ar 20. sakarību.

$$f_{xd} = -HBv^2\rho[C + \cos(\beta_d)^2]\,, \qquad (20.)$$

kur *B* – ķermeņa platums; *H* – šķēluma augstums perpendikulāri plūsmai; β_d – leņķis starp plūsmu un virsmu normālā trieciena punktā; ρ – šķidruma blīvums. *D* – teorētiskais

mijiedarbības spēks gar plūsmu (21. vienādojums), D_{ex} – aprēķinātais mijiedarbības spēks plūsmas virzienā (22. vienādojums); D_p – tuvinātais mijiedarbības spēks kā piektās pakāpes polinoma funkcija (23. vienādojums):

$$D = C + \cos(\beta_d)^2\,; \tag{21.}$$

$$D_{ex} = \frac{f_{xde}}{Av^2\rho}, \tag{22.}$$

$$D_p(\beta_d) = 1{,}5 + 3{,}7266\beta_d{}^3 - 1{,}5249\beta_d{}^4 - 0{,}101\,35\beta_d{}^5 - 2{,}8129\beta_d{}^2 + 0{,}2823\beta_d, \tag{23.}$$

kur f_{xde} – mijiedarbības spēks rombveida plātnei plūsmas virzienā. No 21. un 23. vienādojuma izriet, ka C = 0,5, ja β = 0. Tādēļ rombveida formas ķermeņa (24. vienādojums) mijiedarbības koeficientam iesaka šādu tuvināto formulu:

$$D = 0{,}5 + [\cos(\beta_d)]^2 \tag{24.}$$

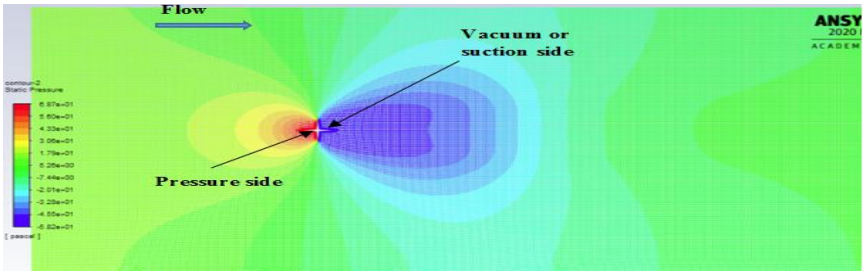
Tiek analizēta aptuvenās formulas (24. vienādojums) precizitāte rombveida formas objektam pie C = 0,5, un starpība ir mazāka par 5 % (vidējā procentuālā vērtība).

3.2. Šķidruma-ķermeņa mijiedarbības analīze poligonālai prizmai un plakanai plātnei

Mijiedarbības analīzē poligonālai prizmai stacionārā stāvokļa *RANS* vienādojums atrisināts, ja ātrums ir 10 m/s, kā redzams 3.3. attēlā, spiediena sadalījums stacionāram un nestacionāram gadījumam redzams 8. attēlā. Sūkšanas vai vakuuma zonā spiediens ir gandrīz nemainīgs visā garumā, un tas mainās tikai atkarībā no ātruma (2.[5] publikācija), plūsmas veida (vienmērīga vai nevienmērīga plūsma) un ir atkarīgs no malām, kā redzams 3.4. attēlā. Plakanās plātnes gadījumā tiek veiktas divdimensiju skaitliskās simulācijas plakanai plātnei, lai noteiktu koeficientu C, ar mainīgu β_{2d} analizē tikai vidējās mijiedarbības vērtības, un daļu no mijiedarbības D_1 (β_{2d}) nosaka, izmantojot 25. vienādojumu:

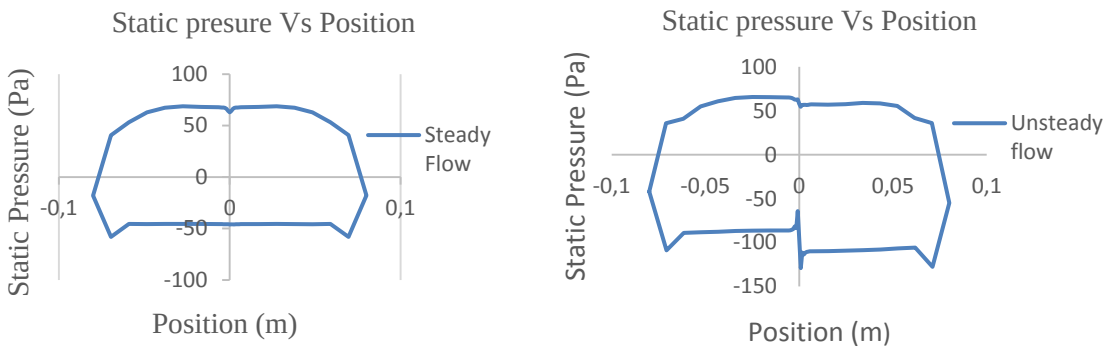
$$\begin{aligned} D_1(\beta_{2d}) = {} & -0{,}101\,353\,259\,849\,2(\beta_{2d})^5 - 1{,}524\,924\,115\,636\,690\,045\,8(\beta_{2d})^4 \\ & + 3{,}726\,620\,425\,6(\beta_{2d})^3 - 2{,}812\,935\,237\,499\,053\,63(\beta_{2d})^2 \\ & + 0{,}282\,306\,1\beta_{2d} + 1{,}5. \end{aligned} \tag{25.}$$

Tiek konstatēts, ka procentuālās kļūdas vidējā vērtība ir mazāka par 5 %.



3.3. att. Statiskā spiediena kontūrs virs stacionārās poligonālas prizmas ar nemainīgu ātrumu 10 m/s.

[5] https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/4796.



a) b)

3.4. att. Statiskā spiediena grafiks stacionārajai poligonālai prizmai pie: a) vienmērīgas plūsmas, b) nevienmērīgas plūsmas ar konstantu ātrumu 10 m/s.

Attiecībā uz 3D kvadrātveida plakanu plātni izmanto 15. vienādojumu, reizinot ar koeficientu 0,5, kā parādīts 26. vienādojumā:

$$f_x = \frac{Av^2\rho}{2}\left[C + \frac{\cos(\beta_{3d})^3 + d\sin(\beta_{3d})^3}{\cos(\beta_{3d}) + d\sin(\beta_{3d})}\right] \tag{26.}$$

kur A – ķermeņa laukums, kas pakļauts šķidruma plūsmai (samitrināts laukums), aprēķinam mijiedarbības spēks tiek izteikts ar 27. izteiksmi kā β_{3d} funkcija:

$$\begin{aligned} D_3(\beta_{3d}) = & -8\cdot 10^{-12}{\beta_{3d}}^5 + 2\cdot 10^{-8}{\beta_{3d}}^4 + 2\cdot 10^{-7}{\beta_{3d}}^3 \\ & -0{,}0004{\beta_{3d}}^2 - 0{,}0013\beta_{3d} + 2{,}0463. \end{aligned} \tag{27.}$$

Līdzīgi arī attiecībā uz pretestības spēka eksperimentiem ar ātrumu 10 m/s, rezultāti tika tuvināti ar piektās pakāpes polinomu un izteikti ar 28. vienādojumu:

$$\begin{aligned} D_{e3}(\beta_{e3d}) = & 10^{-11}{\beta_{e3d}}^5 + 2\cdot 10^{-8}\beta_{e3d} + 10^{-7}\beta_{e3d} \\ & -0{,}004{\beta_{e3d}}^2 - 0{,}0016\,\beta_{e3d} + 2{,}1796. \end{aligned} \tag{28.}$$

No 26. vienādojuma, aprēķinot pretestības spēku, izmantojot definēto ģeometriju un konstanti C = 0,31, tiek iegūts $\beta_{e3d} = 0°$.Tika novērots, ka maksimālā kļūda pie $\beta = 0°$ ($\beta_{e3d} = 0°$ un $\beta_{3d} = 0°$) starp aprēķiniem un eksperimentiem bija ~6 %.

3.3. Perforētas plātnes mijiedarbības analīze

Perforāciju kopējā platība veidoja pusi no plakanās plātnes laukuma. Pretestības spēks perforētas plātnes gadījumā samazinājās, salīdzinot ar vienkāršu plakanu plātni. Aiz ķermeņa nebija recirkulējošu plūsmu. Perforētās plates mijiedarbības spēks tiek izteikts ar 29. vienādojumu (6.[6] publikācija).

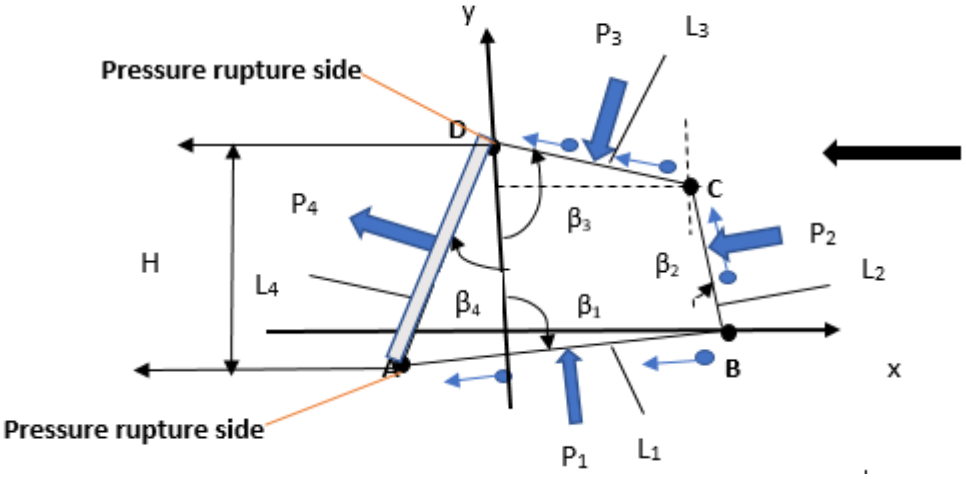
$$If_x = -kBHv^2\rho\left[C + \frac{\cos(\beta_p)^3 + d\sin(\beta_p)^3}{\cos(\beta_p) + d\sin(\beta_p)}\right]. \tag{29.}$$

[6] https://www.jvejournals.com/article/20801.

