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

Sabīne Upnere
Doktora studiju programmas "Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve" doktorante

LIELJAUDAS ŪDENSDZESES SISTĒMU DINAMIKAS UN DROŠUMA IZPĒTE

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.*
JĀNIS AUZIŅŠ

RTU Izdevniecība
Rīga 2019

Upnere, S. Lieljaudas ūdensdzeses sistēmu dinamikas un drošuma izpēte. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2019. 31 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-04" 2019. gada 7. novembra lēmumu, protokols Nr. 10.

Promocijas darbs daļēji izstrādāts ar Latvijas Zinātnes padomes projekta "Eksperimentu plānošanas un metamodelēšanas metožu radīšana telpisku daudzķermeņu sistēmu mijiedarbojošos ar beramiem materiāliem un fluīdiem dinamikas optimizācijai" (lzp-2018/2-0281) un RTU Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātes piešķirto doktorantūras pētniecības granta finansiālu atbalstu.

ISBN 978-9934-22-393-8 (print)
978-9934-22-394-5 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2019. gada 20. decembrī plkst. …… Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, …… auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *PhD.* Staffan Lundström,
Lūleo Tehniskā universitāte, Zviedrija

Profesors *Dr. habil. sc. phys.* Juris Roberts Kalniņš,
Ventspils Augstskola, Latvija

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Jānis Vība,
Rīgas Tehniskā Universitāte, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Sabīne Upnere ……. (paraksts)
Datums: ……

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 65 attēli, deviņas tabulas, kopā 123 lappuses. Literatūras sarakstā ir 149 nosaukumi.

SATURA RĀDĪTĀJS

ANOTĀCIJA 5
PRIEKŠVĀRDS 6
DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS 7
Tēmas aktualitāte 7
Darba mērķis 7
Pētījuma uzdevumi 8
Pētījuma objekts un pētījuma priekšmets 8
Darba zinātniskā novitāte 8
Darba praktiskā vērtība 9
Pētījuma metodes 9
Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes 9
Darba sastāvs un apjoms 9
Darba aprobācija un publikācijas 10
DARBA SATURS 12
1. Teorijas un literatūras pārskats 12
2. Laboratorijas eksperimenti 15
3. Skaitliskie eksperimenti 19
4. Aproksimēšana 24
SECINĀJUMI 28
LITERATŪRAS SARAKSTS 30

ANOTĀCIJA

Promocijas darbs ir veltīts plūsmas izraisītu vibrāciju pētījumiem lieljaudas dzesēšanas sistēmās, kas sastāv no daudziem cietiem stieņiem, starp kuriem kā dzesēšanas šķidrums plūst ūdens vai smagais ūdens (D_2O – deiterija oksīds). Mērķis ir noteikt divu sistēmas parametru – stieņa masas un tā iestiprināšanas stinguma – izmaiņu ietekmi uz dominējošām frekvencēm. Vienkāršības dēļ tiek analizēta modeļa sistēma, kas sastāv no viena elastīgi iestiprināta stieņa nekustīgu stieņu masīvā ar trīsstūrveida izkārtojumu. Kustīgajam stienim ir divas brīvības pakāpes. Abi tā gali var pārvietoties plūsmas virzienā un perpendikulāri tai. Ir veiktas vairākas laboratorijas eksperimentu sērijas, lai padziļināti izpētītu viena kustīgā stieņa masas, pozīcijas masīvā un iestiprināšanas stinguma ietekmi uz svārstību amplitūdu un frekvenci pie dažādiem plūsmas ātrumiem. Eksperimenti tika veikti sadarbībā ar Paula Šērera institūtu (*Paul Scherrer Institute*) Šveicē. Iegūto datu analīze parādīja, ka stieņa pašfrekvences un turbulences izraisīto frekvenču attiecība ir parametrs, kas ļauj konstatēt izmaiņas iepriekš minētajos ievades parametros netiešā veidā. Skaitliskās hidrodinamikas (*Computational Fluid Dynamics, CFD*) simulācijas tika veiktas, lai skaitliski pētītu elastīgi iestiprināta stieņa uzvedību šķērsplūsmā. Lai modelētu stieņa kustību, tas tika aprakstīts kā masas un atsperes sistēma. Papildus tam tika analizēts, kā samazināt skaitļošanas laiku un izmaksas. Pētītajiem Reinoldsa skaitļiem tika atrasts optimāls skaitļošanas domēna lielums. Simulācijas pie dažādiem plūsmas ātrumiem ļāva analītiski aprakstīt plūsmas lauka sadalījumu spraugā starp diviem blakus esošiem cilindriem, ieviešot ieejas ātruma robežnosacījumus *CFD* simulācijām. Elastīgi iestiprinātā stieņa masas un stinguma koeficientu ietekmi uz svārstību frekvencēm novērtēja, papildus lietojot moderno metamodelēšanas pieeju. Izmantojot datus no laboratorijas un skaitliskajiem eksperimentiem, tika radīti jauni otrās kārtas modeļi, kā arī septiņu locekļu ortonormāls Ležandra polinoma aproksimācijas modelis. Inversā analīze, kas tika izmantota eksperimentālajiem datiem, ļāva izstrādāt modeļus, kuros aprakstīta sakarība starp frekvenču attiecību, stingumu un masu. Izveidotie aproksimācijas modeļi ir piemērojami nenoteiktības mazināšanai, dzesēšanas sistēmu uzraudzībai vai to bojājumu agrīnai atklāšanai, kas saistīti ar stieņu masas samazināšanos vai tā iestiprināšanas stinguma izmaiņām sistēmas darbības laikā.

PRIEKŠVĀRDS

Promocijas darbs izstrādāts Rīgas Tehniskās Universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātes Mehānikas un mašīnbūves institūtā. Laboratorijas eksperimenti veikti sadarbībā ar Paula Šērera institūtu (*Paul Scherrer Institute, PSI*) Šveicē.

Par atbalstu un palīdzību šī darba izstrādes gaitā esmu pateicīga vairākiem kolēģiem un draugiem.

Pirmkārt, izsaku pateicību darba zinātniskajam vadītājam profesoram Jānim Auziņam par iespēju izstrādāt šo darbu viņa vadībā. Paldies par idejām, sniegtajiem padomiem un kritiku!

Īpaša pateicība *Dr.* Normundam Jēkabsonam par iesaistīšanu zinātniskajā darbībā un sagādāto iespēju sadarboties ar *PSI*. Paldies par vērtīgajiem ieteikumiem un sadarbību vairāku gadu garumā.

Sirsnīgu paldies vēlos teikt *Dr.* Sergejam Dementjevam no *PSI* par viņa pacietību un ieguldīto darbu laboratorijas eksperimentu veikšanā. Paldies Filipem Barbagallo no *PSI* par spēju idejas pārvērst reālās eksperimentālās iekārtās. Pateicība arī profesorei Danielai Kiseļevai (*PSI*) un *Dr.* Mihaelam Volmuteram (*PSI*) par atbalstu sadarbībai.

Vēlos pateikties Mehānikas un mašīnbūves institūta kolēģiem par sniegto atbalstu doktorantūras studiju laikā un pēc tā, it īpaši profesoram Jānim Vībam un profesoram Andrejam Krasņikovam.

Paldies profesoram Robertam Joffem no Lūleo Tehniskās universitātes par iespēju vienmēr pajautāt un saņemt noderīgus padomus.

Pateicība Paula Šērera institūtam par laboratorijas eksperimentu finansēšanu. Pateicība Ventspils Augstskolai par iespēju izmantot skaitļošanas klasteri.

Lielais paldies manai ģimenei un draugiem par viņu uzmundrinājumiem un ticību, ka man izdosies, arī tajos brīžos, kad pat ar kurzemniecisko spītu bija par maz, lai turpinātu. Mīļš paldies Draugam par līdzās būšanu.

Rīga 2019. gada oktobris
Sabīne Upnere

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Pieaugot tehnoloģiskajām iespējām dzesēšanas iekārtu produktivitātes (jaudas) palielināšanai, pieaug arī prasības pret šo jauno iekārtu drošības sistēmām. Tām ir jāspēj identificēt iespējamās problēmas vēl pirms ātrdarbīgu sistēmu neparedzētu avārijas situāciju rašanās. It īpaši nozīmīgi tas ir jaunām iekārtām, kuru ekspluatācijas pārtraukums vai to darbības traucējumi varētu radīt nopietnas sekas gan tautsaimniecībai, gan apkārtējai videi. Šādas modernas dzesēšanas sistēmas tiek lietotas gan enerģētikā, gan arī dažādu tehnoloģisku iekārtu dzesēšanai rūpniecībā. Šādas iekārtas ar smago ūdeni izmanto kodolreaktoros un ar tiem saistītās ierīcēs.

Plašā lietojuma dēļ dažādās inženierzinātņu jomās intensīvi tiek pētīta plūsma ap caurulēm un stieņiem, tomēr vēl aizvien eksistē virkne fizikālu parādību, kas nav pietiekami izprastas un izpētītas, piemēram: 1) turbulence; 2) kavitācija; 3) dažādi šķidruma un struktūras mijiedarbības problēmas aspekti; 4) svārstību sistēmu kustības režīmu globālās bifurkācijas atrašana u. c. Dzesēšanas iekārtās, siltummaiņos vai kodolspēkstacijās turbulentas plūsmas izraisītas vibrācijas tiek uzskatītas par vienu no vispostošākajām parādībām.

Turbulentas plūsmas mijiedarbība ar konstrukcijas elementiem var izraisīt komponenšu vibrācijas, kas savukārt var radīt noguruma bojājumus, stieņu sadursmes vai savienojuma bojājumus u. c. Lai inženiertehniskās iekārtas darbotos droši, ir nepārtraukti jāuzrauga, vai kļūdu dēļ sistēmā netiek pārsniegtas tās darbības robežas (*operational limits*) un netiek apdraudēta tās strukturālā integritāte. Vienlaikus jāņem vērā, ka iekārtas darbības laikā nav iespējams mērīt sistēmas iekšējo elementu (parametru) izmaiņas tiešā veidā. Sarežģītām sistēmām tās uzvedības reakcija kā funkcija no ieejas parametriem parasti nav tieši zināma. Šādās situācijās fizikālie un skaitliskie eksperimenti bieži vien var būt vienīgais veids, kā atbilstošās sakarības noteikt. Zinot sakarības, var izmantot atbilstošus matemātiskus modeļus, lai pēc iespējas ātrāk konstatētu sistēmas tipiskās darbības izmaiņas, kas varētu liecināt par tās darbības traucējumiem un strukturālām integritātes problēmām. Šajā promocijas darbā tiek pētīta divu parametru – stieņa masas un tā iestiprināšanas stinguma – izmaiņu ietekme.

Darba mērķis

Darba mērķis ir izpētīt lieljaudas ūdensdzeses sistēmas dinamiku kā šķidruma (ūdens) un diskrētu stieņu kopēju sistēmu ar nolūku izveidot jaunus matemātiskus aproksimācijas modeļus, kas izmantojami jaunu sistēmu projektēšanā un to uzraudzībā ar garantētu funkcionēšanas drošumu.

Pētījuma uzdevumi

Promocijas darbā atrisināti vairāki galvenie uzdevumi.

1. Tika veikts esošās dinamisku sistēmu identifikācijas teorijas un prakses apskats ar nolūku izstrādāt izejas datus laboratorijas eksperimentiem stieņu vibrācijām šķidruma vidē.
2. Izstrādāta laboratorijas eksperimentu procedūra un plānošana stieņiem šķidruma vidē.
3. Sadarbībā ar *PSI* veikti laboratorijas eksperimenti.
4. Veikta eksperimentālo datu pēcapstrāde un analīze, lai turpinātu skaitliskos eksperimentus.
5. Veikta skaitlisko eksperimentu plānošana, to realizēšana, rezultātu aproksimācija un iegūts sistēmas parametru ietekmes novērtējums (kritērijs).
6. Izstrādāti daudzstieņu dzesēšanas sistēmas aproksimācijas modeļi, kas lietojami gadījumos, kad notiek stieņa masas vai tā iestiprināšanas stinguma izmaiņas.
7. Veikta izstrādāto modeļu verifikācija un validācija.
8. Izstrādāti inversās aproksimācijas modeļi dzesēšanas sistēmu ekspluatācijas drošumam un uzraudzībai.

