

Deniss Mironovs

KONSTRUKCIJU STĀVOKĻA MONITORINGA SISTĒMAS IZSTRĀDE KONSTRUKCIJĀM EKSPLUATĀCIJAS APSTĀKĻOS

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvzinātnes fakultāte
Materiālu un konstrukciju institūts

Deniss Mironovs

Doktora studiju programmas “Būvniecība” doktorants

**KONSTRUKCIJU STĀVOKĻA MONITORINGA
SISTĒMAS IZSTRĀDE KONSTRUKCIJĀM
EKSPLOATĀCIJAS APSTĀKĻOS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

Dr. sc. ing.

ALEKSEJS MIRONOVS,

profesors *Dr. sc. ing.*

ANDRIS ČĀTE

RTU Izdevniecība

Rīga 2023

Mironovs, D. Konstruciju stāvokļa monitoringa sistēmas izstrāde konstrukcijām ekspluatācijas apstākļos. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2023. 55 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-6” 2023. gada 16. jūnija lēmumu, protokols Nr. 04030-9.6.2/4.

Vāka attēla autors – Deniss Mironovs

<https://doi.org/10.7250/9789934229763>

ISBN 978-9934-22-976-3 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2023. gada 3. novembrī plkst. 14.15 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē, Ķīpsalas ielā 6A, Rīga, 342. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asoc. prof. *Dr. sc. ing.* Līga Gaile
Rīgas Tehniskā universitāte

Asoc. prof. *Dr. sc. ing.* Andrzej Katunin
Silēzijas Tehnoloģiju universitāte, Polija

Asoc. prof. *Dr. sc. ing.* Mirosław Wesolowski
Košalinas Tehnoloģiju universitāte, Polija

APSTIPRINĀJUMS

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

Deniss Mironovs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 54 attēli, septiņas tabulas, kopā 113 lappuses. Literatūras sarakstā ir 123 nosaukumi.

SATURS

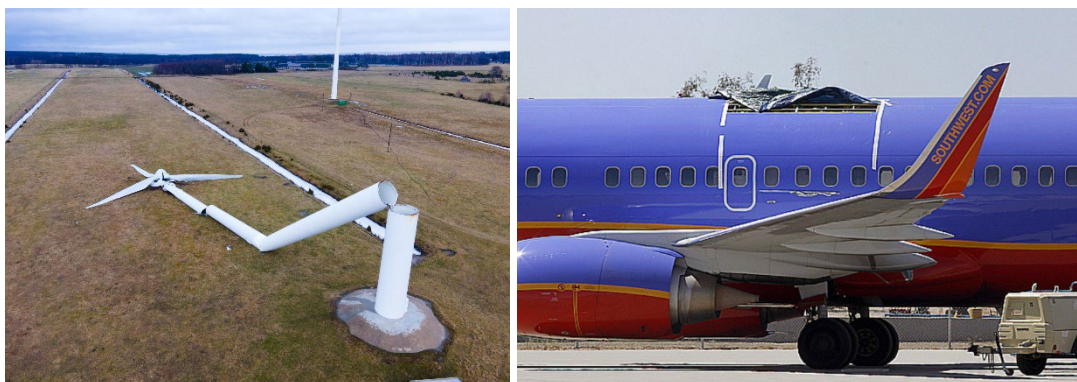
| | |
|---|----|
| SATURS..... | 4 |
| IEVADS | 5 |
| Motivācija un darbības joma | 5 |
| Darba mērķi | 6 |
| Darba uzdevumi..... | 6 |
| Zinātniskā novitāte | 7 |
| Praktiskā nozīme | 7 |
| Pētījuma metodoloģija..... | 7 |
| Piemērojamības ierobežojumi | 8 |
| Promocijas darba aizstāvēšanas argumenti | 8 |
| Darba struktūra | 9 |
| Publikācijas..... | 10 |
| Konferences..... | 11 |
| 1. KONSTRUKCIJAS STĀVOKĻA VIBRĀCIJAS MONITORINGA PAMATI | 13 |
| 1.1. Operacionālā modālā analīze | 13 |
| 1.2. Vibrācijas devēji..... | 16 |
| 1.3. Konstruktijas bojājumu identificēšana | 17 |
| 2. KONSTRUKCIJAS STĀVOKĻA MONITORINGA SISTĒMA | 17 |
| 2.1. Ar <i>SHM</i> saistītās problēmas | 17 |
| 2.2. <i>SHM</i> problēmu risinājumi | 18 |
| 2.3. <i>SHM</i> sistēmas izstrādes posmi | 19 |
| 2.4. Deformācijas sensoru izmantošana OMA..... | 21 |
| 2.5. Mērīšanas sistēma | 21 |
| 2.6. Periodisko komponentu slāpēšana | 23 |
| 2.7. Datu apstrāde un analīze | 24 |
| 3. BOJĀJUMU NOTEIKŠANAS UN NOVĒRTĒŠANAS ALGORITMI | 25 |
| 3.1. Modālā pase..... | 25 |
| 3.2. Modālo parametru izmaiņas | 28 |
| 3.3. Modālo lauku salīdzināšanas metode | 29 |
| 4. LIETOŠANAS PIEMĒRI | 31 |
| 4.1. Deformācijas sensoru izmantošana | 31 |
| 4.2. Periodisko komponentu slāpēšana | 34 |
| 4.3. Modālās pases pielietojums..... | 38 |
| 4.4. Vēja turbīnas laboratorijas modelis..... | 42 |
| 4.5. Alumīnija sijas..... | 44 |
| 4.6. Radara tornis | 46 |
| 5. SECINĀJUMI | 49 |
| ATSAUCES | 52 |