3.4. Plūsmas un izliektas un ieliektas formas objektu mijiedarbība

3.4.1. Šķidrumā iegremdētas izliektas lauztas sānu formas prizmas modeļa analīze

Četrstūra prizma ar izliektu lauztu sānu plakni redzama 3.5. attēlā. Spēku var aprēķināt, nosakot sānu spiedienu un izmantojot kustības daudzuma izmaiņas teorēmu, projicējot plūsmas virzienā (30. vienādojums) un perpendikulārajā virzienā (31. vienādojums) (3.[7] publikācija).



3.5. att. Izliektas prizmas modelis.
L_1, L_2 – malu garums; β_1, β_2 – frontāli leņķi; H – prizmas augstums; – plūsmas virziena simbols uz ķermeņa virsmas gaisa un ķermeņa mijiedarbībai.

$$\begin{aligned}-f_x = V^2 B\rho\{&L_1[\cos(\beta_1)^3] + L_2[\cos(\beta_2)^3] \\ &+ L_3[\cos(\beta_3)^3 - C_{12}C_{23}\cos(\beta_2)\cos(\beta_3)\sin(\beta_3-\beta_2)] \\ &+ L_4C_4\cos(\beta_4)\};\end{aligned} \tag{30.}$$

$$\begin{aligned}-f_y = V^2 B\rho\{&L_1[\cos(\beta_1)^2]\sin(\beta_1) + L_2[\cos(\beta_2)]^2\sin(\beta_2) \\ &+ L_3[\cos(\beta_3)^2\sin(\beta_3) \\ &- C_{12}C_{23}\cos(\beta_2)\sin(\beta_3)\sin(\beta_3-\beta_2)] + L_4C_4\sin(\beta_4)]\}.\end{aligned} \tag{31.}$$

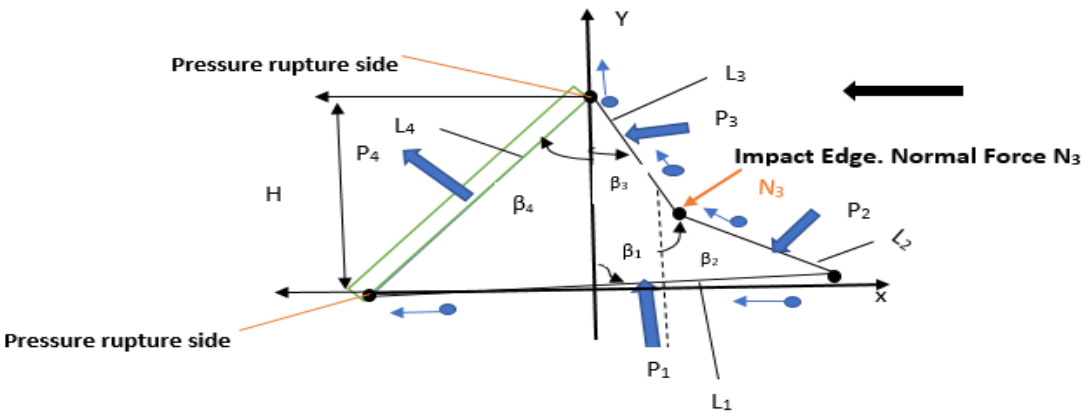
3.4.2. Ieliektas lauztas sānu formas prizmas mijiedarbības analīze

Ieliektā sānā iekšējā lauztajā sānu malā darbojas triecienspēks N_3, kā redzmas 3.6. attēlā (32. vienādojums).

$$N_3 = L_2 B\rho V^2\cos(\beta_2)\sin(\beta_2-\beta_3)\,[0.5 + 0.5\sin(\beta_2-\beta_3)]. \tag{32.}$$

Šajā gadījumā kritērijs ieliektai formai ir gadījumā, ja $\sin(\beta_2 - \beta_3) \geq 0$.

[7] http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2020/Papers/TF170.pdf.

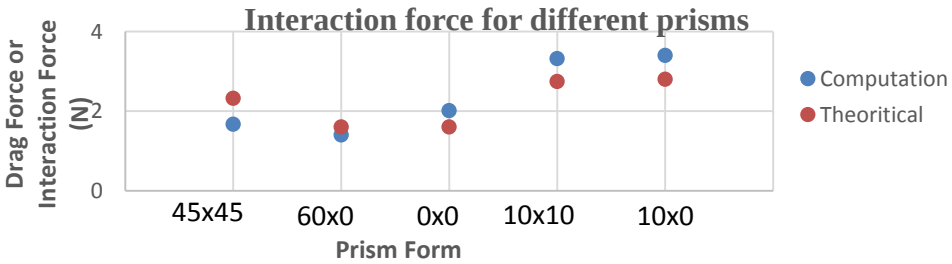


3.6. att. Ieliektu sānu poligonālas prizmas modelis.
L_1, L_2, L_3, L_4 – malu garums; β_1, β_2, β_3, β_4 – frontālie leņķi; H – prizmas augstums.

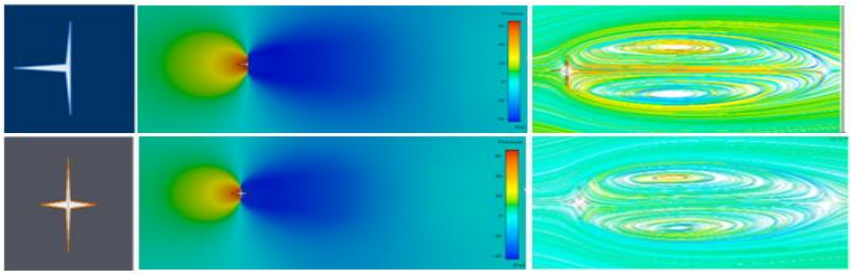
3.4.3. *ANSYS* aprēķina rezultāti 3D prizmai

Skaitliskā un teorētiskā mijiedarbības spēka (pretestības spēka) salīdzinājums attiecībā uz dažādām prizmām redzams 3.7. attēlā, *ANSYS* rezultāti – 3.8. attēlā.

45 × 45 60 × 0 0 × 0 10 × 10 10 × 0

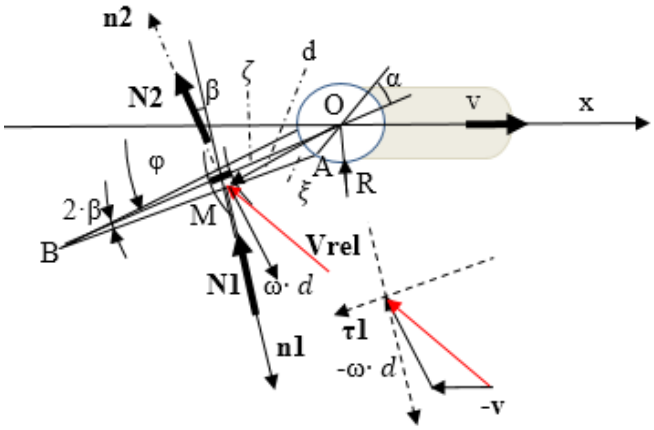


3.7. att. Mijiedarbības spēka salīdzinājums dažādām prizmām – skaitliskais un teorētiskais aprēķins.



3.8. att. Forma, spiediena kontūrs, dažādas poligonālās formas (10 × 10), (10 × 0).

3.5. Robotzivs astes svārstības, izmantojot šķidruma un ķermeņa mijiedarbību (niršanas kustība)



3.9. att. Astes-šķidruma mijiedarbība niršanas kustībā autonomam robotam.