Pētījuma objekts un pētījuma priekšmets

Pētījuma objekts ir trīsstūrveida izkārtojuma cieši izvietotu stieņu sistēma, caur kuru plūst turbulenta ūdens plūsma. Pētījuma priekšmets ir sistēmas parametri: plūsmas ātrums, vibrējošā stieņa masa, iestiprināšanas stinguma koeficients, vibrējošā stieņa pozīcija masīvā un hidrodinamiskais spēks, kas iedarbojas uz stieni.

Darba zinātniskā novitāte

Ir iegūts plašs mērījumu datu kopums par elastīgi iestiprināta stieņa svārstību amplitūdu un raksturīgajām frekvencēm pie dažādiem sistēmas sākuma nosacījumiem, izmantojot laboratorijas eksperimentus.

Analizējot laboratorijas eksperimentu datus, ir noskaidrots parametrs, kas ļauj visefektīvāk detektēt izmaiņas elastīga stieņa masā un iestiprināšanas elementa stingumā.

Ir noskaidrots un matemātiski tuvināti aprakstīts tipisks plūsmas lauka sadalījuma profils starp diviem blakus esošiem stieņiem masīvā ar cieši izvietotiem stieņiem. Profils ir izmantojams skaitliskās hidrodinamikas simulācijās kā ieejas parametrs, ļaujot ievērojami samazināt skaitļošanas laiku un izmaksas.

Izmantojot inverso analīzi, ir iegūtas matemātiskas aproksimācijas: a) stinguma koeficienta – frekvenču attiecības; b) stieņa masas – frekvenču attiecības savstarpējās atkarības aprakstam. Inversie modeļi ļauj novērtēt sistēmas uzvedības izmaiņas laikā, zinot tās raksturīgās frekvences.

Darba praktiskā vērtība

Pētījuma rezultāti ir izmantojami plaša spektra iekārtu, kur objektu dzesēšanai tiek izmantots ātri plūstošs ūdens, izstrādē un uzraudzībā. Latvijā pētījuma rezultāti ir lietojami, piemēram, rūpniecībā izmantojamās iekārtās, kur ir nepieciešama strauja objekta/u atdzesēšana. Vēl viens iespējamais lietojums ir dzesēšanas iekārtās katlumājās. Papildus tam iegūtie secinājumi ir izmantojami *PSI* protona stara mērķa *SINQ* (*Swiss Spallation Neutron Source*) monitoringa sistēmā.

Apkopotie rezultāti ir izmantojami analītisku modeļu izveidē, kas aprakstītu elastīgi iestiprināta stieņa un plūsmas mijiedarbību cieši izvietotu stieņu masīvā. Iegūtie secinājumi par skaitļošanas domēna izmēra ietekmi uz rezultātu un ātruma profilu ir lietojami vienkāršotu skaitlisku modeļu izveidei, būtiski nezaudējot precizitāti, bet ietaupot skaitļošanas resursus.

Pētījuma metodes

Lai iegūtu vispusīgu informāciju par dzesēšanas iekārtas, kas sastāv no stieņu masīva, caur kuru plūst ūdens, parametriem, tika izmantotas šādas metodes:

1) klasiskās mehānikas svārstību teorijas metode;
2) fizikālu procesu laboratorijas eksperimentu metode šķidruma (ūdens) vidē;
3) eksperimentālo datu apstrādes metode;
4) skaitliskās modelēšana ar datoru metodes;
5) metamodelēšanas teorija un metodes.

Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes

1. Aprēķinu metodika, kas lietojama efektīvai plūsmu skaitliskai modelēšanai caur cieši izvietotu stieņu masīvu, ieskaitot optimāla skaitļošanas domēna izvēli un tuvinātu plūsmas ātruma profilu spraugā starp diviem blakus esošiem stieņiem.
2. Inversais aproksimācijas modelis, kas apraksta stieņa iestiprināšanas stinguma atkarību no raksturīgās frekvences attiecības, ko var izmantot sistēmas drošības monitoringā.
3. Inversais metamodelis, kas apraksta vibrējošā stieņa masu kā divu parametru funkciju (frekvences attiecība un iestiprināšanas stingums), ko var lietot, lai noteiktu stieņa bojājumus, kas saistīti ar stieņa masas samazināšanu.

Darba sastāvs un apjoms

Promocijas darbā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi un literatūras saraksts. Darba apjoms ir 123 lappuses, 65 attēli, deviņas tabulas un literatūras saraksts, kurā ir 149 nosaukumi.

Darba aprobācija un publikācijas

Promocijas darba izstrādes laikā par iegūtajiem rezultātiem ir ziņots vairākās starptautiskās konferencēs.

- 8th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences, Bratislava, Slovākija, 26.–29. augusts, 2019.
- 1st International Conference on Numerical Modelling in Engineering, Gente, Beļģija, 28.–29. augusts, 2018.
- 4th un 3rd International Conference on Optimization and Analysis of Structures, Tartu, Igaunija, attiecīgi 22.–23. augusts, 2018 un 23.–25. augusts, 2015.
- 29th International Conference ”Vibroengineering”, Viļņa, Lietuva, 1. decembris, 2017.
- 3rd International Conference ”Innovative Materials, Structures and Technologies”, Rīga, Latvija, 28.–29. septembris, 2017.
- International Conference on Engineering Vibration, Sofija, Bulgārija, 4.–7. septembris, 2017.
- 16th un 15th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development, Jelgava, Latvija, attiecīgi 24.–26. maijs, 2017 un 25.–27. maijs, 2016.
- 5th European Seminar on Computing, Pilzene, Čehijas Republika, 5.–10. jūnijs, 2016. Balva par labāko stenda (postera) referātu.
- International Symposium and Winter-School on Modeling, Adaptive Discretizations and Solvers for Fluid-Structure Interaction, Linca, Austrija, 11.–15. janvāris, 2016.

Galvenie darba rezultāti ir izklāstīti 10 zinātniskās publikācijās žurnālos un recenzētos konferenču rakstu krājumos. Visi raksti ir indeksēti *Scopus* un/vai *Web of Sciences* datubāzēs.

1. Upnere S., Auzins J., Jekabsons N. Metamodel–Based Analysis of Cross–Flow–Induced Vibrations. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2019, Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2273-014.

2. Upnere S., Jekabsons N., Dementjevs S., Wohlmuther M. Experimental Studies of a Single Flexibly-Mounted Rod in a Triangular Rod Bundle in Cross-Flow. *MATEC Web of Conferences*, 2018, Vol. 148, 09002. https://doi.org/10.1051/matecconf/201814809002.

3. Upnere S. Numerical Study of Flow-Induced Vibrations of Multiple Flexibly-Mounted Cylinders in Triangular Array. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2018, N 5. https://doi.org/10.2478/lpts-2018-0035.

4. Upnere S., Jekabsons N. Stability Evaluation of the Rod in Triangular Array Predicted by CFD. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, ISSN 1757-8981. e-ISSN 1757-899X. https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012062.

5. Upnere S., Jekabsons N. Dynamic Displacement Estimation Using Data Fusion. *Vibroengineering PROCEDIA*, 2017, Vol. 15, pp. 145–149. ISSN 2345-0533. https://doi.org/10.21595/vp.2017.19425.

6. Upnere S., Jekabsons N. Estimation of Cross-Flow Influence on Spring-Mounted Cylinder in Triangular Cylinder Array. *Proc. 16th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development"*, 2017, pp. 792–797. ISSN 1691-5976.
7. Upnere S., Jekabsons N. Flow-Induced Vibration of Cylindrical Structures. *Proc. 15th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development"*, 2016. pp. 1244–1249. ISSN 1691-5976.
8. Upnere S. Modeling of the elastically-mounted cylinder behavior in the cross-flow. Pieņemts publicēšanai: *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, Vol. 49, pp. 327–342.
9. Upnere S. Numerical Investigation of Flow-Induced Forces in the Rods Bundle. Pieņemts publicēšanai: *IOP Journal of Physics: Conference Series*, 2019.
10. Upnere S., Jekabsons N., Dementjevs S., Wohlmuther M. Effects of variable parameters on the behaviour of the single flexibly-mounted rod in a closely-packed array. Pieņemts publicēšanai: *Journal of Vibroengineering*, 2019–2020.

DARBA SATURS

1. Teorijas un literatūras pārskats

Pirmā nodaļa ir veltīta īsam zinātniskās literatūras un būtiskāko teorijas jautājumu pārskatam par 1) plūsmas izraisītām vibrācijām (*Flow-Induced Vibrations, FIV*) cauruļu vai stieņu sistēmās, 2) skaitliskās hidrodinamikas (*Computational Fluid Dynamics, CFD*) metožu lietojumiem, lai prognozētu vibrāciju rašanās aspektus masīvos pie dažādiem sākuma nosacījumiem, 3) metamodelēšanas iespējām eksperimentu plānošanā, mehānisku sistēmu izpētē un aproksimācijā.

Stieņu masīvi komerciālajos siltummaiņos un ūdensdzeses sistēmās tiek veidoti no vienkāršiem ģeometriskiem šabloniem – kvadrātiem vai trīsstūriem [1]. Efektīvām dzesēšanas konstrukcijām bieži ir vajadzīgi lieli plūsmas ātrumi, kā arī cauruļu sienas biezuma samazināšana, tajā pat laikā ir jāņem vērā vibrāciju mehānismi, kas masīvā varētu rasties plūsmas ietekmē. Tādējādi *FIV* problēma kļūst par vienu no nozīmīgākajām dinamiskām problēmām dzesēšanas sistēmu projektēšanas procesā.

Ierosmes mehānismi, kas rada svārstības stieņu masīvos, ir tieši saistīti ar plūsmas ātrumu. Kad plūsma ir sasniegusi ātrumu, kas nepieciešams pārejai uz turbulenci, plūsmas gadījuma raksturs rada nejaušu dinamisku spiedienu uz stieņa virsmu, ieskaitot nejaušu stieņa pārvietošanos. Plūsmas ātrumam turpinot pieaugt, tā, plūstot caur stieņu masīvu, papildus izraisa arī virpuļu atraušanos no virsmas, radot tās spiediena harmoniskas svārstības. Pie lieliem plūsmas ātrumiem pastāv mijiedarbība starp plūsmas lauku un stieņu masīva atbildes vibrācijām. Klasiski tiek definēti trīs pamata mehānismi, kas izraisa strukturālu elementu vibrācijas stieņu masīvā šķidruma šķērsplūsmas ietekmē. Tie ir: virpuļplūsmas iedarbība (*vortex shedding*), turbulentās vibrācijas (*turbulent buffeting*) un šķidruma elastīgā nestabilitāte (*fluidelastic instability*) [2]. Stieņu masīva raksturīgā uzvedība ir atkarīga arī no mehāniskām un ģeometriskām iezīmēm, piemēram, stieņa iestiprināšanas metodes un konfigurācijas, attāluma starp stieņu centriem un diametra attiecības (P/d) utt.

Šajā darbā galvenā uzmanība tika veltīta turbulences izraisīto vibrāciju pētījumiem daudzstieņu sistēmā ar cieši izvietotiem cilindriskiem stieņiem. Šādas sistēmas piemērs varētu būt *SINQ* mērķis. *SINQ* ir protonu stara mērķis, kas atrodas Paula Šērera institūtā (Šveicē). Mērķa galvenais elements ir stieņu masīvs (315 stieņi 37 rindās), kas izgatavots no cirkonija (Zr) sakausējuma caurulēm, kas piepildītas ar svinu (Pb). Sakarā ar cilindrisko stieņu nostiprināšanas veidu mērķī (skat. 1.1. a att.), ir sagaidāms, ka stienis var pārvietoties mazā pielaides intervālā plaknē, kas ir perpendikulāra cilindra asij. Protonu staru kūlis izraisa sadursmes (*spallation*) reakciju, kas papildināta ar spēcīgu siltuma izdalīšanos stieņos. Stieņus atdzesē ar smagā ūdens šķērsplūsmu, kas var izraisīt stieņu vibrācijas. Vibrāciju parametri ir atkarīgi no konstrukcijas stingrības, plūsmas ceļa ģeometrijas, smagā ūdens īpašībām un plūsmas ātruma. *SINQ* mērķis ir labi izstrādāts, bet kopējā jauda gadu gaitā ir ievērojami palielinājusies. Tāpēc atsevišķos gadījumos ir iespējams, ka stienī rodas bojājumi ūdens vārīšanās, caurules plaisas un svina noplūdes vai citu iemeslu dēļ (skat. 1.1. b att.). Mērķa parametru izmaiņām būtu jāizraisa vibrāciju frekvenču un amplitūdas izmaiņas. Tas ļautu izmantot vibrāciju analīzi mērķa konstrukcijas veselības uzraudzībai (*structural health monitoring, SHM*).