IEVADS

Motivācija un darbības joma

Konstrukcijas ir neatņemama inženierbūvju, aviācijas, enerģētikas un transporta daļa. Šajās tautsaimniecības jomās konstrukcijām ir jābūt uzticamām, drošām, funkcionālām un vienlaikus rentablām. Ražošanas un uzturēšanas izmaksu efektivitātes dēļ konstrukcijas var kļūt mazāk uzticamas, un tas savukārt rada nepieciešamību novērot konstrukciju stāvokli to ekspluatācijas laikā, t. i., veikt konstrukciju stāvokļa uzraudzību jeb monitoringu (angļu val. *Structural Health Monitoring – SHM*).

Plānotās konstrukciju pārbaudes var būt nepietiekamas, lai novērstu negadījumus. No 2009. līdz 2012. gadam tikai Ķīnā bija trīs lieli vēja turbīnu komponentu – vai nu lāpstiņu, vai torņa – bojājumi [1]. 2022. gadā avārija notika Igaunijā [2], kad spēcīga vēja apstākļos sabruka 60 m augsts vēja turbīnas tornis. Vēl viens nopietnas avārijas piemērs ir *Boeing 737* fizelāžas daļas plaisāšana un atvēršanās lidojuma laikā. Tas izraisīja strauju hermetizācijas līmeņa krišanos, bet par laimi lidmašīnai izdevās droši veikt nosēšanos Jumā, Arizonā, ASV [3].



1. att. Galvenie konstrukciju bojājumi. Attēlā pa kreisi: Sāremā, Igaunija, 2022. gads; attēlā pa labi: Juma, Arizona, 2011.

Lielākas vēja turbīnu lāpstiņas ir pakļautas lielākām mehāniskām slodzēm, izteiktākiem aerodinamiskiem efektiem, konstrukcijas nestabilitātei un sarežģītākiem bojājumu mehānismiem [4]. Tas savukārt padara lāpstiņas jutīgākas pret bojājumiem. Piemēram, vēja turbīnu lāpstiņu bojājumi veido 30 % no visiem bojājumiem, kas saistīti ar vēja turbīnām [5], savukārt lāpstiņu izgatavošanas izmaksas veido 15–20 % no visas vēja turbīnas izmaksām [6].