Pieņemot vienkāršu mehatroniskas sistēmas ierosinātu lineāru kustību robotzivij ūdenī (3.9. att.), zivs korpuss un aste tiek raksturots kā mehāniska sistēma ar vienu brīvības pakāpi, ko nosaka koordināta *x*. Kustības diferenciālvienādojumu izsaka ar 33. vienādojumu (1.[8] publikācija):

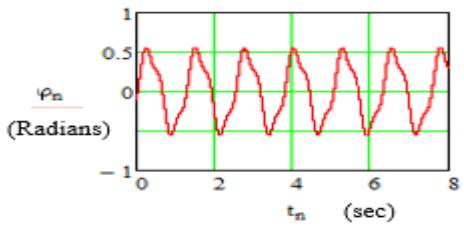
$$(m_0 + m)\ddot{x} = -N_1 x - N_2 x - b\dot{x}^2 \mathrm{sign}(\dot{x}), \tag{33.}$$

kur m_0 – korpusa masa, m ir astes masa; $\dot{x}$, $\ddot{x}$ – korpusa ātrums un paātrinājums; $N_1 x$ – šķidruma un ķermeņa mijiedarbības spēka komponente spiediena zonā; $N_2 x$ – mijiedarbības komponente sūkšanas zonā; $b\dot{x}^2$ – nelineāra korpusa mijiedarbība ar šķidrumu taisnvirziena kustībā atkarībā no kustības ātruma $\dot{x}, b$ – konstante. Spēku $N_1 x$ un $N_2 x$ var izteikt ar 34. un 35. sakarību:

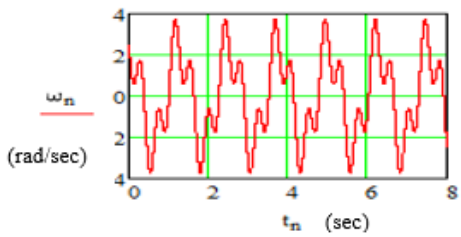
$$F_1 x = |N_1| \mathrm{sign}\left(v \sin(\varphi - \beta) + \omega \frac{R + R2}{2}\right) \sin(\varphi - \beta); \tag{34.}$$

$$F_2 x = |N_2| \mathrm{sign}\left(v \sin(\varphi) + \omega \frac{R + R2}{2}\right) \sin(\varphi) \tag{35.}$$

Visi skaitliskie rezultāti, kas iegūti ar *MATHCAD obatined*, redzami 3.10.–3.13. attēlā.

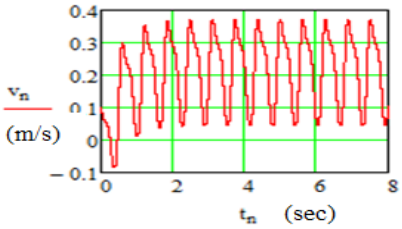


3.10. att. Astes pagriešanas leņķis atkarībā no laika.

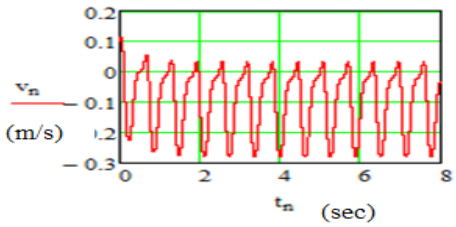


3.11. att. Leņķiskais ātrums atkarībā no laika astes spurai, $\lambda_3 = -0{,}1$.

[8] https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/6054

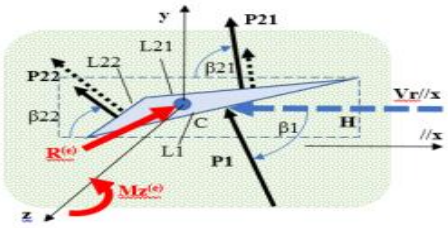


3.12. att. Robotzivs korpusa ātrums; $\lambda_3 = -0{,}1$.



3.13. att. Robotzivs korpusa ātrums pretējā virzienā $\lambda_3 = +0{,}1$.

3.6. Šaurleņķu trijstūra prizmas kustība vertikālā plaknē – lidojošs objekts



3.14. att. Trijstūra prizmas kustība vēja virzienā.

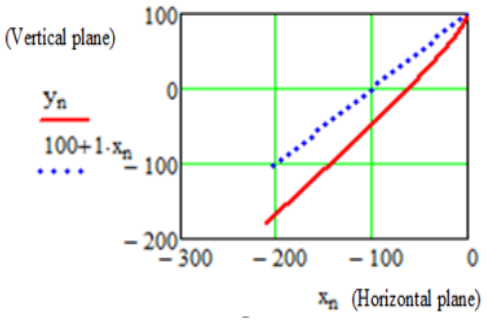
Prizmai pie vienādiem leņķiem $\beta_{22} = \beta_{21} = \beta_1$ (3.14. att.) tiek pētīts vertikālās kustības gadījums. Šaurleņķu trijstūra prizmas kustību vertikālajā plaknē apraksta ar 36. un 37. diferenciālvienādojumu. Iegūtie vienādojumi ļauj atrisināt analītiskās un parametru optimizācijas problēmas konkrētajam nestacionārajam kustības gadījumam.

$$m\ddot{x} = -[\rho LB(\dot{x}\sin(\alpha) - \dot{y}\cos(\alpha)^2\,(1 + C_1)\sin(\alpha)\mathrm{sign}(\dot{x}\sin(\alpha) - \dot{y}\cos(\alpha)\sin(\alpha)], \qquad (36.)$$

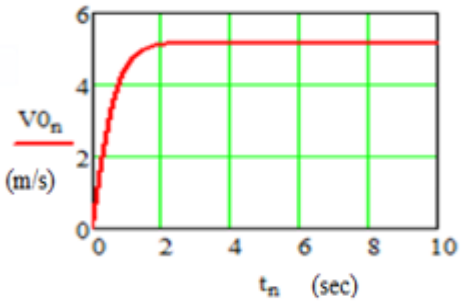
$$m\ddot{y} = [LB\rho(\dot{x}\sin(\alpha) - \dot{y}\cos(\alpha)^2\,(1 + C_1)\,\sin(\alpha)\,\mathrm{sign}(\dot{x}\sin(\alpha) - \dot{y}\cos(\alpha)^2] - mg, \qquad (37.)$$

kur $\ddot{x}$ un $\ddot{y}$ – paātrinājuma projekcijas uz attiecīgajām asīm; α – leņķis starp normāli un vertikālo virzienu; zīme ir ±1 atkarībā no funkcijas iekavās; g – brīvās krišanas paātrinājums.

Niršanas kustības aprēķina rezultāti redzami 3.15.–3.16. āttēlā. Visi mehāniskās sistēmas parametri ir SI mērvienību sistēmā: $\rho = 1{,}25$; $LB = 0{,}04$; $mg = 2$; $C_1 = 0{,}5$; $\alpha = \pi/4$.



3.15. att. Masas centra trajektorija vertikālajā plaknē atkarībā no koordinātām (x; y) = (0; +100).



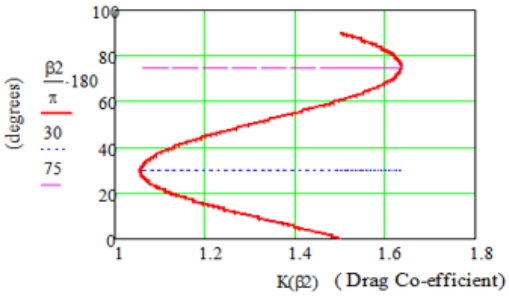
3.16. att. Ātruma projekcijas uz prizmas normāles atkarība no laika.

4. PARAMETRU UN VADĪBAS OPTIMIZĀCIJA ŠĶIDRUMA UN CIETA ĶERMEŅA MIJIEDARBĪBAS PROBLĒMAI

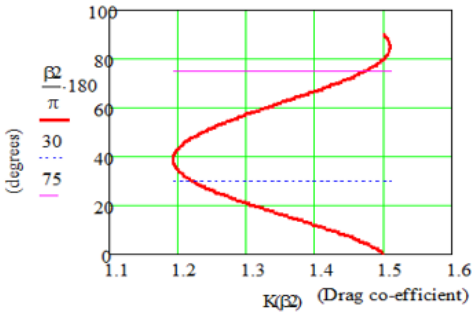
4.1. Parametru optimizācija, vienkāršāko lidojošo un nirstošo objektu kustība šķidrumā

4.1.1. Poligonālas prizmas parametru optimizācija

Parametru optimizācijas problēmā horizontālais spēks F_x kā optimizācijas kritērijs tiek analizēts gadījumā, kad poligonālas prizmas malas ir vienādas – $L_2 = L_3$, augstums H ir nemainīgs, un $\beta_1 = 0$, C_{12} un C_{23} vērtības ir dažādas (4.1., 4.2. att.). Piemērā parādīts, kā tiek iegūtas analītiskas sakarības, kas ļauj veikt šķidruma plūsmas mijiedarbības ar ķermeni parametrisko optimizāciju.



4.1. att. Poligonālas prizmas optimizācijas rezultāts pirmajam kritērijam: $K(\beta_2)$ – pretestības koeficients; $C_{12} = C_{23} = 1$.



4.2. att. Poligonālas prizmas optimizācijas rezultāts otrajam kritērijam: $K(\beta_2)$ – pretestības koeficients; $C_{12} = C_{23} = 0{,}5$.