(a) (b)

1.1. att. (a) Pb pildīta stieņu iestiprināšana *SINQ* protona stara mērķī; (b) stieņa fotogrāfija pēc lietošanas *SINQ* mērķī ar bojājumu, kas izraisa masas samazināšanos svina noplūdes dēļ [3].

Turbulences izraisītas vibrācijas ir šķidruma un konstrukcijas mijiedarbības rezultāts starp cauruli un plūsmu, kuras turbulences intensitāte ir saistīta ar ienākošās plūsmas turbulences līmeni cauruļu komplektā, kā arī turbulenci, ko rada augšpusē esošās cauruļu rindas [4]. Parasti turbulences izraisīto vibrāciju mehānisms nerada tūlītējas katastrofālas izmaiņas sistēmā, tomēr ilgtermiņā tas var radīt progresējošus cauruļu bojājumus [5].

Līdz ar datortehnikas jaudu un veiktspējas straujo palielināšanos par aizvien lietderīgāku pieeju plūsmas izraisītu vibrāciju pētījumiem kļūst *CFD* simulācijas. Lai arī *CFD* ir populāra un vispārpieņemta prakse, lietojamu rezultātu iegūšana vēl aizvien ir izaicinājums, jo nav vienas metodes, piemēram, turbulences modelēšanai vai aprēķināšanai, kas būtu lietojama visos gadījumos.

Relatīvi visvienkāršākā situācija ir tad, kad plūsmā ir ievietots viens cilindrisks stienis. Šādas simulācijas var tikt izmantotas izvēlētās metodes un izstrādātā modeļa validēšanai, jo zinātniskajā literatūrā ir pieejami gan eksperimentāli, gan skaitliski dati par atsevišķa stieņa integrālajiem parametriem, piemēram, cēlējspēka (*lift*) un frontālās pretestības (*drag*) koeficientiem, Štrouhala skaitli.

Dzesēšanas iekārtās, siltummaiņos vai kodolreaktoros parasti ir stieņu vai cauruļu masīvi ar vairākiem desmitiem vai pat simtiem cilindrisku elementu. Lai arī mūsdienās skaitļošanas jaudas ir būtiski augušas, tomēr izmaksas mēdz būt ievērojamas. Ir veikta virkne pētījumu, lai noteiktu minimālo rindu un kolonnu skaitu, kas nepieciešams, lai modelētu masīva uzvedību plūsmas ietekmē, piemēram, avotos [6] un [7].

Zinātniskajā literatūrā ir pieejami vairāki pētījumi, kas salīdzina 2D un 3D modeļu rezultātus. No avotā [8] aprakstītiem lielo virpuļu simulāciju (*Large Eddy Simulations*) rezultātiem var secināt, ka pie zemiem Reinoldsa skaitļiem (pētījumā Re = 2840) plūsmas trīsdimensionālie efekti ir salīdzinoši maznozīmīgi. Turpretī, ja Reinoldsa skaitlis ir vidējs vai liels, tad no Šindes (*Shinde*) u. c. [9] publikācijas izriet, ka 3D simulācijas pie Re = 60 000 uzrāda aptuveni 30 % pieaugumu svārstību amplitūdai, salīdzinot ar 2D gadījumu. Turklāt cēlējspēka koeficienta spektrs attēlo augstākas frekvences, kas norāda, ka turbulences enerģija

palielinās plūsmas dinamikas ietekmē cilindra ass virzienā. Tomēr cilindra reakcijas signāla (*response signal*) spektri uzrāda tādu pašu svārstību frekvenci gan 2D, gan 3D simulācijām, kas sakrīt ar teorētisko novērtējumu, ka nestabilitāte galvenokārt rodas šķērsplūsmai perpendikulārā virzienā. Tādējādi var secināt, ka noteiktos apstākļos 2D simulācijas dod akceptējamas precizitātes rezultātus. Turklāt jāņem vērā, ka skaitļošanas domēns 3D gadījumos ir ievērojami lielāks nekā 2D un tas būtiski palielina nepieciešamos skaitļošanas resursus un laiku. Šis pētījums galvenokārt analizē frekvences, tāpēc no iepriekš minētā redzams, ka optimāli ir izmantot 2D ģeometriju ar atbilstoši izvēlētu masas un stīvuma koeficientu.

Tipiskā gadījumā laboratorijas eksperimentos stieņa vibrācijas masīvā tiek noteiktas, izmantojot akselerometrus, lāzera tālmērus vai tenzodevējus. Tomēr jāņem vērā, ka šīs metodes nav iespējams lietot reālās, strādājošās iekārtās, it īpaši gadījumos, kad iekārtas darbojas radiācijas apstākļos. Tādēļ strādājošu sistēmu uzraudzībā jālieto matemātiskas aproksimācijas.

Lai prognozētu sistēmas raksturīgo uzvedību, izmantojot zemākas dimensijas (*low-dimensional*) aproksimāciju kādai augstākas kārtas (*high-dimensional*) problēmai, var izmantot matemātisku aproksimāciju, ko literatūrā apzīmē ar jēdzieniem "metamodelis" vai "surogātmodelis". Metamodeļu lietošana ļauj efektīvi izprast un novērtēt modeļa faktoru (ieejas) un atbilžu (izejas) savstarpējo atkarību. Lai iegūtu faktoru un atbilžu sakarības, var izmantot gan fizikālos, gan skaitliskos eksperimentus. Būtisks posms efektīvai metamodeļa izveidei ir eksperimentu plānošana. Centrālie kompozītu plāni bieži tiek izmantoti otrās kārtas atbildes virsmu izveidei [10], turpretī datoru eksperimentu plānošanai visefektīvāk ir izmantot telpu aizpildīšanas plānus [11], piemēram, dažādus latīņu hiperkuba plānu (*LHS*) veidus [12], [13]. Svarīga koncepcija eksperimentu plānošanā ir ortogonalitāte. Ortogonāls plāns ļauj samazināt regresijas koeficientu dispersiju [10]. Avotā [14] tiek aprakstīti jauni ortogonālo plānu veidi.

Pēc eksperimenta plāna izvēles un nepieciešamo simulāciju vai fizikālo eksperimentu veikšanas seko piemērota aproksimācijas (matemātiskā) modeļa atrašana. Aproksimācijas mērķis ir iegūt instrumentu sarežģītas vai ar lieliem izdevumiem saistītas sistēmas analīzei [15]. Apkopojot zinātniskajā literatūrā pieejamo informāciju, var secināt, ka viens no vispopulārākajiem aproksimācijas modeļu tipiem ir atbildes virsmu metode (*Response Surface Method, RSM*), ko izstrādāja Bokss un Vilsons (*Box & Wilson*) [16]. *RSM* ir noderīga un efektīva gadījumos, kad sistēmas parametru skaits ir neliels un tās uzvedība nav izteikti nelineāra [17].

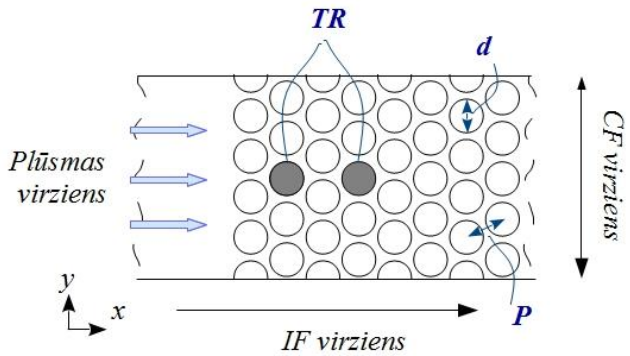
Mūsdienu inženierzinātnēs aktuāla tēma ir inversā analīze. Inversās problēmas ir definētas kā tādas, kurās izejas ir zināmas, bet ieejas vai izejas avots vēl ir jānoskaidro. Inversajā metamodelēšanā aproksimācijas metodes tiek lietotas, lai izveidotu apgrieztās sakarības modeli. Tādējādi tiek iegūta inversā sakarība starp sekām un cēloni, ko var izmantot sistēmu monitoringam.

2. Laboratorijas eksperimenti

Otrajā nodaļā ir aprakstīta laboratorijas eksperimentālā iekārta, izmantotie sensori, eksperimentu realizēšanas gaita, iegūtie rezultāti un to apstrāde. Eksperimentālo datu analīze ļāva iegūt virkni secinājumu par viena elastīgi iestiprināta stieņa, kas ievietots cieši izvietotu stieņu masīvā, uzvedību pie dažādiem sākuma nosacījumiem.

Eksperimentālā iekārta atrodas *PSI* un eksperimenti tika veikti sadarbībā ar *PSI* kolēģiem. Iekārta sastāv no ūdens kontūra ar testa sekciju, kas satur fiksētu stieņu masīvu ar atsevišķu, elastīgi iestiprinātu testa stieni (*TR*), mēriekārtām un sensoriem. Ūdens kontūra sistēma ir veidota no taisnstūrveida ieejas un izejas ūdens kanāliem, ūdens sūkņa, izplešanās tvertnes, plūsmas mērītāja, manometra un stieņu masīva testa sekcijas. Plūsmas ātrums (*flow rate*) kanālā var būt robežās no 0 līdz 2,9–3,0 L/s. Reinoldsa skaitlis, pamatojoties uz ieejas ātrumu U_{in} un cilindra diametru d, ir līdz $16{,}4 \cdot 10^3$ ($Re = U_{\text{in}} d/\nu$, kur ν ir ūdens kinemātiskā viskozitāte). Eksperimenta laikā plūsmas ātrums tika mainīts pakāpeniski, no minimuma maksimumu sasniedzot 100 soļos.

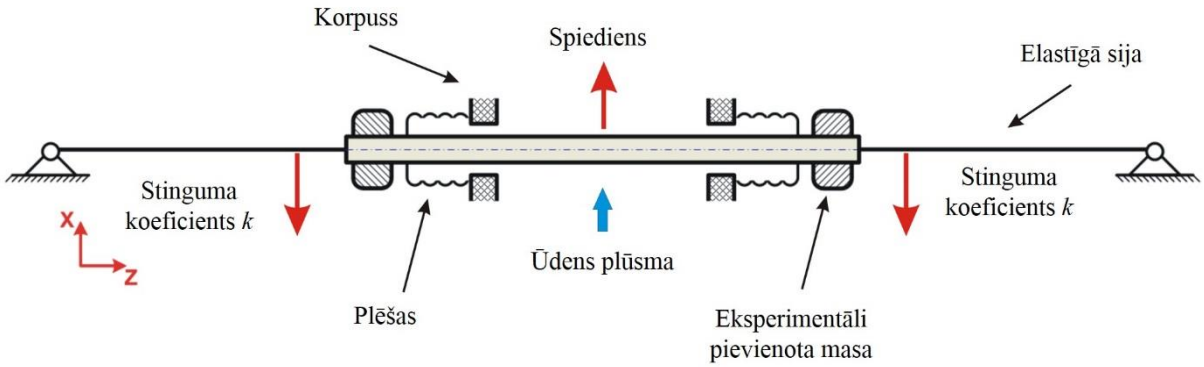
Testa segments ar stieņu komplektu sastāv no taisnstūrveida kanāla ar šķērsgriezumu 30 mm^2 × 97 mm^2, kas strauji pāriet mazākā šķērsgriezumā 30 mm^2 × 47 mm^2. Stieņu masīvs ar 21 rindu cietiem (*rigid*) cilindriskiem nerūsējošā tērauda stieņiem ir novietots kanāla šaurākajā daļā 97 mm no sekcijas ieejas. Stieņi ir izvietoti trīsstūrveida izkārtojumā ar mazu attiecību P/d = 1,1 (skat. 2.1. att.). Katra rinda satur piecus stieņus vai četrus stieņus un divus pusstieņus. Stieņi ir stingri nostiprināti organiskā stikla korpusā. Visi stieņi ir identiski: 30 mm gari, ar diametru d = 8 mm un ar vienādām mehāniskajām īpašībām. Ir sagaidāms, ka korpusa pašfrekvence ir ievērojami augstāka nekā *TR* frekvence.



2.1. att. Šķērsgriezums stieņu masīva testa sekcijai.