Nepieciešamība samazināt nevajadzīgu konstrukciju pārbaūžu skaitu, vienlaikus uzlabojot konstrukciju vispārējo uzticamību, liek domāt, ka ir nepieciešama pastāvīga vai vismaz bieža konstrukciju stāvokļa uzraudzība. *SHM* mērķis ir savlaicīgi atklāt bojājumus, kas ļauj optimāli plānot remontdarbus un nodrošina konstrukcijas drošību.

SHM tematika ir ļoti populāra zinātnieku un praktiķu vidū, un pēdējās desmitgadēs tā ir strauji attīstījusies. Līdztekus akadēmiskajiem pētījumiem šajā jomā tirgū ir diezgan daudz komerciālu *SHM* sistēmu, piemēram, vairākas sistēmas, ko ieviesa *HBM* [7] un *SGS* [8]. Šajās sistēmās konstrukcijas stāvoklis tiek novērtēts, izmantojot nesagraujošās pārbaudes metodes

(*NDT*). Esošās *NDT* metodes ir balstītas dažādu fizikālo parādību mērīšanā, piemēram, deformācija, materiālu elektriskā impedānce, konstrukciju nehomogenitātes akustiskā emisija, vibrācija. Vibrācijās balstītas konstrukciju novērtēšanas metodes [9] galvenokārt balstās modālajā analīzē [10] un jo īpaši operacionālajā modālajā analīzē (*OMA*) [11]. Kā tiek parādīts šajā darbā, *OMA* metodes ir ļoti daudzsoļas to lietojamības potenciāla dēļ. Dažos darbos parādīts, ka *OMA* balstītu *SHM* izmanto lielām statiskām inženierbūvēm, piemēram, ēkām [12] un tiltiem [13], [14].

Tikai nedaudzos pētījumos parādīts, ka *OMA* balstīts *SHM* tiek piemērots mazāka izmēra konstrukcijām (lāpstiņām, spārniem), kas ir kāda aparāta (gaisakuģa) daļa. Šie pētījumi lielākoties veikti laboratorijas vidē, izmantojot dārgu aparāturu [15], [16], kas nodrošina augstas kvalitātes zinātniskos rezultātus, bet var būt grūti vai pat neiespējami ieviest reālās konstrukcijās darba laikā. Stāvokļa uzraudzības sistēmu pētījumā [17] tika secināts, ka vēja turbīnu pamatu, torņa un lāpstiņu *SHM* sistēmas lielākoties tiek izmantotas tikai eksperimentālos un pētniecības gadījumos.

Kā jau minēts, pastāv nepārtraukts *SHM* statiskām civilajām konstrukcijām, bet kustīgām konstrukcijām, piemēram, vēja turbīnu lāpstiņām vai lidaparātiem, ir dažas būtiskas problēmas. Vēja turbīnas un lidaparāta dīkstāves izmaksas ir diezgan augstas, tāpēc *SHM* testēšanas nolūkā konstrukcijas ekspluatācijas pārtraukšana nav vēlama. Nepārtrauktu *SHM* ekspluatācijas laikā var īstenot tikai tad, ja uz konstrukcijas ir uzstādīta bojājumu noteikšanas sistēma.

Paredzams, ka šādas sistēmas pieejamība tiks panākta, izvēloties alternatīvus sensorus. Tradicionālo akselerometru vietā, kas izmaksu ziņā var būt visnozīmīgākā *SHM* sistēmas daļa, ja tiek ieviesti desmitiem vai pat simtiem sensoru, tiek piedāvāti pieejamāki pjezoplēves sensori. Pjezoplēves sensori, kam ir niecīgs svars, neliels izmērs un ļoti mazs biezums, ir izdevīgi izmantošanai aerodinamiskās detaļās.