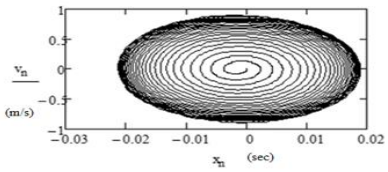
4.2. Enerģijas iegūšana no šķidruma plūsmas

4.2.1. Enerģijas reģenerācija, izmantojot perforētu plātni šķidruma plūsmā

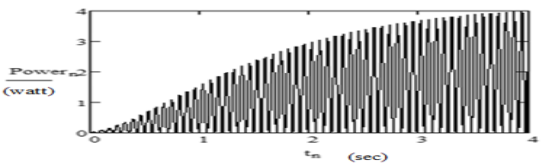
Enerģijas iegūšanas tehniku, izmantojot perforētu plakanu plātni, kas var pārslēgties no vienkāršas plāksnes uz perforētu plātni, izmantojot efektīvu mehatroniski sistēmu, var demonstrēt, izmantojot matemātisku modeli. Šeit izpētītās perforētās plāksnes vidējā leņķa vērtība ir robežās $-\frac{\pi}{4} \leq \beta \leq \frac{\pi}{4}$, iegūtā konstante C ir 0,065. Enerģijas ieguves koncepcijas matemātiskais modelis dots 38. vienādojumā, ņemot vērā plates relatīvo ātrumu, pieņemot, ka plāksnes biezums ir niecīgs ($d \cong 0$).

$$m\ddot{x} = -cx - b\dot{x} - A_0[1 - a\mathrm{sign}(\dot{x})]\rho\{C + [\cos(\beta_0)]^2]\}(V + \dot{x})^2 \frac{V + \dot{x}}{|V + \dot{x}|}, \qquad (38.)$$

kur $m, x, \dot{x}, \ddot{x}$ – masa, pārvietojums, ātrums un plātnes paātrinājums; A_0 – mijiedarbības zonas parametra vidējā vērtība; a – laukumu izmaiņas konstante; ρ – gaisa blīvums; C – vakuuma konstante; β_0 – plātnes leņķis; V – gaisa plūsmas absolūtais ātrums; $a\mathrm{sign}(\dot{x})$ – adaptīvā vadība. Modelēšanas rezultāti redzami 4.3. un 4.4. attēlā.



4.3. att. Kustība fāžu plaknē.



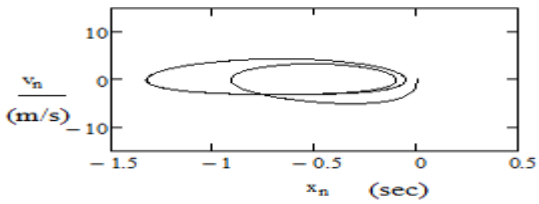
4.4. att. Ģeneratora jauda.

4.2.2. Enerģijas ieguve no rombveida vai plakanas plātnes

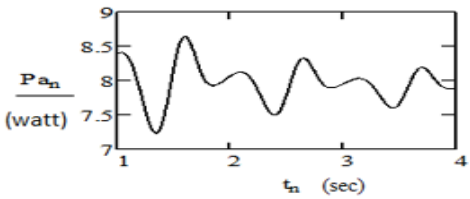
Plānās plāksnes ($d \sim 0$) modelis ietver lineāro atsperi ar stīvumu c un lineāro slāpēšanu ar proporcionalitātes koeficientu b. Saskaņā ar tuvināšanas teoriju, ņemot vērā relatīvo mijiedarbības ātrumu V_r, plates kustības diferenciālais vienādojums plūsmas virzienā būs šāds:

$$m\ddot{x} = -cx - b\dot{x} - A\rho[0{,}5 + \cos(\beta)^2](v_f + v_p)^2 \frac{(v_f + v_p)}{|(v_f + v_p)|} \qquad (39.)$$

kur A – plāksnes virsmas laukums; ρ – blīvums; β – plates leņķis pret plūsmu; v_f – šķidruma ātrums; v_p – plates ātrums pa plūsmas virzienu. Modelēšanas rezultāti, ja A = 0,004 m^2; V = 10 m/s; ρ = 1,25 kg/m^3 un $\beta = \frac{\pi}{2{,}5}\sin(7t)$, parādīti 4.5. un 4.6. attēlā.



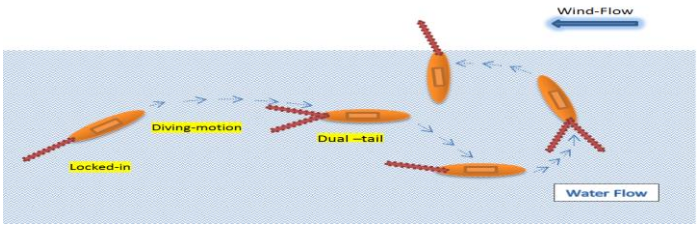
4.5. att. Kustība fāzes plaknē.



4.6. att. Ģeneratora vidējā jauda.

4.2.3. Enerģijas iegūšana, lietojot robotzivs duālas virsmas izpildmehānismu

Niršanas kustības laikā astes forma tiek variēta no vienas astes uz divām astēm, kas var griezties ap asi O, kā redzams 4.7. un 4.8. attēlā.



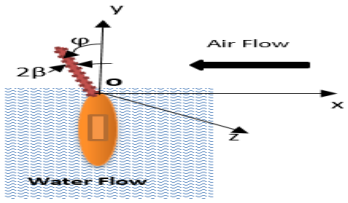
4.7. att. Divu astu un vienas astes aktuatora darbība niršanas laikā ūdenī un uzlāde no gaisa.

Mijiedarbību var aprakstīt:

$$J_z\ddot{\varphi} = Mwin_z - Mel_z(\varphi) - Mgen_z(\dot{\varphi}), \qquad (40.)$$

kur J_z – astes inerces moments ap rotācijas asi z; $\ddot{\varphi}$ – leņķiskais paātrinājums; $\varphi, \dot{\varphi}$ – pagrieziena leņķis un leņķiskais ātrums; $Mwin_z$ – gaisa plūsmas mijiedarbības moments;

$Mel_z(\varphi)$ – moments no lineāras vai nelineāras elastīgās atsperes; $Mgen_z(\dot{\varphi})$ – lineāra vai nelineāra enerģijas ģeneratora moments.

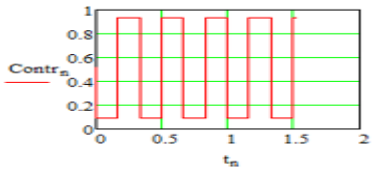


4.8. att. Uzlāde (izbāžot asti no ūdens).

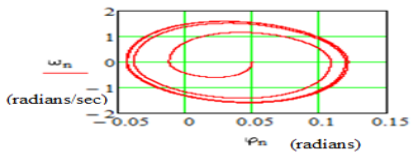
Matemātiskās modelēšanas rezultāti tiek uzrādīti nelielai plāksnei; ja uzskata, ka atspere ir lineāra, ģeneratora lineārais raksturojums pierakstāms ar 41. sakarību:

$$Mel_z = c\varphi;\ Mgen_z(\dot{x}) = b\dot{\varphi}, \tag{41.}$$

kur c, b – konstantes.



4.9. att. Virsmas vadības darbība.



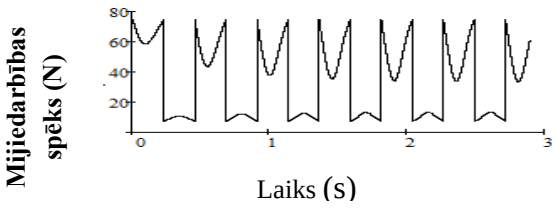
4.10. att. Kustība fāzes plaknē.

4.2.4. Enerģijas iegūšana, izmantojot vienu robotzivs aktuatoru

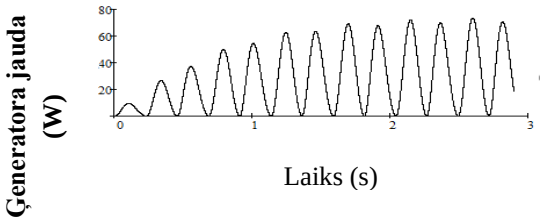
Vēja plūsmas mijiedarbība ar ķermeni ir aprakstīta ar 42. vienādojumu, rezultāti redzami 4.11.–4.12. attēlā (7.[9] publikācija).

$$Q = B \cdot L \cdot MCP \cdot \rho(1 + C)[V\sin(\alpha) - \omega r\cos(\alpha - \varphi)]^2 \cdot \mathrm{sign}[V\sin(\alpha) - \omega r\cos(\alpha - \varphi)], \tag{42.}$$

kur MCP – perforētās plātnes virsmas mehatroniskā vadība; ρ – blīvums; V – vēja ātrums; α – plātnes leņķis plūsmā attiecībā pret vēja virzienu; r – astes stieņu garums; φ – astes leņķis pret vertikāli; ω – leņķiskais ātrums; C – konstante sūkšanas zonā.



4.11. att. Vēja plūsmas mijiedarbība atkarībā no laika.



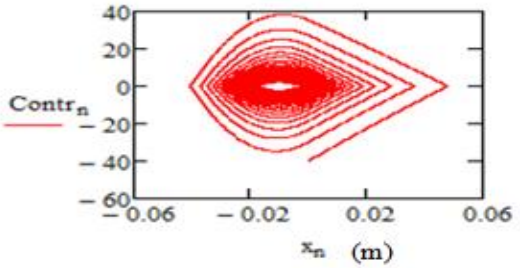
4.12. att. Momentānā ģeneratora jauda.

[9] https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-981-15-8025-3_72.

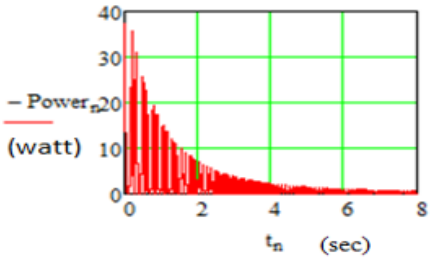
4.3. Mijiedarbības svārstību slāpēšana, veicot parametrisko optimizāciju

4.3.1. Sistēmas ar vienu brīvības pakāpi svārstību slāpēšana ar triecienu un mijiedarbību

Šajā nodaļā analizētas mijiedarbības un trieciens, kad ritenis sit pa paaugstinātu virsmu. Aplūkojamā ķermeņa virsma tiek analizēta šķidrumā, jo, lai ķermenis, atrodoties gaisā, ģenerētu tādu pašu jaudu, virsmas laukums ir jāpalielina vairākas reizes. Neņemot vērā vides viskozitāti, iegūst vienādojumus saskaņā ar klasiskās mehānikas likumiem, rezultāti – 4.13. un 4.14. attēlā.