Lielākoties eksperimentālie pētījumi tika veikti, kad *TR* atradās ceturtās rindas vidū. Lai noskaidrotu *TR* pozīcijas masīvā un komplekta rindu skaita ietekmi uz *TR* uzvedību šķērspūsmā, tika mainīta *TR* atrašanās vieta no ceturtās uz otro rindu, noņemot pirmās divas masīva rindas. *TR* skici var redzēt 2.2. attēlā. Stieņa *TR* gali ir iestiprināti gofrēta metāla plēšās (*bellow*), tādējādi nodrošinot hidroizolāciju. Brīva *TR* pārvietošanās perpendikulāri plūsmai (*cross-flow, CF*) un plūsmas virzienā (*inflow, IF*) tiek nodrošināta ar divām elastīgām, cilindriskām sijām, kas ir 128 mm garas. Tika izmantotas trīs dažāda diametra elastīgās sijas, ko raksturo ar tās stinguma koeficientu k. Sijas masa ir ievērojami mazāka nekā stieņa masa (mazāk nekā 3 % no *TR* masas). Tika pētīta arī *TR* masas ietekme, abos *TR*

galos eksperimentāli pievienojot papildu masas elementus. Tādējādi *TR* masa tika palielināta par 35 %.



2.2. att. Elastīgi iestiprinātā *TR* skice.

Izmantotais mēraparatūras komplekts ietver četrus vienas ass akselerometrus un divus lāzera triangulācijas sensorus. Maksimālā mērījumu iztveršanas frekvence (*sampling frequency*) ir 2 kHz gan akselerometra, gan lāzera sensoriem. Katrā *TR* galā ir divi akselerometri, lai iegūtu *TR* paātrinājuma mērījumus abos – *CF* un *IF* – virzienos. Lai iegūtu *TR* ātrumu un pārvietojumu no akselerometru mērījumu datiem, lietoja ātro Furjē transformāciju (*FFT*) un inverso Furjē transformāciju. Lāzera sensori tika izvietoti vienā *TR* galā pa vienam katrā virzienā.

Lai samazinātu mērījumu kļūdu eksperimentālos rezultātos, tika veikti vairāki pasākumi, ieskaitot atkārtotus mērījumus ar tādiem pašiem sākuma nosacījumiem. Gadījuma nenoteiktība (U_f) ar 95 % ticamības robežu pie dažādiem sākuma nosacījumiem, kas aprēķināta saskaņā ar Rēdi (*Reedy*) [10] formulējumu, ir apkopota 2.1. tabulā, kur m^* ir masas attiecība. Lai pārbaudītu sensorus un mērījumu datu iegūšanas sistēmu, eksperimentālā iekārta tika papildināta ar ārēju ierosināšanas ierīci, kas rada stieņu svārstības ar zināmu frekvenci. Tika pārbaudīta dažādu mērījumu paraugu ņemšanas biežuma ietekme. Zināms ģenerēts signāls tika izmantots, lai pārbaudītu algoritmus, ko lietoja akselerometru mērījumu datu pēcapstrādei. Tika salīdzināts arī pārvietojums no lāzera sensora mērījumiem un aprēķinātais pārvietojums no akselerometra.

2.1. tabula

Pašfrekvenču f_n gadījuma nenoteiktība U_f ar 95 % ticamības robežu

Gadījums	f_n, Hz	U_f, Hz
k_1, m^* = 0,42	41,88	±0,2040
k_2, m^* = 0,42	48,09	±0,1454
k_3, m^* = 0,42	58,50	±0,3771
k_1, m^* = 0,567	38,31	±0,1301

Eksperimentālie pētījumi tika sākti ar mērījumiem bez plūsmas. Visas sensoru detektētās frekvences šajos eksperimentos tiek uzskatītas par vides troksni. Tipiskā gadījumā akselerometru nomērītā trokšņa sadalījums ir līdzīgs Gausa sadalījumam. Lai noteiktu svārstību frekvences, kas ir saistītas ar plūsmas vai sistēmas īpašībām, bet ne ar *TR* svārstībām, tika veikti eksperimenti ar stieņu komplektu, kurā visi stieņi ir fiksēti. Iegūtajā frekvenču spektrā var noteikt grupu ar frekvencēm f_{t}, kas ir tieši atkarīgas no plūsmas ātruma: jo ātrāka ūdens plūsma, jo augstāka frekvence. Frekvenču un ūdens ātrumu savstarpējā attiecība ir lineāra. Var uzskatīt, ka novērotā frekvenču grupa f_{t} ir saistīta ar turbulentām svārstībām ūdens plūsmā un aptuveni atbilst Štrouhala skaitlim St = 0,20.

Kopējais *TR* pārvietojums tika iedalīts divās daļās: pastāvīgā novirze (η_{p}) no koordinātu sistēmas sākumpunkta iegūta no lāzera sensora mērījumiem un vidējā svārstību amplitūda ($\bar{A}_{\mathrm{f}}$), ko iegūst no akselerometra datiem.

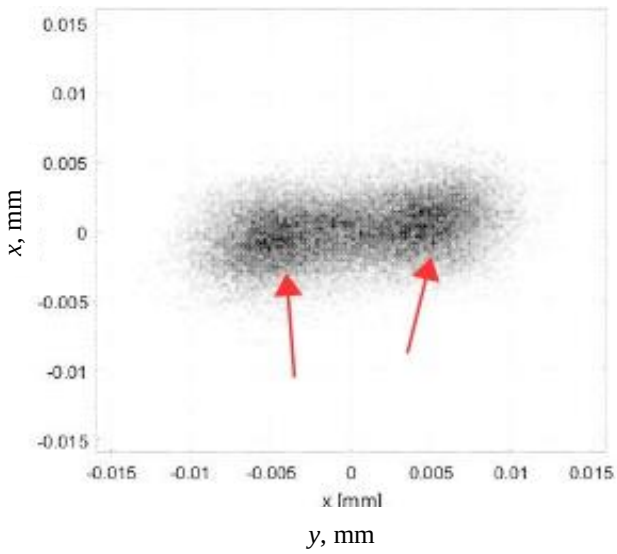
Pieaugošo plūsmu var iedalīt trīs apgabalos atkarībā no *TR* vibrāciju amplitūdas uzvedības saistībā ar ūdens ātrumu atbilstošajā reģionā: 1) vibrācijas pirmajā ātruma reģionā ir ar relatīvi mazu amplitūdu; 2) otrajā reģionā *TR* vibrāciju amplitūdas strauji pieaug un, kad sasniedz pīķa vērtību, strauji samazinās; 3) pēdējā ātruma reģionā atkal ir novērojamas salīdzinoši mazas amplitūdas vibrācijas līdzīgi kā pirmajā reģionā.

Gadījumos, kad plūsmas ātrums samazinās, pīķa vērtības bezdimensionālām vibrāciju amplitūdām $\bar{A}_{\mathrm{f}}/d$ ir novērojamas pie mazākiem plūsmas ātrumiem nekā augošas plūsmas gadījumā. Maksimālās $\bar{A}_{\mathrm{f}}/d$ vērtības gan *IF*, gan *CF* virzienā tiek sasniegtas, kad ūdens plūsma ir pieaugoša. Arī pastāvīgās novirzes η_{p} grafiks pieaugošai plūsmai atšķiras no samazinošas plūsmas grafika. No iegūtajiem rezultātiem izriet, ka tiek novērots histerēzes efekts. η_{p} mērījumi rāda, ka nullpunkta nobīde *IF* virzienā pieaug, ja plūsmas ātrums palielinās. Pastāvīgā novirze ir novērojama arī *CF* virzienā. Masīva izkārtojums teorētiski ir simetrisks, tāpēc nobīdi no koordinātu sistēmas sākumpunkta *CF* virzienā varētu izskaidrot ar sākotnēju *TR* nesimetrisku novietojumu masīvā. *CF* pastāvīgā novirze pieaug līdz ar plūsmas ātruma palielināšanos. Tādējādi var secināt, ka plūsmas ātrums var palielināt sākotnējo stieņa novietojuma neprecizitāti.

Iegūtie rezultāti rāda, ka *TR* masas izmaiņas ir detektējamas frekvenču domēnā. Tas varētu būt lietderīgi *SHM* situācijā, kad stieņa bojājumi rada masas samazināšanos. Turpmāki pētījumi ir nepieciešami, lai noteiktu minimālo detektējamo *TR* masas izmaiņu, kas ir pamanāma frekvenču spektrā.

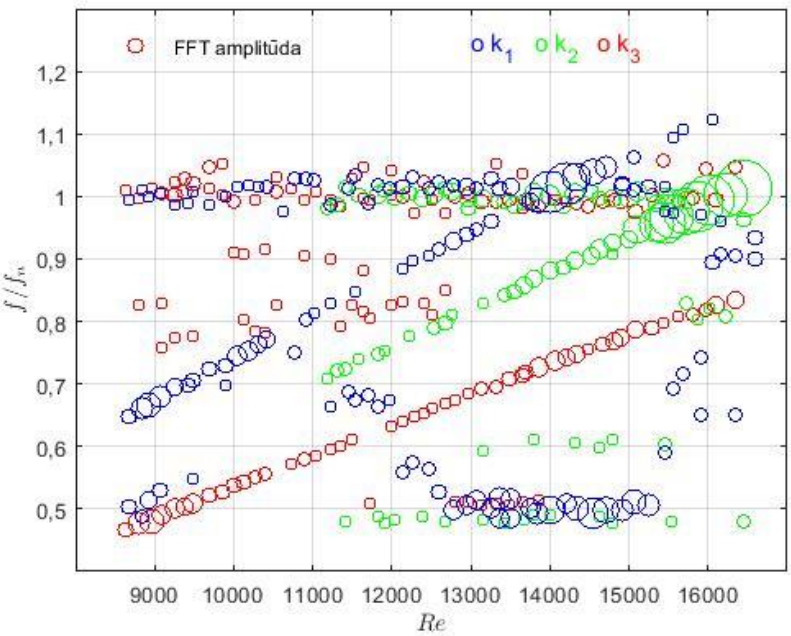
Stieņa stiprinājuma izmaiņas tika modelētas, izmantojot trīs veidu elastīgās sijas ar stingumu k_1 (vislokanākais), k_2 (vidējs) un k_3 (ciets). Elastīgo siju atrašanās vietas modelī var redzēt 2.1. attēlā. Vibrāciju amplitūdas maksimālās vērtības *CF* un *IF* virzienos tiek sasniegtas, kad ir lietotas sijas ar vidējo stingumu k_2. Lai labāk izprastu stieņa *TR* uzvedību, kad tiek sasniegtas amplitūdas pīķa vērtības, tika ieviesta stāvokļa izkliedes funkcija $P_i(t)$, kas atrod apgabalus plaknes šķērsgriezumā, kur *TR* gals ir visbiežāk sastopams laikā.

Izmantojot $P_i(t)$, tika noteikti divi *TR* kustības režīmi: 1) *TR* gali lielāko laiku pavada ap punktu, kas atbilst novirzei η_{p}; 2) intervālā, kur *TR* pašfrekvencei f_{n} un f_{t} ir līdzīgas vērtības, var novērot divus līdzsvara punktus, ap kuriem stieņa gals svārstās (skat. 2.3. att.), turklāt grafiki nav vienādi abiem stieņa *TR* galiem. No tā var secināt, ka *TR* pārvietošanās ir kļuvusi trīsdimensionāla.



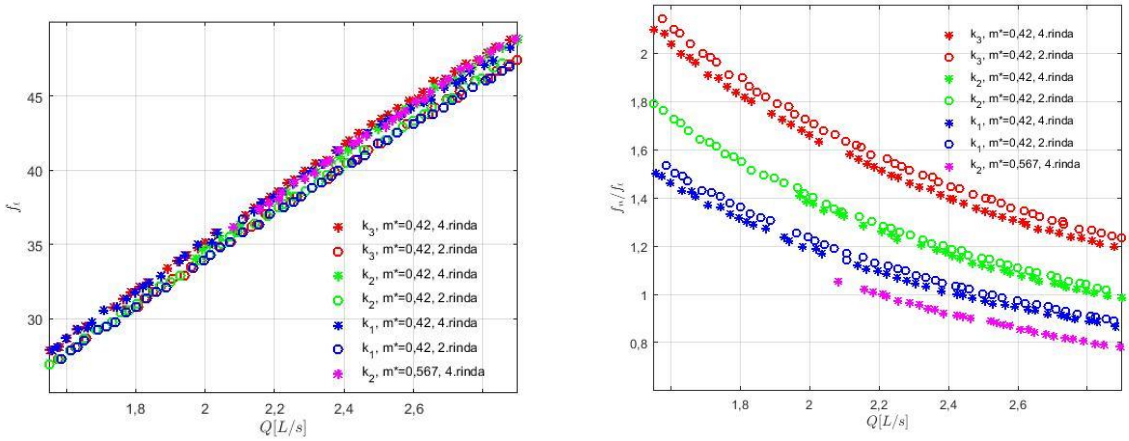
2.3. att. *TR* pozīcija laikā *xy* plaknē.