Darba mērķi

Šī darba mērķis ir izstrādāt vibrācijā balstītu konstrukcijas stāvokļa diagnostikas sistēmas tehnoloģiju, kas nodrošinātu priekšnosacījumus izveidot pilnvērtīgu konstrukcijas monitoringa sistēmu testējamā objekta normālas darbības laikā to ekspluatācijas apstākļos. Tehnoloģija ietver svarīgus *SHM* sistēmas izstrādes posmus – sensoru tīklu, datu iegūšanu, datu uzglabāšanu un apstrādi, kā arī analīzi un bojājumu noteikšanu. Promocijas darbā demonstrēti *SHM* sistēmas prototipi, kas ir pieejami, uzticami un ērti lietojami.

Darba uzdevumi

Lai sasniegtu promocijas darba mērķus, formulēti vairāki uzdevumi.

1. Veikt zinātniskās literatūras apskatu *SHM*, *OMA*, vibrācijas sensoru, bojājumu noteikšanas algoritmu jomā. Īstenot esošos risinājumus, kas nav jāmaina.
2. Formulēt *SHM* sistēmas izstrādes un izmantošanas procesu.

3. Izstrādāt starposma bojājumu noteikšanas algoritmu, pamatojoties vibrācijas reakciju novērtēšanā bez modālo parametru novērtēšanas. Pārbaudīt šāda algoritma ticamību uz reālas konstrukcijas.
4. Formulēt pieeju, lai ņemtu vērā ekspluatācijas apstākļus, kas varētu ietekmēt bojājumu noteikšanas precizitāti.
5. Apstiprināt pjezoplēves sensoru kā alternatīvu akselerometriem OMA un pārbaudīt *SHM* sistēmu prototipu datu apstrādes metodes stāvokļa uzraudzībai.

Zinātniskā novitāte

Tēzes zinātniskā novitāte izriet no sekojošiem faktiem.

1. Pjezoplēves sensoru eksperimentāla izmantošana OMA vajadzībām. Iepriekšējos pētījumos nav sniegti piemēri, kā pjezoplēves sensorus izmantot operacionālās modālās analīzes vajadzībām. Pjezoplēves sensoru lietošana atšķiras no akselerometru lietošanas – cita uzstādīšanas metode un atšķirīga vibrācijas datu interpretācija. Salīdzinot ar akselerometriem, pjezoplēves nodrošina deformācijas ātruma mērīšanu. Lai gan tas nemaina konstrukcijas modālās īpašības, tas maina modālo formu vizuālo attēlojumu, kas ir jāņem vērā.
2. Divu jaunu bojājuma noteikšanas algoritmu izstrāde. Šie algoritmi atšķirīgi novērtē modālo parametru izmaiņas, salīdzinot ar esošajiem algoritmiem. Pirmais algoritms spēj salīdzināt konstrukcijas stāvokļus, neveicot modālo analīzi, kas ietaupa laiku datu analīzei. Otrs algoritms ir visaptverošs modālo parametru (frekvences un modeļu formas) izmaiņu analīzes rīks. Tas sniedz aplēses par to, kā mainās modālie parametri, salīdzinot ar iepriekš noteiktu etalonu.
3. **Modālās pases** koncepcijas ieviešana. Modālā pase ietver modālo parametru apstrādes metodes un datubāzi, ņemot vērā dažādu faktoru, piemēram, temperatūras un slodžu, ietekmes funkcijas.

Praktiskā nozīme

Šo darbu var izmantot kā vadlīnijas dažādu konstrukciju *SHM* sistēmu izstrādei. Turklāt piedāvāto *SHM* sistēmas prototipu var izmantot arī tieši konstrukcijās, lai gan jāpārlicinās, vai nav jāveic *SHM* sistēmas sertifikācijas darbi, īpaši aviācijas jomā. Sistēmai būtu nepieciešams inženieris, kas to darbinātu, reģistrētu datus, nolasītu ietekmes faktoru vērtības un pārbaudītu, vai bojājumu noteikšanas parametrs uzrāda bojājumu pazīmes. Ja tas uzrāda bojājuma pazīmes, tad tiek veikta padziļināta analīze, galvenokārt izmantojot potenciāli bojātās konstrukcijas modālās formas.