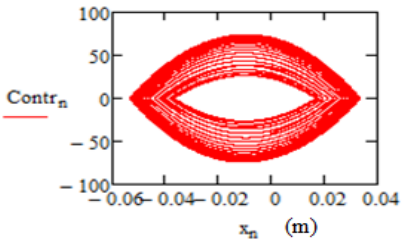
4.13. att. Kustības vadība.



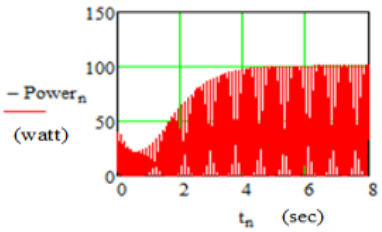
4.14. att. Jauda atkarībā no laika.

4.3.2. Sistēma ar vienu brīvības pakāpi un vienu lineāru vai nelineāru atsperi bez svārstību slāpēšanas, kas pakļauta harmoniskai ierosmei

(a) Aplūko rezonanses gadījumu sistēmai ar lineāru un nelineāru atsperi dažādos šķidrumos, kas pakļauti harmoniskai ierosmei. Lineāras atsperes gadījumā rezonanses frekvence $\omega = \sqrt{\frac{c}{m}}$ šķidrā vidē, rezultāti – 4.15. un 4.16. attēlā.

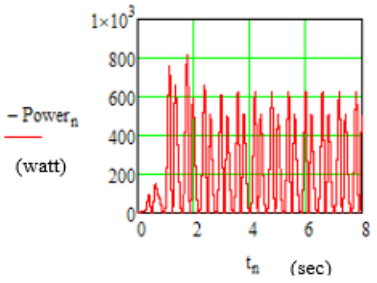


4.15. att. Vadības atkarība no laika.

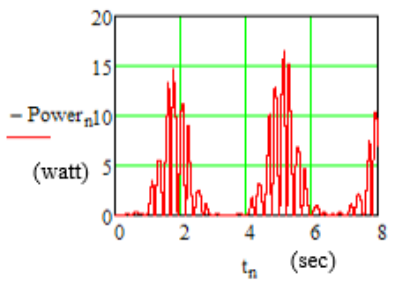


4.16. att. Jaudas atkarība no laika.

(b) Nelineāras kubiskās cx^3 atsperes gadījumā, kad rezonanses frekvence $\omega = \frac{1}{3}\sqrt{\frac{c}{m}}$, rezultāti gāzveida vidē – 4.17. un 4.18. attēlā.



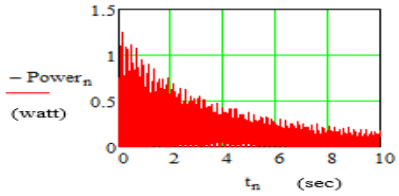
4.17. att. Jauda, ģenerēta škidrā vidē.



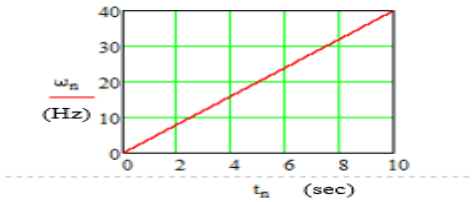
4.18. att. Jauda, ģenerēta gāzveida vidē.

4.3.3. Sistēmas šķidrumā ar vienu brīvības pakāpi slāpēšana pie harmoniskas ierosmes, neperiodisks gadījums

Tika analizēts pārejas process no nulles līdz ierosmes spēka frekvencei, rezultāti – 4.19. un 4.20. attēlā.



4.19. att. Jauda, ģenerēta ūdenī atkarībā no laika.



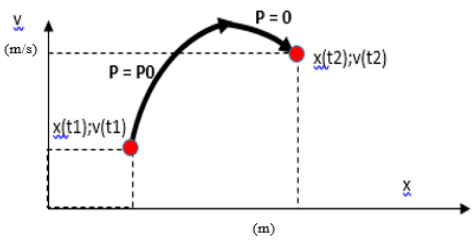
4.20. att. Lineāra frekvences atkarība no laika.

4.4. Vadības optimizācija attiecībā uz šķidruma mijiedarbību ar cietu ķermeni

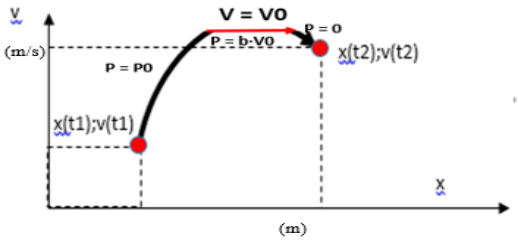
4.4.1. Vienkārša horizontāla kustības modeļa optimizācija ar spēka vadību

Saskaņā ar Pontrjagina maksimuma principu vienkāršai horizontālai kustībai ar spēka kontroli robotzivij optimālās vadības risinājums ir tāds, kur P_0 ir maksimālais spēks,

1) eksponente > 0, $P = P_0$;
2) ja eksponente < 0, $P = 0$.



4.21. att. Optimāla vadība fāžu plaknē.



4.22. att. Optimāla vadība fāžu plaknē ar ātruma ierobežojumu ($v < V_0$).

4.4.2. Vienkāršs vertikālās kustības modelis ar spēka vadību

Galvenā atšķirība ir tā, ka nepārtraukti kontrole tiek papildināta ar diviem spēkiem: smagumspēku un cēlējspēku. Šie spēki ir nemainīgi, tāpēc optimālā vadība ir līdzīga

horizontālajam gadījumam. Tomēr ir būtiski ievērot peldēšanas vai grimšanas nosacījumus. Ja robotam ir neitrāla peldspēja ($A = mg$), tad vadība precīzi atbilst horizontālajam vadības scenārijam.

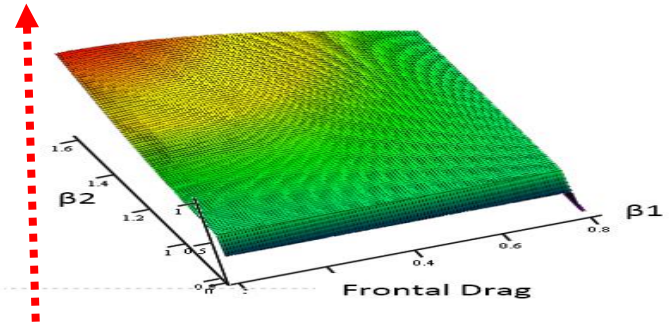
4.4.3. Sarežģītāki modeļi

Optimizācijas problēma tiek atrisināta trijos uzdevumos.

1. uzdevums. Polinomiāla forma

2. uzdevums. Divu pretēju izliektu plātņu modelis.

3. uzdevums. Divu ieliektu plātņu modelis.



4.23. att. Maksimāla un minimāla spēka F noteikšanas grafiks – **maksimālais** spēks F – pie $\beta_1 = 0$; $\beta_2 = \pi/2$ (90°); minimālais spēks – pie $\beta_1 = \beta_2 = \pi/4$.

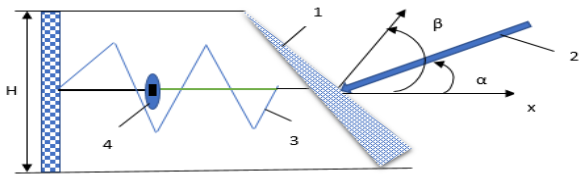
5. JAUNU ENERĢIJAS IEGUVES SISTĒMU SINTĒZES UN KUSTĪBAS MODELĒŠANA

5.1. Sistēma ar vienu brīvības pakāpi, kas apraksta mainīgas virsmas prizmu

Jauna sarežģīta elektromehāniskā sistēma tiek sintezēta, izmantojot šķidruma un cieta ķermeņa mijiedarbību. Enerģiju iegūst ar elektrodinamiskās bremžu sistēmas palīdzību, kā redzams 5.1. attēlā. Kustības diferenciālais vienādojums ir 43. vienādojums:

$$m\ddot{x} = -f(x) - D(\dot{x}) - A\rho[V_0\cos(\beta-\alpha) + \dot{x}\cdot\cos(\beta)^2] \cdot \mathrm{sign}[V_0\cos(\beta-\alpha) + \dot{x}\cos(\beta)^2] \quad (43.)$$

kur $f(x)$ – atsperu raksturojums; $D(\dot{x})$ – elektrodinamiskās bremžu sistēmas spēks; A – prizmas spiediena zonas virsma; $A = LB$.



5.1. att. Modelis enerģijas ieguvei, izmantojot gaisa un ķermeņa (prizmas) mijiedarbības fenomenu.
1 – šaurleņķa trijstūra prizma; 2 – vēja plūsma; 3 – elastīga atspere;
4 – elektrodinamiskā bremžu sistēma.