Situācijā, kad tika izmantotas vislokanākās elastīgās sijas ar stingumu k_1, no lāzera sensoru iegūtajiem mērījumu datiem var secināt, ka pie reducētā ātruma U_r = 5,4 sākas kontaktproblēma, t. i., stienis *TR* sāk mijiedarboties ar konstrukcijas korpusu. Dominējošās frekvences trim elastīgās sijas stingumiem atkarībā no reducētā plūsmas ātruma ir redzamas 2.4. attēlā. Apļu diametrs norāda *FFT* amplitūdas lielumu. Līdzīgs fāžu portrets tiek iegūts, kad stingums ir k_2 un k_3. Kad sijas stingums ir k_1, frekvenču spektrā tiek novēroti divi bifurkācijas punkti. Ja elastīgās sijas stingums ir k_1 vai k_2, stieņa *TR* vidējās svārstību amplitūdas izmaiņas ir detektējamas arī tad, kad tiek izmainīta *TR* pozīcija no ceturtās rindas uz otro rindu, noņemot masīva pirmās divas stieņu rindas. Situācijā ar vidēju stingumu (k_2) pīķa vērtība tiek sasniegta pie tā paša reducētā ātruma abos gadījumos, tikai maksimālā vērtība ir aptuveni trīs reizes mazāka, ja *TR* atrodas otrajā rindā.



2.4. att. Dominējošās, normalizētās frekvences *CF* virzienā pie trim elastīgās sijas stingumiem. Apļa diametrs atbilst *FFT* amplitūdas lielumam.

Iegūto eksperimentālo rezultātu analīze liecina, ka frekvenču attiecība f_t/f_n ir vairāk piemērota parametru izmaiņu detektēšanai nekā frekvence f_t. Rezultāti ir redzami 2.5. attēlā.



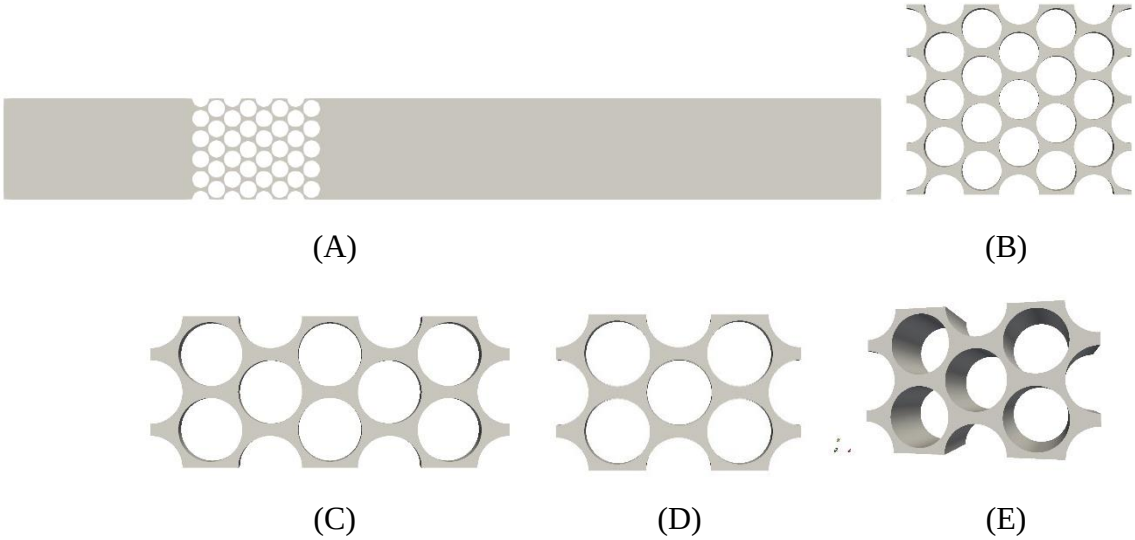
2.5. att. Dominējošās frekvences atkarībā no plūsmas ātruma pie dažādiem stingumiem *k*, stieņa masām *m* un *TR* atrašanās vietām masīvā. Pa kreisi – frekvence f_t. Pa labi – frekvenču attiecība f_t/f_n.

3. Skaitliskie eksperimenti

Promocijas darba trešā nodaļa ir veltīta veikto skaitlisko eksperimentu aprakstam. Ar skaitlisko eksperimentu palīdzību tika pētīti plūsmas izraisītie spēki, kas iedarbojas uz *TR* stieņu masīvā. Liela uzmanība tika veltīta tam, lai pēc iespējas samazinātu skaitļošanas laiku un izmaksas. Simulācijās stieņi tika aproksimēti kā 2D cilindri.

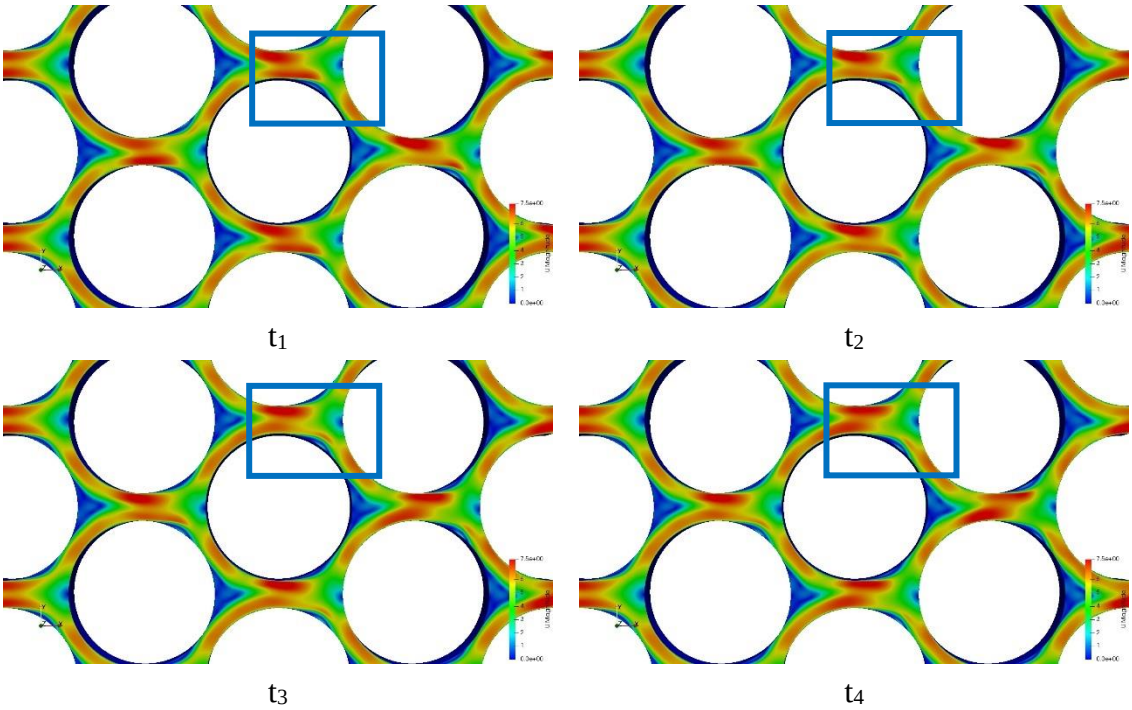
Atvērtā koda *CFD* rīks *OpenFOAM 2.4.x* (*OF*) tika izmantots 2D nepārtrauktības un impulsa diferenciālvienādojumu risināšanai. *RANS* (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) un *URANS* (*Unsteady RANS*) vienādojumi tika risināti ar k-epsilon un k-omega *SST* turbulences modeļiem, lai nodrošinātu vienādojumu sistēmas noslēgtību (*closure*). Tika izmantoti gan zemā, gan augstā Reinoldsa turbulences modeļi. Atkarībā no turbulences modeļa tika analizēti dažādi skaitļošanas domēni. Piemērus var redzēt 3.1. att., kur (A) atbilst augstā Reinoldsa turbulences modelim un (B)–(E) tika lietoti ar zemā Reinoldsa modeļiem.

Saskaņā ar Rošē (*Roache*) [18] nenoteiktība skaitliskajās simulācijās ietver trīs svarīgākos elementus: kodu pārbaudi; risinājuma pārbaudi; validāciju. Modelēšanas procesā tika izmantoti standarta *OF* risinātāji (*solvers*), tāpēc koda pārbaude netika veikta. Risinājuma pārbaude tika veikta, izmantojot plūsmas simulāciju ap vienu cilindru, kad *Re* = 11 000, salīdzinot integrālos parametrus (Štrouhala skaitli, frontālās pretestības un cēlējspēka koeficientus) ar literatūrā pieejamiem datiem. Testa gadījuma analīze ļāva izvēlēties optimālo turbulences modeli, robežnosacījumus un skaitļošanas šūnu lielumu. Īpaša uzmanība tika pievērsta pareizam robežslāņa aprakstam ap stieņiem. Tā gala versija satur 25 robežslāņus ar izplešanās koeficientu 1,05 un $y^+ \leq 1$ vai $y^+ \approx 50$ attiecīgi zemā un augstā Reinoldsa turbulences modeļiem.



3.1. att. Analizēto skaitļošanas domēnu konfigurāciju piemēri. Plūsmas virziens ir no kreisās puses uz labo. (A) ir augstā Reinoldsa turbulences modelis, kas satur 2,67 miljonus šūnu. (B) satur 2,2 miljonus šūnu, (C) satur 730 000 šūnu un (D) ar 476 000 šūnām, kas paredzēti zemā Reinoldsa modeļiem. (E) ir zemā Reinoldsa 3D modelis ar 1,7 miljoniem šūnu.

Zemā Reinoldsa turbulence modelis ļauj prognozēt nelielās plūsmas struktūras ap cilindriem, kā rezultātā palielinās hidrodinamiskā spēka paredzējumu precizitāte. Piemērs plūsmas atdalīšanai no stieņa ir parādīts 3.2. attēlā.



3.2. att. Plūsmas atraušanās no cilindra laikā.

Salīdzinot plūsmas ātruma sadalījumu spraugā starp diviem blakus esošiem cilindriem pie dažādiem ieejas ātrumiem, var secināt, ka ātruma profils visos gadījumos ir līdzīgs (skat. 3.3. att.), kas liecina, ka to ir iespējams aprakstīt ar analītisku funkciju. Tādējādi, lai pēc iespējas samazinātu aprēķiniem nepieciešamo laiku, iegūto profilu var uzdot kā ieejas parametru *CFD* simulācijām, kā arī izmantot iepriekš aprakstītos samazinātos domēnus (E) un (F). Tuvinātu plūsmas ātruma profilu spraugā var iegūt, lietojot izvirzījumu Furjē rindā līdz 6. loceklim (3.1. vienādojums). Jāatzīmē arī, ka plūsmas profils spraugā ir atkarīgs no laika.