Pētījuma metodoloģija

Promocijas darbs balstās esošajās *SHM* tehnoloģijās, galvenokārt modālās analīzes un operacionālās modālās analīzes (OMA) testēšanas metodēs, izmantojot komerciālo aparatūru

un programmatūru. Šajā darbā izmantotās OMA metodes ietver uzlabotu frekvenču apgabala dekompozīciju (*enhanced frequency domain decomposition – EFDD*) un stohastisko apakštelpas identifikāciju (*stochastic subspace identification – SSI*).

Tiek izmantota jauna vibrācijas mērījumu pieeja, t. i., parasto akcelerometru vai tenzometru vietā tiek izmantoti pjezoplēves sensori.

Piemērojamības ierobežojumi

Plaši atzīts funkciju kopums, kas piemīt pilnībā izstrādātai *SHM* sistēmai, ietver spēju darboties bez pārtraukumiem, galvenokārt automātiski un autonomi, kā arī šādu sistēmu izturību pret dažādām mehāniskām un vides ietekmēm un ilgmūžību. Piedāvātais *SHM* sistēmas prototips nav pilnībā automātisks, un vēl nav veiktas tā izturības pārbaudes. Tomēr īsuma labad piedāvātais *SHM* sistēmas prototips šī promocijas darba kontekstā tiek saukts par *SHM* sistēmu.

Šis *SHM* sistēmas prototips attiecas tikai uz maza un vidēja mēroga konstrukcijām (0,5–20 m), jo citas konstrukcijas ar šo prototipu nav testētas. Mazākās konstrukcijas (< 0,5 m) nebūs pietiekamas, lai tajās ievietotu nepieciešamo sensoru daudzumu. Lielākām konstrukcijām vēl nav zināms, vai deformācijas sensori spēs pareizi reģistrēt liela mēroga deformācijas, lai sekmīgi identificētu zemākas kārtas modālās formas. Nav arī zināms, kā elektriskie signāli vados tiks pārraidīti starp sensoriem un datu iegūšanas sistēmu ievadiem lielos attālumos (> 20 m). Tā varētu būt problēma elektromagnētisko traucējumu un priekšpastiprināšanas trūkuma sensoros dēļ. Šo ierobežojumu varētu novērst turpmākajos pētījumos.

Vēl viens ierobežojums ir vairāk tehnisks – lai uzstādītu sistēmu, konstrukcijai jābūt aprīkotai ar sensoriem. Sarežģītu konstrukciju gadījumā uzstādīšanas process var aizņemt vairākas stundas vai pat dienas. Ja šis process tiek veikts uzreiz pēc ražošanas rūpnīcā, tad tā nav nopietna problēma. Tomēr ekspluatācijā esošām konstrukcijām, jo īpaši vēja turbīnu lāpstiņām un helikopteru lāpstiņām, tās būtu jāatvieno no mašīnas, jāuzstāda devēji telpās (lai pasargātu no vēja un lietus) un tad jāpiestiprina atpakaļ.

Piedāvātā *SHM* sistēma nav komerciāls produkts, un tai trūkst intuitīvas lietotāja saskarnes programmas “viss vienā” veidā.

Promocijas darba aizstāvēšanas argumenti

Šajā darbā parādīts, kā pat ar ierobežotiem finanšu resursiem ir iespējams izstrādāt *SHM* sistēmu un uzraudzīt lielu skaitu tipisku konstrukciju stāvokli. Nepieciešams lētu pjezoplēves sensoru komplekts, vadi, datu iegūšanas modulis, dators un programmatūra. Padziļinātai konstrukcijas stāvokļa analīzei būtu vajadzīga arī modālo parametru novērtēšanas programmatūra, piemēram, *ARTEMIS*.