Ar 43. vienādojumu tiek risinātas visa veida analītiskās, optimizācijas un sintēzes problēmas, ja tiek formulēts kritērijs ar norādītajiem sistēmas un vadības parametru ierobežojumiem. Lineārajai elektrodinamiskajai bremžu sistēmai ar lineāru atsperi 43. vienādojums tiek izteikts kā 44. vienādojums:

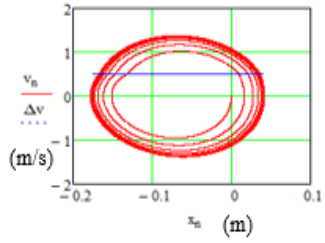
$$m\ddot{x} = -cx - b(\dot{x})\dot{x} - A(\dot{x},x,t)\rho(V_0\cos(\beta-\alpha) + \dot{x}\cos(\beta)^2) \cdot \mathrm{sign}(V_0\cos(\beta-\alpha) + \dot{x}\cos(\beta)^2), \quad (44.)$$

kur c – atsperes elastības koeficients; $b(\dot{x})$ – elektrodinamisko sistēmu vadības spēks; $A(\dot{x},x,t)$ – virsmas laukuma izmaiņas vadība atkarībā no ātruma, koordinātu un laika sintēzes uzdevuma.

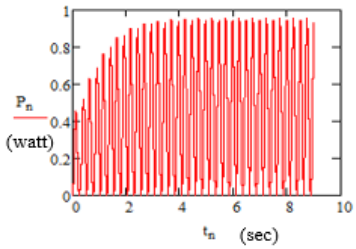
Promocijas darbā aplūkota iespēja iegūt enerģiju no plūsmas, ātri atverot vai aizverot perforēto plātni. Tika pieņemts, ka vēja plūsmas virziens ir paralēls prizmas kustības asij, t. i., $\alpha = 0$ ar optimālo leņķi $\beta = 0$ (5.1. att.). Tad kustības diferenciālvienādojums tiek izteikts 45. vienādojuma formā:

$$m\ddot{x} = -cx - b(\dot{x}) - (1+C_1)A[a_0 - a_1\mathrm{sign}(\dot{x}\Delta v)]\rho(V_0+\dot{x})^2 \cdot \mathrm{sign}(-V_0-\dot{x}), \quad (45.)$$

kur b, C_1, a_0, a_1, Δv – konstantes. Parametru vērtības: m = 0,5 kg; c = 80 kg/s^2; b = 0,5 kg/s; C_1 = 0,5; A = 0,04 m^2; a_0 = 0,75; a_1 = 0,25; Δv = 0,5 m/s; ρ = 1,25 kg/m^3; V_0 = 10 m/s. Modelēšanas rezultāti – 5.2. un 5.3. attēlā.



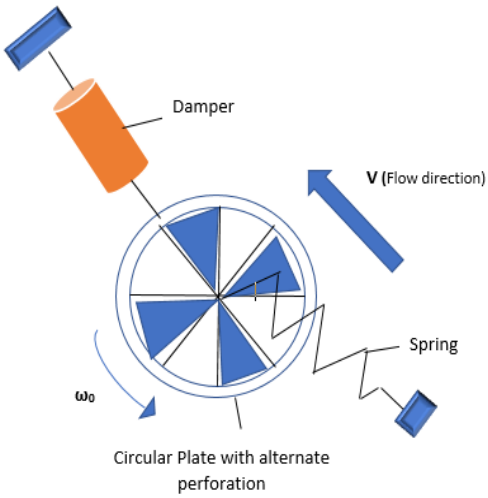
5.2. att. Kustība fāžu plaknē.



5.3. att. Ģenerētā jauda.

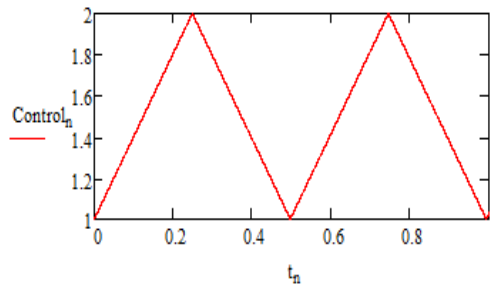
5.2. Sistēma ar divām brīvības pakāpēm, izmantojot rotējošu perforētu plātni

Tika sintezēta jauna elektromehāniska sistēma, izmantojot plakanu apaļu plātni ar mainīgiem perforētiem kvadrantiem šķidruma plūsmā (5.4. att.). Kustību analīze 2D telpā redzama 5.5.–5.7. attēlā. Aplūkojamā sistēma sastāv no divām koncentriskām apļveida plātnēm, kas nostiprinātas centrā. Plātnes priekšējā zona, kas ir pakļauta šķidruma plūsmai, brīvi rotē pār otru, statisku plāksni, abām plātnēm ir vienāds laukums un mainīgi perforēti kvadranti, sistēmā ir atspere, lineārais ģenerators ienākošajā plūsmā ar ātrumu $V_0 = 10$ m/s.



5.4. att. Plakana apaļa plāksne ar alternatīviem perforētiem kvadrantiem.

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



5.5. att. Virsmas laukuma izmaiņas vadība, t – laiks.

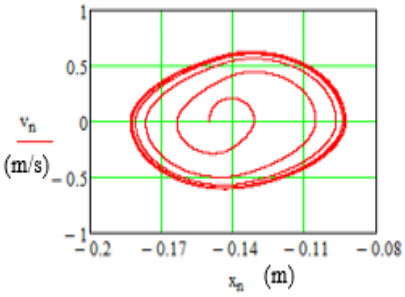
Apaļās plāksnes kustības diferenciālais vienādojums (5.5. att.) tiek izteikts ar 46. vienādojumu.

$$m\ddot{x} = -cx - \left[F_0 \operatorname{sign}(\dot{x}) - b\dot{x}\right] + \\ + (1+C)\frac{A}{\pi}\left\{\operatorname{acos}\left[\cos(\omega_0 t)\right] + \pi\right\}\rho(-V_0 - \dot{x})^2 \operatorname{sign}(-V_0 - \dot{x}), \tag{46.}$$

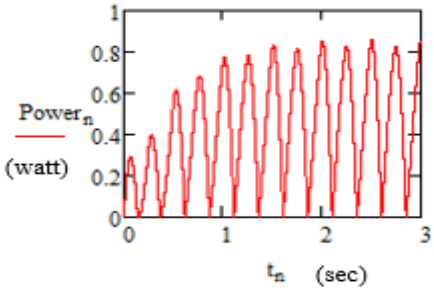
kur m – masa; x – pārvietojums; $\dot{x}$ – ātrums; c – lineārās atsperes stingums; F_0 – vadības spēks; b – lineārā ģeneratora slāpēšanas konstante; $(1 + C)$ – mijiedarbības koeficients; V_0 –

plūsmas ātrums; ω_0 – vadības harmoniskas ierosmes leņķiskā frekvence; A – konstants virsmas laukums; ρ – gaisa blīvums.

Parametru optimizācijas uzdevums tiek formulēts šādi: atrast kombināciju septiņu parametru (m, c, F_0, b, ω_0, A, V_0) telpā ar noteiktiem ierobežojumiem parametru vērtībām, kas nodrošina maksimālo plūsmas radīto jaudu. Labākā trīs parametru kombinācija (m, c, ω_0), kas ir tuvu rezonanses zonai: $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$. Šī gadījuma grafiki redzami 5.6. un 5.7. attēlā.



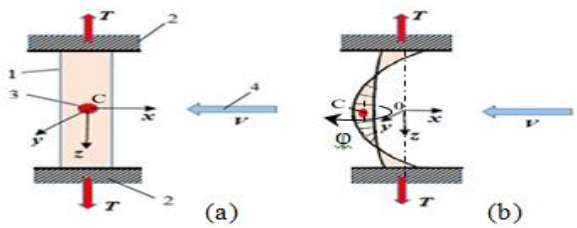
5.6. att. Kustība fāzes plaknē.



5.7. att. Maza plātnes jauda.

5.3. Sistēma ar trīs brīvības pakāpēm

Tiek sintezēta jauna ierīce – aksiāli stieptas plakanās lentes modelis ar iespēju plandīties. Modelis ir vienkāršots līdz trīs brīvības pakāpju sistēmai (5.8. att.).



5.8. att. (a) Plakanas lentes parauga sākotnējais stāvoklis,
(c) parauga deformēts stāvoklis.