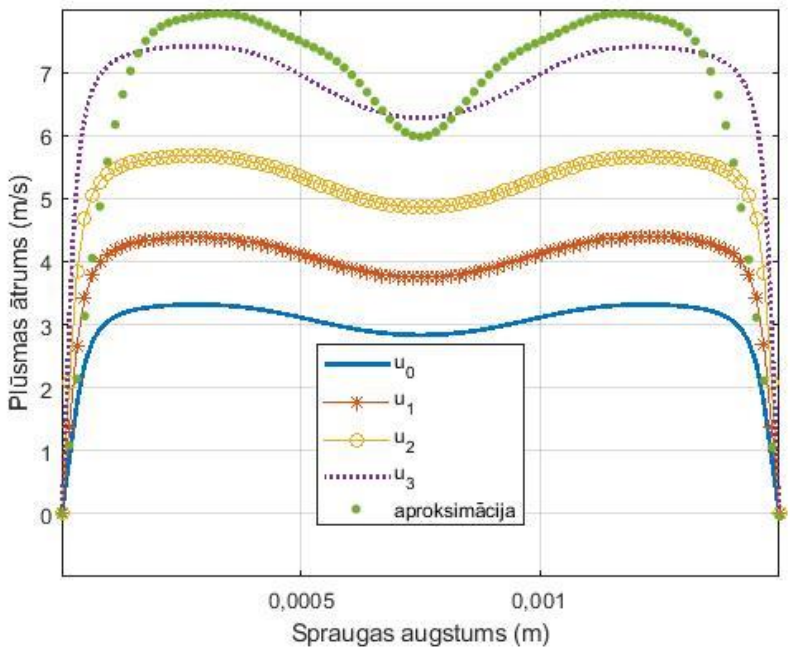
$$\hat{u}(y,t) = C_1\frac{4}{\pi}\sin(\omega y + \varphi(t)) + C_2\frac{4}{3\pi}\sin(3\omega y) + C_3\frac{4}{5\pi}\sin(5\omega y)$$
$$C_4\frac{4}{7\pi}\sin(7\omega y) + C_5\frac{4}{9\pi}\sin(9\omega y) + C_6\frac{4}{11\pi}\sin(11\omega y), \quad (3.1.)$$

kur ω ir leņķiskā frekvence, $C_i = c_i U_{\text{in}}$ un $\varphi(t) = A\sin(2\pi f_t t)$ ir laika atkarīgā komponente, kur A ir amplitūda un t ir laiks. A un f_t ir zināmi no laboratorijas eksperimentiem. c_i koeficienti tika atrasti, analizējot iegūtos profilus (skat. 3.3. att.). Reizinot c_i ar ieejas plūsmas ātrumu U_{in}, atbilstošās konstantes C_i var tikt noteiktas dažādiem ieejas ātrumiem, ja Reinoldsa skaitlis ir starp $11{,}0\cdot10^3$ un $53{,}0\cdot10^3$. Atrastie koeficienti ir apkopoti 3.1. tabulā.

3.1. tabula

Koeficienti ātruma profila noteikšanai, izmantojot izvirzījumu Furjē rindā

Koeficients	c_1	c_2	c_3, c_4	c_5, c_6
Vērtība	1,07	1,21	0,58	0,2



3.3. att. Plūsmas ātruma profilu piemēri spraugā pie četriem ieejas ātrumiem (u_0–u_3) un tuvinātās plūsmas profils ātrumam u_3.

Piemēru ātruma u_3 izvirzījumam rindā, var redzēt 3.3. attēlā ar zaļu punktētu līniju. Lai arī grafiki nedaudz atšķiras, integrālo lielumu atšķirības visos apskatītajos gadījumos ir 1 % robežās.

Skaitliskā modeļa validācija ar ieviestajiem robežnosacījumiem (3.1) ieplūdes ātrumam tika īstenota, salīdzinot skaitliskos rezultātus ar eksperimentālām spēka koeficienta vērtībām plūsmas virzienā $c_\mathrm{d} = 2F_x/\left(\rho U^2 S\right)$ un dominējošām frekvencēm. Iegūtie rezultāti ir apkopoti 3.2. tabulā, ieskaitot spēka koeficientus, ja *TR* atrodas otrajā (domēns (D)) un ceturtajā (domēns (C)) rindā. Kā redzams 3.2. tabulā, iegūtie *CFD* rezultāti labi atbilst eksperimentālajiem mērījumiem; atšķirība ir mazāka par 5 %. Augstā Reinoldsa turbulences modeļa validācija tika veikta, salīdzinot spiediena kritumu ūdens kanālā.

3.2. tabula

Skaitlisko modeļu validācija (zemā *Re* turbulences modeļi)

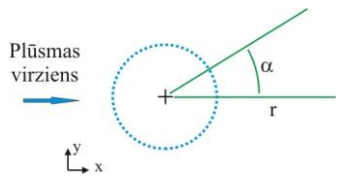
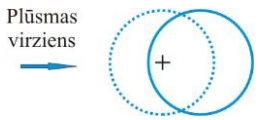
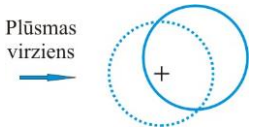
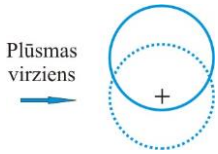
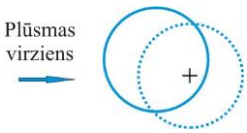
	f_n	f_t	c_d, 2. rinda	c_d, 4. rinda
Eksperiments	58,50	27,30	0,346	0,277
CFD, 2D	59,32	28,66	0,352	0,276
CFD, 3D	–	28,56	0,359	–

TR pozīcijas ietekme uz plūsmas radītajiem spēkiem vienības šūnā tika analizēta, pārvietojot *TR* par 5 % no *d* plūsmas virzienā un pagriežot to ap koordinātu sistēmas sākumpunktu. Ņemot vērā stieņa masīva simetriju, rotācijas leņķis ir no 0° līdz 180° ar soli 45°. Iegūtie spēka koeficienti c_d un $c_\mathrm{l} = 2F_y/(\rho U^2 A)$ pie dažādiem Reinoldsa skaitļiem apkopoti 3.3. tabulā. Skicēs parādīts shematisks *TR* modificēto pozīciju attēlojums, salīdzinot ar oriģinālu. *TR* sākotnējā pozīcija visos gadījumos ir attēlota kā zils punktēts aplis. Pozīcija P0 atbilst gadījumam, kad *TR* atrodas vienības šūnas centrā. P1 gadījumā (aplis ar nepārtrauktu līniju) *TR* tiek pārvietots plūsmas virzienā par 1,25–5 % no *d*. P2 pozīciju var iegūt, apgriežot P1 pa 45° ap vienības šūnas centru. Līdzīgā veidā var iegūt arī pārējos gadījumus.

Stieņu masīva simetrijas dēļ plūsmas radītais spēks F_y pozīcijā P0 ir nulle. Kopējais normalizētais spēks $\hat{F}$ satur tikai spēka komponenti plūsmas virzienā F_x. Līdzīgi, arī P1 un P5 pozīcijās kopējais plūsmas radītais spēks ir vienāds ar F_x. P1 un P5 pozīciju salīdzinājums ļauj novērtēt *TR* attāluma no iepriekšējā cilindra ietekmi uz spēku. Samazinot attālumu no iepriekšējā cilindra, samazinās arī spēks, kas uz to darbojas. Savukārt attāluma pieaugums izraisa spēka palielināšanos. Skaitliskā izpēte ir parādījusi, ka *TR* pozīcija plūsmas virzienā ir būtiska, lai precīzi prognozētu hidrodinamiskos spēkus. Spēka komponente F_y tiek novērota, kad vienības šūna kļūst nesimetriska (skat. novietojumus P2, P3 un P4). Nelielu lejupvērstu spēku var novērot P2, kad Reinoldsa skaitlis ir mazs vai vidējs. Kad plūsmas ātrums spraugā ir liels, F_y komponente kļūst pozitīva, kas atbilst eksperimentālajiem novērojumiem. Līdzīgu situāciju var redzēt arī P3 pozīcijā. P4 gadījumā novēro izteiktāku spēka komponenti šķērsvirzienā (F_y). 3.3. tabulas dati izskaidro un apstiprina eksperimentālo novērojumu, ka pie lieliem plūsmas ātrumiem stienis kustas galvenokārt virzienā, kas ir perpendikulārs plūsmai.

3.3. tabula

Cēlējspēka (*lift*) un pretestības (*drag*) koeficienti atkarībā no *TR* pozīcijas masīvā un plūsmas ātruma.

Pozīcija	*Re*	c_d	c_l	*TR* pozīcijas skice
P0	5600	0,006	0,0	
P0	11 000	0,019	0,0	
P0	17 000	0,039	0,0	
P0	53 000	0,268	0,0	
P0, 3D	53 000	0,293	0,0	
P1, r = 0.05d	5600	0,013	0,000	
P1, r = 0.05d	11 000	0,046	0,000	
P1, r = 0.05d	17 000	0,099	0,000	
P1, r = 0.0125d	53 000	0,352	0,012	
P1, r = 0.0184d	53 000	0,408	0,008	
P2, r = 0.05d, α = 45°	5600	0,010	–0,0008	
P2, r = 0.05d, α = 45°	11 000	0,035	–0,0017	
P2, r = 0.05d, α = 45°	17 000	0,075	–0,0027	
P2, r = 0.05d, α = 45°	53 000	0,601	0,0059	
P3, r = 0.05d, α = 90°	5600	0,006	–0,0007	
P3, r = 0.05d, α = 90°	11 000	0,021	–0,0013	
P3, r = 0.05d, α = 90°	17 000	0,043	–0,0016	
P3, r = 0.05d, α = 90°	53 000	0,305	0,0396	
P4, r = 0.05d, α = 135°	5600	0,005	0,0013	
P4, r = 0.05d, α = 135°	11 000	0,014	–0,005	
P4, r = 0.05d, α = 135°	17 000	0,028	–0,011	
P4, r = 0.05d, α = 135°	53 000	0,137	–0,0997	
P5, r = 0.05d, α = 180°	5600	0,005	0,0	
P5, r = 0.05d, α = 180°	11 000	0,014	0,0	
P5, r = 0.05d, α = 180°	17 000	0,026	0,0	

Matemātiski analizēto *TR* kustību, kas rodas šķērsplūsmas rezultātā, var aprakstīt kā masas-atsperes-slāpētāja sistēmu:

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{r}} + \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{r}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{r} = \boldsymbol{R}, \tag{3.2.}$$

kur $\boldsymbol{r}$ – vispārināto koordināšu vektors ($\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}} = [x; y]$);

$\boldsymbol{R}$ – vispārinātie spēki ($\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}} = [F_x; F_y]$);

punkts apzīmē atvasinājumu pēc laika.

Matricas ***M***, ***C*** un ***K*** satur attiecīgi *TR* masas, slāpēšanas un stinguma koeficientus. Ierosināšanas spēks ***R*** nav zināms, tāpēc *CFD* pieeju izmanto, lai kvantitatīvi noteiktu atbilstošās spēka vērtības, ņemot vērā gan šķidrumu, gan konstrukcijas ietekmi.

Plūsmas izraisītās *TR* svārstības tika modelētas, izmantojot iebūvētu sešu brīvības pakāpju risinātāju. Kustība *xy* plaknē bez rotācijas tika atļauta, lietojot augsto Reinoldsa turbulences modeli. Lai samazinātu skaitļošanas laiku zemā Reinoldsa turbulences modeļa gadījumā, *TR* sākotnējā pozīcija plūsmas virzienā tika mainīta saskaņā ar laboratorijas eksperimentu rezultātiem, pēc tam tika simulētas stieņa svārstības virzienā, kas ir perpendikulārs plūsmai.

4. Aproksimēšana

Ceturtajā nodaļā aprakstīta aproksimācijas modeļu izstrādes metodika sistēmas parametru ietekmes novērtēšanai, kā arī inversie modeļi, kas izstrādāti, izmantojot laboratorijas un skaitlisko eksperimentu rezultātus. Lai aprakstītu stieņa bojājumus, aproksimēšanai tika izvēlēti divi faktori: stieņa masa un stieņa iestiprināšanas stingums.

EDAOpt programmatūra [15], [21], kas ir izstrādāta RTU Mašīnu un mehānismu dinamikas zinātniskās pētniecības (MMDZP) laboratorijā, tika izmantota eksperimentu plānu un aproksimācijas modeļu izstrādei. Šajā promocijas darbā tika izmantoti *EDAOpt* gatavie *LH* eksperimentu plāni ar diviem vai trīs faktoriem. MMDZP laboratorijā izstrādātā atbildes virsmu metodoloģija no citām atšķiras ar to, ka *LH* tipa plāni tiek optimizēti, izmantojot vidējo kvadrātisko kļūdu (*Mean Square Error, MSE*). Tika izmantots arī profesora J. Auziņa izstrādātais 13 punktu ortogonālais plāns, kas ir daļa no jaunās eksperimentu plānu klases lietošanai ar ortonormāliem Ležandra polinomiem [14].