Jaunizstrādātiem bojājumu noteikšanas algoritmiem ir dažādi mērķi un dažādas implementācijas. Piemēram, modālā lauka salīdzināšanas metodei nav nepieciešams izmantot komerciālu programmatūru, to var realizēt, izmantojot *Matlab*, *Octave* vai *Python* kodu. Modālo parametru variāciju noteikšanai ir nepieciešama modālo parametru novērtēšana, taču (un to var uzskatīt par priekšrocību) tā nodrošina bojājumu lokalizāciju.

Visi iepriekš minētais sniedz operatoriem noderīgu informāciju par konstrukcijas stāvokli, lai varētu optimāli plānot remontdarbus. Tas arī palielina konstrukciju drošību un uzticamību, kas palīdz samazināt izmaksas. *SHM* sistēma ir ieguldījums, kas laika gaitā atmaksājas.

Darba struktūra

Darbā ir vairākas daļas. Vispirms sniegts zinātniskās un komerciālās literatūras apskats, kurā aplūkotas tādas tēmas kā operacionālā modālā analīze, tostarp modālo parametru identificēšana, vibrācijas sensori, iestrādātie sensori, periodisko komponentu samazināšana un konstrukcijas bojājumu identificēšana.

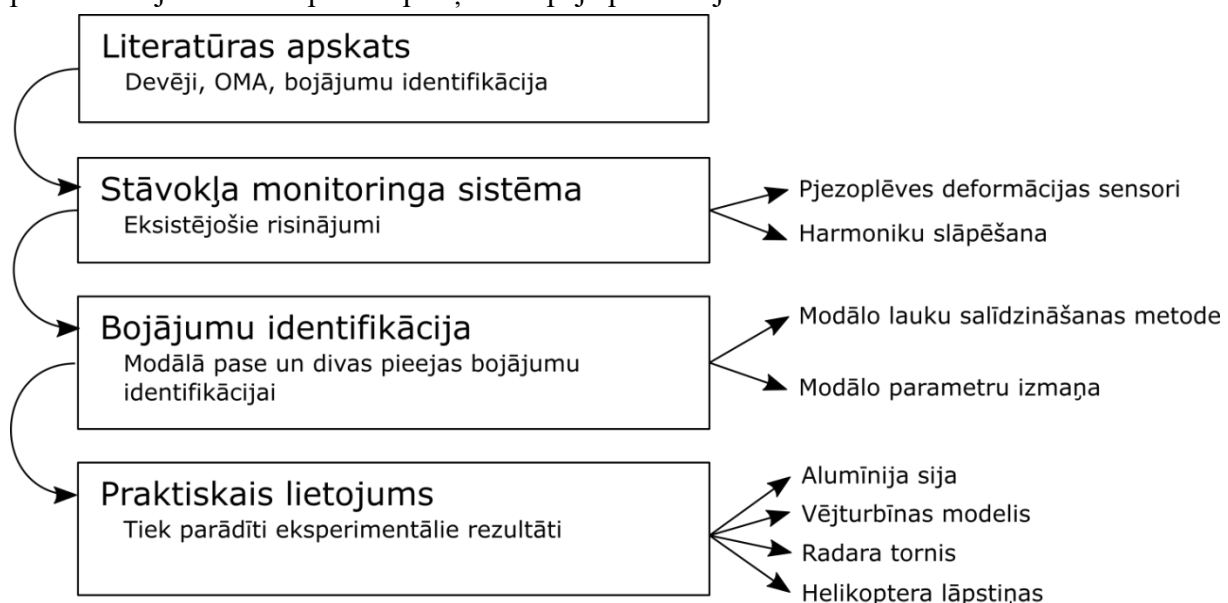
Tālāk promocijas darbā apskatīti *SHM* sistēmas izstrādes posmi, uzsverot tehnoloģisko jaunumu, piemēram, pjezoplēves sensoru izmantošanu. Tiek ieviests periodisko komponentu slāpēšanas algoritma formulējums.