Saskaņā ar aplūkoto modeli ar trim brīvības pakāpēm lokālā punkta relatīvā ātruma izteiksme projekciju formā ir:

$$V_{\xi,\mathrm{n}} = \left\{\begin{Bmatrix} -(V + \dot{x}\cos(\varphi) - \dot{y}\sin(\varphi) \\ (V + \dot{x}\sin(\varphi) - \dot{y}\cos(\varphi) - \xi\omega \end{Bmatrix}\right. \cdot \begin{Bmatrix} i \\ j \end{Bmatrix} \tag{47.}$$

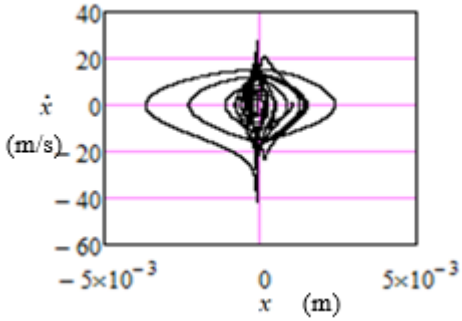
Izmantojot 53. izteiksmi, var atrast plūsmas mijiedarbības spēka normālkomponenti N_f un momenta M_f komonenti:

$$N_\mathrm{f} = (1 + C)B\rho\left\{\int_{-h}^{h}[V + \dot{x}\sin(\varphi) - \dot{y}\cos(\varphi) - \xi\omega]^2\right\}\xi d\xi; \tag{48.}$$

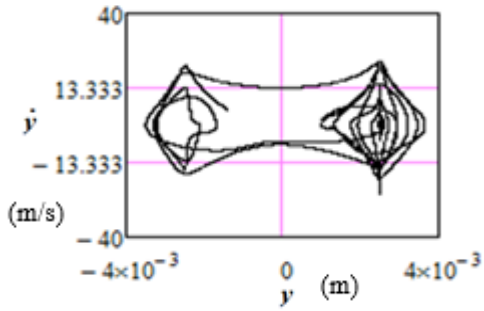
$$M_z\left(P_{f(x,y)}\right) = (1 + C)B\rho\left\{\int_{-h}^{h}[(V + \dot{x}\sin(\varphi) - \dot{y}\cos(\varphi) - \xi\omega]^2\right\}\xi\varepsilon d\xi; \tag{49.}$$

$$\varepsilon = \mathrm{sign}[V + \dot{x}\sin(\varphi) - \dot{y}\cos(\varphi) - \xi\omega], \tag{50}$$

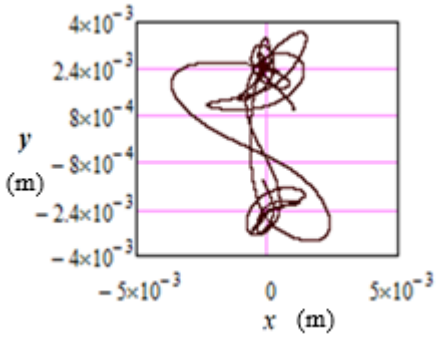
kur C – konstante, piemēram, 0,5; B – plāksnes platums; ρ – gaisa blīvums; h – puse no plāksnes augstuma. Skaitliskie rezultāti pēc *MATHCAD* programmatūras izmantošanas: 5.9.–5.12. att.



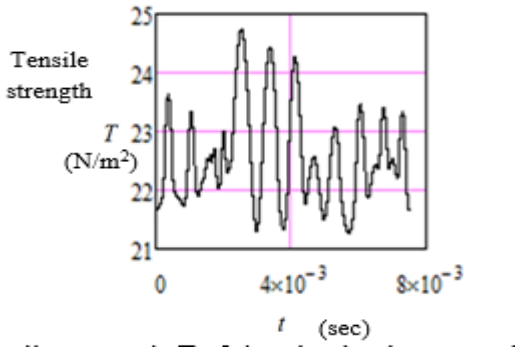
5.9. att. Masas centra kustība fāžu plaknē $(x; \dot{x})$.



5.10. att. Masas centra kustība fāžu plaknē $(y; \dot{y})$.



5.11. att. Masu kustības centrs vertikālā plaknē (x; y).



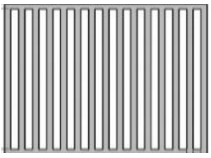
5.12. att. Elastīgo elementu kopējā stiepes izturība T atkarībā no laika.

6. EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

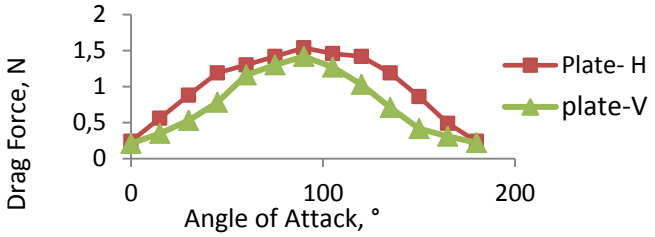
Eksperimenti tika veikti "*Armfield*" vēja tunelī Rīgas Tehniskajā universitātē. Sākotnēji eksperimenti ar kvadrātveida plakano plātni tika veikti nemainīgā plūsmas ātrumā 10 m/s. Tika pieņemts, ka plakanās plātnes malas garums ir 0,16 m, tika lietota līdzīga kvadrātveida plakana perforēta plātne, perforācijas laukums bija puse no kopējā plātnes laukuma (6.1. att.). Pretestības spēku mēra, izmantojot līdzsvara nosacījumus. 6.2. attēlā redzami eksperimenta ar perforētu plātni, kas novietota dažādos leņķos pret plūsmu mijiedarbības spēka un pretestības spēka mērīšanai, rezultāti.

6.1. Perforēto plātņu eksperiments vēja tunelī

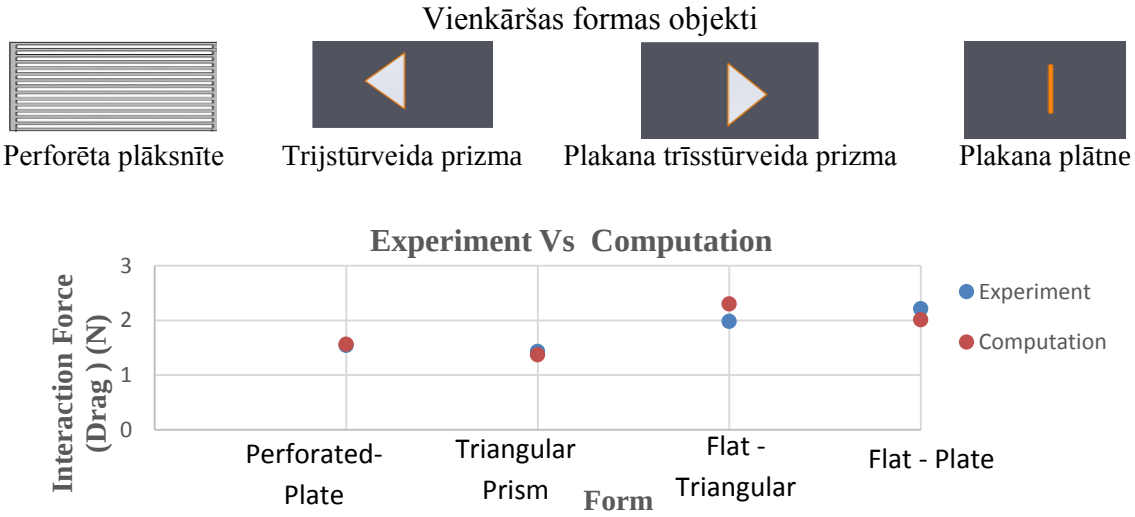
Tika veikti eksperimenti dažādā perforācijas horizontālā un vertikālā izvietojumā (6.2. att.).



6.1. att. Perforēta plāksne ar vertikālām perforācijām.



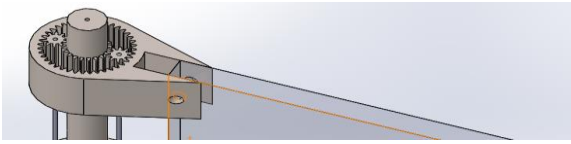
6.2. att. Eksperimenti ar perforētu plātni, caurumi novietoti horizontāli un vertikāli, vēja ātrums 10 m/s.



6.3. att. Eksperimenti un aprēķinu rezultāti mijiedarbības spēka noteikšanai dažādām formām pie konstantas plūsmas 10 m/s.

6.2. Jaunas planēšanas/svārstību ierīces izpēte

Pilnībā 3D izprintēta jauna planēšanas/svārstību ierīce (6.4.–6.5. att.) tika eksperimentāli pētīta pie dažādiem ātrumiem. No eksperimenta izriet fakts, ka ar plūsmas izraisītu vibrāciju, ievietojot cilindra cauruli uz leju, nevarēs iegūt enerģiju. Tas pats attiecas uz perforēto plāksni. Tāpēc sūkšanas laukumā ar plāksnīti radīti virpuļi ir neefektīvi un tos nevar izmantot enerģijas ieguvei.



6.4. att. Modeļa 3D dizains, iegūts ar *SolidWorks*.

6.5. att. Kustīgas ierīces prototips.

6.3. Teorijas apstiprināšana ar eksperimentiem

6.3.1. Plānu plātņu rimstošas rotācijas svārstības gaisā

Lai pārbaudītu teoriju, tika veikti eksperimenti brīvā dabā, pētot plānas plātnes rimstošas rotācijas svārstības ar mērķi apstiprināt mijiedarbības teoriju, nosakot koeficientu *C* un ņemot vērā spiediena un sūkšanas zonu jēdzienu. Tika pierādīts, ka teorētisko un experimenta rezultātu starpība bija tikai ap 1,8 %. Eksperimenta iekārta redzama 6.6. attēlā.

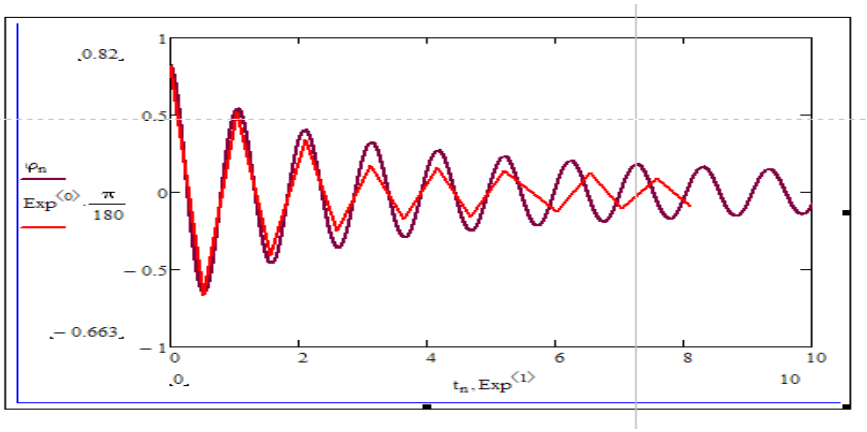
6.6. att. Svārsta kustības izpētes eksperimentālā iekārta.