Lai noteiktu aproksimēto modeļa adekvātumu, tika izmantoti šādi kvalitātes rādītāji: relatīvā *leave-one-out* krosvalidācijas kļūda (4.1.) [22]; koriģētais determinācijas koeficients R^2 (4.2.).

$$\sigma_{\mathrm{cr}\%} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N}\sum(\hat{y}_{-i} - y_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum(y_i - \bar{y})^2}} \cdot 100\ \%; \tag{4.1.}$$

$$R^2 = 1 - \frac{N-1}{N-p-1}\,\frac{\sum(\hat{y}_{-i} - y_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}, \tag{4.2.}$$

kur $\hat{y}_{-i}$ – sagaidāmā aproksimācija, neņemot vērā izgūšanas punktu *i* (*i* =1, 2, …, *N*);

$\bar{y}$ – vidējā vērtība;

N – punktu skaits;

p – atbilstības (*fitting*) koeficientu skaits.

Lai novērtētu modeļa atbilstību (*goodness of fit*), tika izmantots Pīrsona hī kvadrāta (χ^2) kritērijs. Lai noteiktu, vai izlašu disperisijas ir statistiski nozīmīgi atšķirīgas, tika izmantota dispersijas analīze (*ANOVA*).

Izmantojot laboratorijas eksperimentālos datus, tika izstrādāts aproksimācijas modelis, kas spēj noteikt stieņu iestiprināšanas stinguma izmaiņas netiešā veidā. Tiešajam modelim ir divi faktori: plūsmas ātrums *Q* un elastīgās sijas stinguma koeficients *k*. Par atbildi tika izvēlēta frekvenču attiecība f_n/f_t, pamatojoties uz laboratorijas eksperimentu rezultātiem, kas liecina,

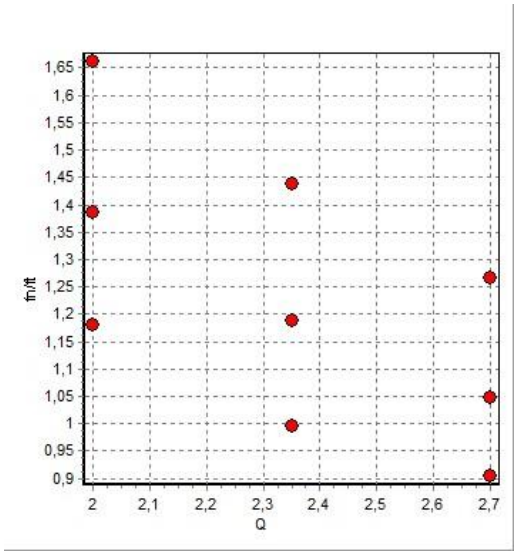
ka frekvenču attiecība ir parametrs, kas vislabāk atspoguļo masas, stinguma koeficienta un ģeometrijas izmaiņas. Izlases punktu noteikšanā tika izmantots centrālais kompozītais plāns (*CCD*) ar trīskāršu viduspunktu. *CCD* ir viena no klasiskajām pieejām fizikālajiem eksperimentiem [23], lai iegūtu otrās kārtas tuvinājumus. Aproksimēšanai tika izmantots otrās kārtas regresijas modelis, kas nodrošina 8,41 % relatīvo krosvalidācijas kļūdu un R^2 = 0,998. Pareto diagramma rāda, ka frekvenču attiecību ietekmē gan plūsmas ātrums, gan stinguma koeficients.

Inversajam aproksimācijas modelim ir divas ieejas: plūsmas ātrums Q un frekvenču attiecība f_n/f_t. Kā atbilde tika izmantots stinguma koeficients k. Inversā modeļa eksperimentālie punkti ir parādīti 4.1. attēlā. Kā tuvinājums tika lietots otrās kārtas atbildes virsmas modelis ar krosvalidācijas kļūdu 3,78 % un R^2 = 0,999. Modeļa adekvātumu apstiprina arī Pīrsona hī kvadrāta kritērijs.

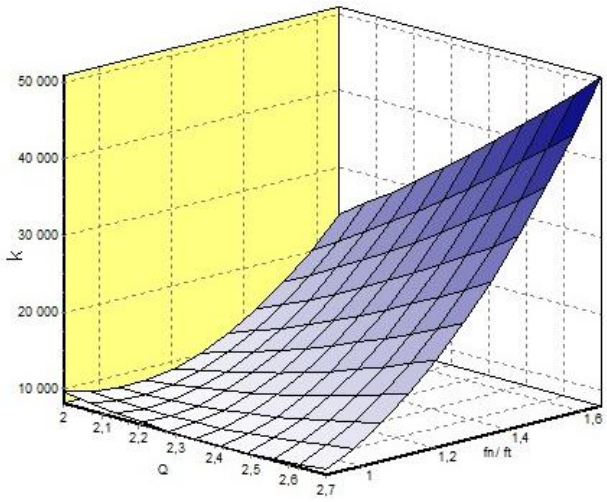
Inverso modeli stieņa iestiprināšanas stingumam kā plūsmas ātruma un frekvenču attiecības funkciju var definēt šādi:

$$k\left(Q,\frac{f_\mathrm{t}}{f_\mathrm{n}}\right) = -88\,736Q - 201\,528\frac{f_\mathrm{t}}{f_\mathrm{n}} + 8457Q^2 + 52\,780Q\frac{f_\mathrm{t}}{f_\mathrm{n}} + 44\,664\left(\frac{f_\mathrm{t}}{f_\mathrm{n}}\right)^2 + 203\,522. \tag{4.3.}$$

4.2. attēlā redzams aproksimācijas modelis stingumam (4.3.), kas iegūts ar *EDAOpt* programmatūru.



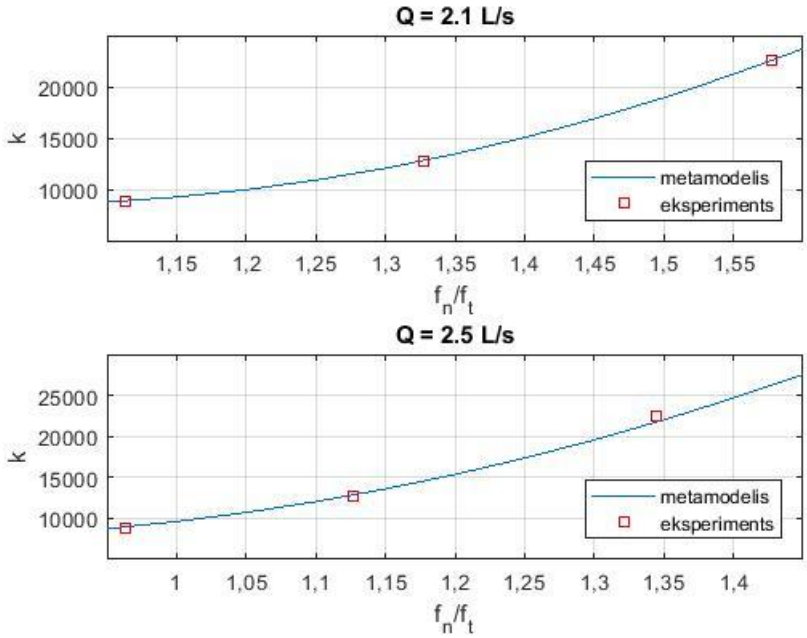
4.1. att. Eksperimentālie punkti stinguma inversajam modelim.



4.2. att. Aproksimācijas modelis stingumam k kā funkcijai no Q un f_n/f_t.

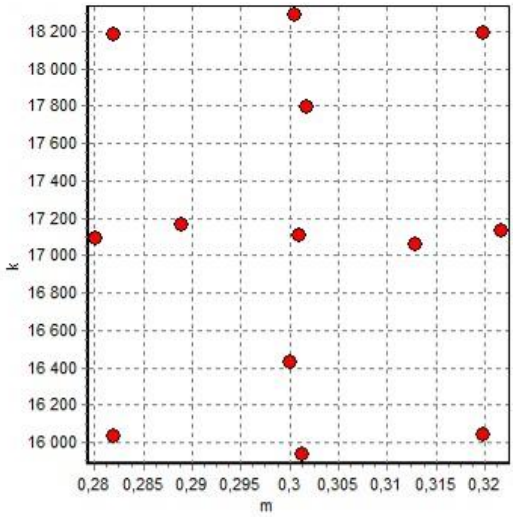
Inversā modeļa validācija tika īstenota, izvēloties divus nemainīgus plūsmas ātrumus un salīdzinot modeļa rezultātus ar laboratorijas eksperimentu vērtībām pie šiem plūsmas ātrumiem. Stinguma koeficienta grafiki kā frekvenču attiecības funkcija, izmantojot aproksimācijas modeli (4.3.) un datus no eksperimentiem, kad plūsmas ātrums ir 2,1 L/s un 2,5 L/s, parādīti 4.3. attēlā. Var redzēt, ka iegūtais modelis labi saskan ar laboratorijas

eksperimentiem. Maksimālā atšķirība starp eksperimentālajām un modeļa vērtībām ir mazāka par 3,4 %.

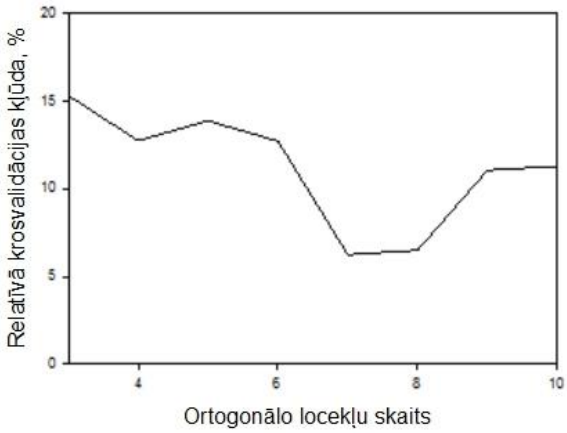


4.3. att. Inversā modeļa validācija ja *Q* ir 2,1 L/s un 2,5 L/s.

CFD simulācijas tika izmantotas, lai iegūtu metamodeli, kas netieši noteiktu stieņa masas izmaiņas. Lai iegūtu metamodeli ar masu un stingumu kā faktoriem un frekvenču attiecību f_n/f_t kā atbildi, tika izmantots 13 punktu ortogonālais plāns. Atšķirībā no klasiskajiem *CCD* plāniem šajā gadījumā visi plāna punkti ietilpst pētāmajā apgabalā (skat. 4.4. att.).



4.4. att. 13 punktu ortogonālais plāns.



4.5. att. Relatīvā krosvalidācijas kļūda atkarībā no aproksimācijas locekļu skaita, izmantojot Ležandra polinomus.

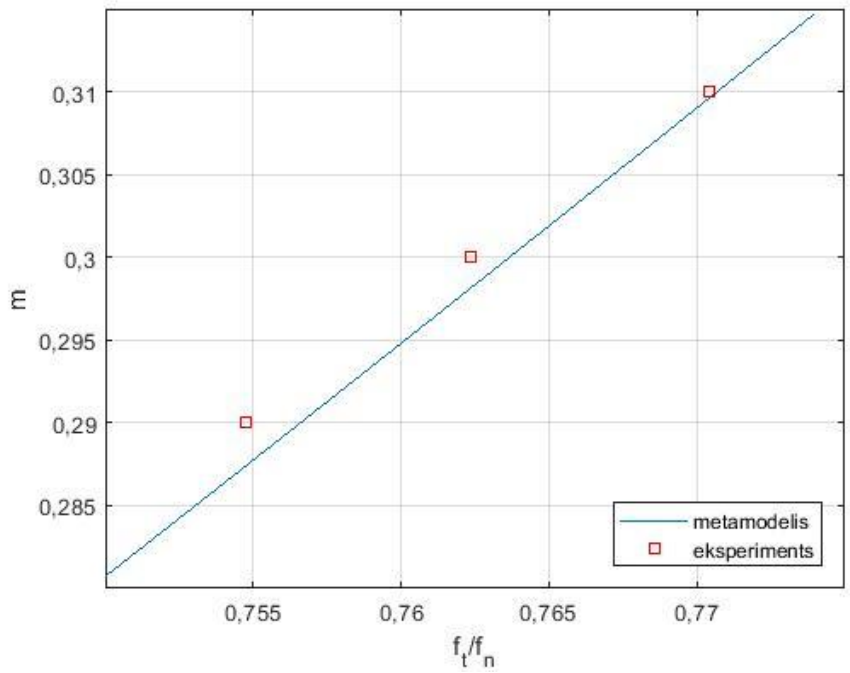
Sākotnējā *TR* atrašanās vieta plūsmas virzienā vispirms tika izmainīta saskaņā ar laboratorijas eksperimentu rezultātiem. Tad tika veikta simulācijas, kurās *TR* varēja pārvietoties tikai perpendikulāri plūsmai. Vislabākā aproksimācija, kas tika iegūta, izmantojot

trešās kārtas polinomu, bija ar šādiem kvalitātes rādītājiem: R^2 = 0,994 un relatīvo krosvalidācijas kļūdu 29,68 %. Eksperimenta plāns ir ortogonāls, tāpēc aproksimācijai var lietot Ležandra polinomus. Ortogonalitātes īpašība dod iespēju optimāli izvēlēties nozīmīgos locekļus aproksimācijas polinoma funkcijā [14]. Relatīvā krosvalidācijas kļūda atkarībā no polinoma locekļu skaita ir parādīta 4.5. attēlā, kur redzams, ka vismazāko kļūdu iegūst, izmantojot septiņu ļocekļu Ležandra polinomu.

Inversais metamodelis masas izmaiņu prognozēšanai tika izveidots, izmantojot f_n/f_t un k kā faktorus. No pārbaudītajiem variantiem vislabāko tuvinājumu varēja panākt, izmantojot otrās kārtas atbildes virsmu, iegūstot šādus kvalitātes rādītājus: 9,288 % krosvalidācijas kļūda un R^2 = 0,999. Pīrsona hī kvadrāta kritērijs parādīja, ka modelis ir adekvāts. Iegūtais modeļa vienādojums ir:

$$m\left(\frac{f_\mathrm{t}}{f_\mathrm{n}}, k\right) = -1.37116\frac{f_\mathrm{t}}{f_\mathrm{n}} - 5.35 \cdot 10^{-5}k + 0.709378\left(\frac{f_\mathrm{t}}{f_\mathrm{n}}\right)^2 + 9.7 \cdot 10^{-5}\frac{f_\mathrm{t}}{f_\mathrm{n}}k - 1.0 \cdot 10^{-10}k^2. \quad (4.4.)$$

Inversā modeļa verifikācija tika īstenota, izvēloties konkrētus punktus un salīdzinot modeļa rezultātus un skaitliskos eksperimentus šajos punktos. Salīdzināšanas grafiks ir parādīts 4.6. attēlā, kur var redzēt, ka iegūtais metamodelis spēj prognozēt analizētās modeļu sistēmas uzvedību ar augstu precizitāti, ja ievades koeficienta vērtības tiek mainītas 15 % robežās, starpība ir mazāka par 1 %.



4.6. att. Inversā metamodeļa verifikācija, ja k ir 17 600 N/m.

Veiktā analīze liecina, ka izstrādātajai aproksimācijas metodei un iegūtajām faktoru un atbilžu attiecībām ir laba atbilstība laboratorijas un skaitliskajiem eksperimentiem, tādēļ tā ir lietojama daudzstieņu dzesēšanas sistēmu monitoringā, kā arī šādu sistēmu projektēšanas procesā.

SECINĀJUMI

Šajā promocijas darbā tika pētīts, kā noteikt izmaiņas divos sistēmas parametros – stieņa masā un tā iestiprināšanas stingumā, analizējot ūdens šķērsplūsmas radīto vibrāciju spektru, ja pamatmehānismi, kas izraisa vibrācijas apskatītajā sistēmā pie dotajiem Reinoldsa skaitļiem, ir turbulence un plūsmas atraušanās no stieņiem. Ūdens dzesēšanas sistēmas dinamikas un drošuma analīzei tika izmantotas trīs metodes: laboratorijas eksperimenti; skaitliskās hidrodinamikas modelēšana; aproksimēšana. Apkopojot pētījuma rezultātus, var izdarīt vairākus secinājumus.

I. Iegūtie laboratorijas eksperimentu rezultāti rāda, ka stieņa pašfrekvences plūsmā un virpuļu atraušanās frekvenču attiecības atkarība no analizētajiem parametriem – stieņu masīva ģeometrijas, stieņa iestiprināšanas stinguma, stieņa masas un pozīcijas masīvā – ir detektējama frekvenču spektrā. Sistēmas parametru izmaiņu atspoguļojumu frekvenču domēnā var lietot agrīnai diagnostikai.

II. Rezultātu analīze liecina, ka stieņa pašfrekvences plūsmā un virpuļu atraušanās frekvences pārklāšanās reģionā pieaug ne tikai stieņa svārstību amplitūda, bet tiek novērotas arī svārstības ap stieņa viduspunktu. Aprakstītajā rezonanses reģionā rotācijas kustības kinētiskā enerģija var būt līdz piecām reizēm lielāka nekā translācijas kinētiskā enerģija.

III. Izmantojot modelēšanas rezultātus pie dažādiem plūsmas ātrumiem (reģionā pirms rezonanses), tika secināts, ka ieejas plūsmas ātruma profilu spraugā starp diviem blakus esošiem cilindriem var aproksimēt, izmantojot Furjē rindas izvirzījumu. Pamatojoties uz *CFD* rezultātiem, tika noteikti rindas koeficienti, kas ļauj iegūt tuvinātu plūsmas profilu jebkuram ieejas ātruma, ja Reinoldsa skaitlis ir starp $11{,}0 \cdot 10^3$ un $53{,}0 \cdot 10^3$. Robežnosacījumi ļāva samazināt skaitļošanas domēnu no 2,2 miljoniem līdz 730 000 vai 476 000 šūnu atkarībā no *TR* atrašanās vietas, tajā pat laikā saglabājot prognozēto frekvenču precizitāti 5 % robežās, salīdzinot ar laboratorijas eksperimentu datiem.

IV. Elastīgi iestiprināta cilindra pozīcijas vienības šūnā un uz to darbojošos spēku atkarības analīze rāda, ka stieņa novirze plūsmas virzienā ir būtiska, lai iegūtu atbilstošos spēkus, kas darbojas uz stieni. Līdz ar to pastāvīgā novirze plūsmas virzienā no šūnas centra jāņem vērā vibrāciju pētījumos, gadījumos, kad stieņa pārvietošanās tiek atļauta tikai plūsmai perpendikulārā virzienā.

V. Salīdzinot inversā modeļa, kas tika izstrādāts, lai iegūtu sakarību starp frekvenču attiecību (frekvence, ko rada turbulence, un stieņa pašfrekvence), plūsmas ātrumu un stinguma koeficientu, rezultātus ar laboratorijas eksperimentiem, var secināt, ka stieņa iestiprināšanas stingumu var tuvināti raksturot ar otrās kārtas polinomu ar 3,78 % krosvalidācijas kļūdu un R^2 = 0,999. Iegūtais modelis ir izmantojams gadījumos, kad galvenie sistēmas darbības traucējumi ir saistīti ar stieņu iestiprināšanas stinguma izmaiņām.

VI. Analizējot oscilējošās masas izmaiņu noteikšanas iespējas, izmantojot *CFD* simulāciju datus, tika konstatēts, ka kvalitatīvs tuvinājums iegūstams, lietojot inversu metamodeli, kas raksturo masu kā funkciju no stieņa iestiprināšanas stinguma un frekvenču attiecības. Otrās kārtas aproksimācijas modelis nodrošina R^2 = 0,999 un

9,288 % krosvalidācijas kļūdu. Aproksimācijas modelis ir izmantojams nenoteiktības mazināšanai, dzesēšanas sistēmu uzraudzībai un to bojājumu agrīnai atklāšanai, kas saistīti ar stieņu masas izmaiņām.

Turpmākā darba virzieni

I. Minimālo detektējamo masas un stinguma koeficienta izmaiņu novērtēšana, lai metodoloģija būtu izmantojama agrīnajai diagnostikai.
II. Izstrādātās metodoloģijas izmantošana problēmām, kas saistītas ar skaitliskās hidrodinamikas – diskrēto elementu metodes (*CFD-DEM*) lietojumiem, izmantojot ortogonālos eksperimentu plānus.

LITERATŪRAS SARAKSTS

[1] R. D. Blevins. *Flow-Induced Vibration*. Krieger Publishing Company, 2001.

[2] M.J. Pettigrew, L.N. Carlucci, C.E. Taylor, N.J. Fisher. Flow-induced vibration and related technologies in nuclear components. *Nuclear Engineering and Design*, 131(1): 81–100, October 1991.
URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/002954939190319D.

[3] Sobbia R., Dai Y., Jollet S., Wohlmuther M. 3D thermal-structural analyses of SINQ rod bundle target. *Proc. of 13th International Topical Meeting on the Nuclear Applications of Accelerators*, 306–315, 2017.

[4] R. Alvarez-Briceno, F. T. Kanizawa, G. Ribatski, Leopoldo P.R. de Oliveira. Validation of turbulence induced vibration design guidelines in a normal triangular tube bundle during two-phase crossflow. *Journal of Fluids and Structures*, 76:301–318, 2018. URL https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2017.10.013.

[5] H. Xu, M. Mallet, T. Liszkai. Turbulent buffeting of helical coil steam generator tubes. In *Proceedings of ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference*, page V004T04A075. ASME, 2014.

[6] D. S. Weaver, M. El-Kashlan. On the number of tube rows required to study cross-flow induced vibrations in tube banks. *Journal of Sound and Vibration*, 75(2): 265–273, 1981. https://doi.org/10.1016/0022-460X(81)90344-8.

[7] D. Tang, S. Bao, M. Xu, L. Luo, B. Lv, L. Yu, H. Cui. On the number of tubes required to study oscillating vortices and frequency spectrums of tube arrays in cross flow. *Annals of Nuclear Energy*, 124:198–210, 2019. URL https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.10.008.

[8] Proc. *ERCOFTAC Symposium on Unsteady Separation in Fluid-Structure Interaction*, 2013. ERCOFTA.

[9] V. Shinde, T. Marcel, Y. Hoarau, T. Delozeand G. Harran, F. Baj, J. Cardolacciaand, J.P. Magnaud, E. Longatte, M. Braza. Numerical simulation of the fluid–structure interaction in a tube array under cross flow at moderate and high Reynolds number. *Journal of Fluids and Structures*, 47:99–113, May 2014.
URL https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2014.02.013.

[10] T.A. Reddy. *Applied Data Analysis and Modeling for Energy Engineers and Scientists*. Springer, 2011.

[11] T.W. Simpson. *A Concept Exploration Method for Product Family Design*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, 1998.

[12] P. Audze, V. Eglajs. New approach for planning out of experiments. *Problems of Dynamics and Strengths*, 35:104–107, 1977.

[13] J.S. Park. Optimal latin-hypercube designs for computer experiments. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 39(1):95–111, 1994.
URL https://doi.org/10.1016/0378-3758(94)90115-5.

[14] J. Auziņš. High order orthogonal designs of experiments for metamodeling, identification and optimization of mechanical systems. *Proc. 11th World Congress on Computational Mechanics, 5th European Conference on Computational Mechanics, and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics*, 3190–3201, 2014.

[15] J. Auziņš, A. Januševskis. *Eksperimentu Plānošana un Analīze*. RTU Izdevniecība, 2007.

[16] G. E .P. Box, K.B. Wilson. On the experimental attainment of optimum conditions. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*, 13(1):1–45, 1951. URL https://www.jstor.org/stable/2983966?seq=1#page_scan_tab_contents.

[17] M. Ramu, R.V. Prabhu. Metamodel based analysis and its applications: a review. *Acta Technica Corvininesis – Bulletin of Engineering*, 6(3):25–34, 2013. URL http://acta.fih.upt.ro/pdf/2013-2/ACTA-2013-2-02.pdf.

[18] P. J. Roache. *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*. Hermosa Publishers, 1998.

[19] J. I. Madsen, W. Shyy, R.T. Haftka. Response surface techniques for diffuser shape optimization. *AIAA Journal*, 38(9):1512–1518, 2000. URL https://doi.org/10.2514/2.1160.

[20] R. Jin, W. Chen, T. W. Simpson. Comparative studies of metamodelling techniques under multiple modelling criteria. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 23(1):1–13, 2001. URL https://doi.org/10.1007/s00158-001-0160-4.

[21] J. Auzins, A. Janusevskis, J. Janusevskis, E. Skukis. Software EDAOpt for experimental design, analysis and multiobjective robust optimization. *Proc. of OPT-i International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization*, 101.–123. OPT-i, 2014.

[22] J. Auzins, A. Chate, R. Rikards, E. Skukis. Metamodeling and robust minimization approach for the identification of elastic properties of composites by vibration method. *Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik*, 95(10):1012-1026, 2015. URL: https://doi.org/10.1002/zamm.201500008.

[23] D. C. Montgomery. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, 2017.