6.3.2. Teorijas un eksperimenta salīdzinājums attiecībā uz *C* = 0,5

Fizikālā svārsta diferenciālvienādojumu izsaka ar 51. vienādojumu:

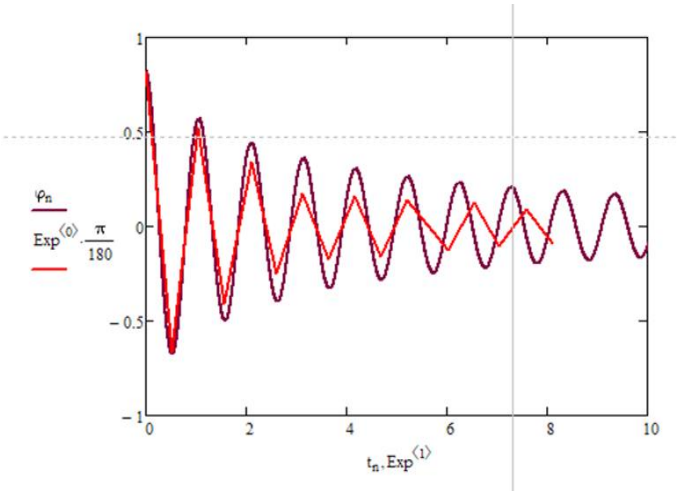
$$\ddot{\varphi} = -3\,g\left(\frac{1}{2}\right)\sin(\varphi) - (1+C)B\rho\left[\frac{3L^2}{4m}(\dot{\varphi})^2\right]\mathrm{sign}(\dot{\varphi}), \qquad (51.)$$

kur φ – leņķiskais pārvietojums; *L* – garums; *m* – masa; *C* – mijiedarbības koeficients; *B* – svārsta platums.



6.7. att. Leņķiskā pārvietojuma atkarība no laika, *C* = 0,5 (eksperimenta un skaitliskā aprēķina salīdzinājums).

6.3.3. Teorijas un eksperimenta salīdzinājums attiecībā uz *C* = 0,25

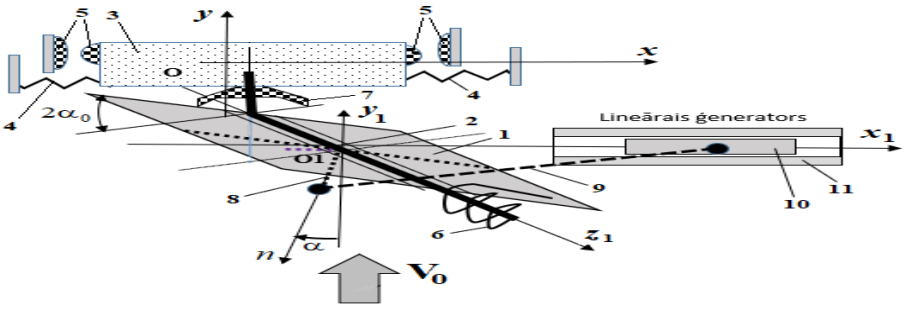


6.8. att. Leņķiskā pārvietojuma atkarība no laika *C* = 0,25 (eksperimenta un skaitliskā aprēķina salīdzinājums).

6.4. Patenta pieteikums

Rīgas Tehniskā universitāte ir iesniegusi jaunu patenta pieteikumu par tēmu "Vēja enerģijas konversijas ierīce", pieteikuma Nr. LVP2020000092 (9.[10] publikācija, 11.[11] patenta publikācija).

[10] http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2021/Papers/TF213.pdf.
[11] Patent application No. LVP2020000092. R.T.U., 18-12-2020.



6.9. att. Shematisks attēls enerģijas iegūšanai no gaisa plūsmas, izmantojot plandošu/oscilējošu plātni.

Vēja enerģijas konversijas ierīce sasatāv no plakana asmens (1), kas piestiprināts rotējošajai asij (2) ar cilindrisku šarnīru, asmens simetrijas ass z_1 ir cieši savienota ar slīdni (3), kas veic virzes kustību, ko ierobežo atsperes (4) un amortizatori (5). Asmeņu (1) pagriešanos ap (2) ierobežo rotācijas atspere (6) un rotācijas amortizators (7). Perpendikulāri sānu virsmai (1) ir cieši piestiprināts kloķis (8), ko ar šarnīrsavienojumu savieno ar stieni (9), savukārt tas ar šarnīru ir savienots ar lineārā ģeneratora slīdni (10), kas spēj pārvietoties pa elektriskās spoles (11) iekšpusi x_1 ass virzienā.

Izgudrojums attiecas uz vēja enerģiju, galvenokārt uz vēja turbīnām, kas pārvērš vēja plūsmas kinētisko enerģiju citos enerģijas veidos (piemēram, mašīnas izpildmehānisma kinētiskā enerģija vai gaisa kompresora iespējamā enerģija, vai speciālā ierīcē uzkrātā elektriskā enerģija). Izgudrojuma mērķis ir palielināt vēja enerģijas pārveides iekārtas ekspluatācijas drošību un vēja enerģijas iekārtas efektivitāti. Vēja enerģijas pārveidošanas ierīce sastāv no plakana asmens (1), kas pievienots rotējošai vārpstai (2) ar cilindrisku aksiālu savienojumu. Rotējošās ass (2) garenvirziena ass sakrīt ar plakanā asmens (1) simetrijas asi z_1 un ir cieši savienota ar slīdni (3), kas spēj pārvietoties x ass virzienā pa īpašām vadotnēm, 3. slīdni ierobežojot ar atsperēm (4) un amortizatoriem (5). Savukārt plakanā asmens (1) rotāciju ap rotējošo asi (2) ierobežo rotācijas atspere (6) un rotācijas aizbīdnis (7). Kloķis (8) ir stingri piestiprināts pie plakanās asmens sānu virsmas (1) un piestiprināts pie kloķa (9). Savukārt kloķis (9) ir piestiprināts pie lineārā ģeneratora slīdņa (10), kas spēj pārvietoties pa elektriskās spoles iekšpusi (11) x_1 ass virzienā.

GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

1. Promocijas darbā apkopotajā pētījumā kā apkārtējā vide ir ņemts vērā tikai gaiss, bet pētījuma rezultāti ar nelielām tehniskām variācijām ir izmantojami arī citu interesējošu fluīdu (šķidrumu) gadījumā, lai pētītu cieta ķermeņa un fluīda mijiedarbību, pieņemot, ka dotais fluīds ir nepārtraukts (*continuum*).
2. Aplūkoto optimizācijas uzdevumu var izmantot arī modelim ar sarežģītāku ģeometriju, bet tikai nelielu ātrumu gadījumā.
3. Veidojot jaunas mehāniskās sistēmas, jāņem vērā objektu parametri, kam ir svarīga nozīme mijiedarbības procesos.
4. Promocijas darbā apkopotajā pētījumā tiek izmantots lineārs amortizators, un paredzams, ka cita veida nelineārs amortizators palielinās attiecīgās sistēmas efektivitāti.
5. Mijiedarbības koeficienta *C* nozīme ir plaši izdiskutēta, un šis koeficients vislabāk tiek izmantots enerģijas iegūšanā no fluīda, sintēzes un optimizēšanas uzdevumos, kas saistīti ar šķidruma un cieta ķermeņa mijiedarbību. Lai gan pētījumā šķidruma viskozitāte netiek ņemta vērā, mijiedarbības koeficienta *C* kā alternatīvas izmantošana sniedz labus rezultātus.
6. Lai panāktu augstāku efektivitāti jaunu objektu sintēzē, nepieciešama mehāniskās sistēmas parametru optimizācija.
7. Nevienmērīgas šķidruma plūsmas gadījumā pastāvīgais spiediens robežslānī tieši aiz objekta tiek sadalīts simetrijas punktos. Tādējādi var novērot spiediena izmaiņas abās simetrijas pusēs pa labi un pa kreisi (lejup – pa kreisi).
8. Pētījuma rezultāti ir validēti gadījumā, ja ķermeņa un šķidruma mijiedarbību var pieņemt kā tādu, kad ķermenis ir nekustīgs pie nelieliem šķidruma ātrumiem.
9. Promocijas darbā izstrādātā teorija ir unikāla, tā palīdz risināt sarežģītus telpas un laika programmēšanas uzdevumus, un tai ir priekšrocības, analizējot kustību nestacionārā šķidruma plūsmā.
10. Ir svarīgi atzīmēt, ka, analizējot nekustīga ķermeņa mijiedarbības parādības gaisa vidē, vidējai gaisa viskozitātei ir sekundāra nozīme. Svarīgākie faktori ir objekta parametri, amortizatora veida izvēle, ķermeņa forma, kas pakļauta šķidruma plūsmai un plūsmas raksturs – tikai pie nelieliem šķidruma ātrumiem.