Ieviests modālās pases jēdziens – sistēma modālo parametru novērtēšanai, veicot vairākus mērījumus dažādos ekspluatācijas apstākļos.

Pēc tam parādītas jaunizveidotās modālo parametru novērtēšanas metodes, aprakstot to matemātisko pamatojumu un lietojumu. Promocijas darbā izstrādātas divas metodes:

- modālo parametru variācija – metode, lai novērtētu bojājumu izraisītās modālo formu un frekvenču izmaiņas, salīdzinot rezultātus ar veseliem stāvokļiem; šī metode ļauj novērtēt bojājumu intensitāti, kā arī veikt bojājumu lokalizāciju;
- modālo lauku salīdzināšanas metode, saukta arī par singulāro vērtību (*singular values*) izmaiņu novērtēšanu, ir metode, kas ļauj noteikt konstrukcijas bojājumus bez iepriekšējas modālo parametru novērtēšanas, tādējādi ietaupot laiku un skaitļošanas jaudu.

Visbeidzot aplūkoti *SHM* tehnoloģijas lietojuma gadījumi, secinot gan problēmas un ierobežojumus, kas atklājās reālu eksperimentu laikā, gan veiksmīgus bojājumu noteikšanas piemērus sija un helikoptera lāpstiņās. Kopējā promocijas darba struktūra redzama 2. att.



2. att. Darba struktūra.

Publikācijas

1. Janeliukstis, R., Mironovs, D., Safonovs, A. Statistical Structural Integrity Control of Composite Structures Based on an Automatic Operational Modal Analysis – a Review, (2022), *Mechanics of Composite Materials*, Volume 58, Issue 2, Pages 181–208. DOI: 10.1007/s11029-022-10026-1 (indeksēts *Scopus*).
2. Mironovs, D., Ručevskis, S., Dzelzītis, K. Prospects of Structural Damage Identification Using Modal Analysis and Anomaly Detection, (2022) *Procedia Structural Integrity*, Volume 37, pages 410–416. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.01.103 (indeksēts *Scopus*).
3. Janeliukstis, R., Mironovs, D. Smart Composite Structures with Embedded Sensors for Load and Damage Monitoring – A Review, (2021) *Mechanics of Composite Materials*, Volume 57, Issue 2, Pages 131–152. DOI: 10.1007/s11029-021-09941-6 (indeksēts *Scopus*).
4. Solovyev, D., Dadunashvili, S., Mironov A., Doronkin, P., Mironov, D. Mathematical Modeling and Experimental Investigations of a Main Rotor Made from Layered Composite Materials, (2020) *Mechanics of Composite Materials*, 56 (1), pp. 103–110. DOI: 10.1007/s11029-020-09864-8 (indeksēts *Scopus*).
5. Mironov, A., Prikloński, A., Mironovs, D., Doronkin, P. Application of Deformation Sensors for Structural Health Monitoring of Transport Vehicles (2020) *Lecture Notes in Networks and Systems*, 117, pp. 162–175. DOI: 10.1007/978-3-030-44610-9_17 (indeksēts *Scopus*).
6. Mironovs, A., Mironovs, D. Dynamically Loaded Structures Modal Passport on the Example of Composite Blades. In: Proceedings of 13th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”, Lietuva, Viļņa, 2019. gada 16.–17. maijs. Vilnius: VGTU Press, 2019, pp. 1–8. DOI: 10.3846/mbmst.2019.091.
7. Mironovs, D., Mironovs, A., Čate, A. Harmonisko komponentu ekstrakcijas ietekme uz vibrējošo konstrukciju modālo parametru rezultātiem. In: Proceedings of 13th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”, Lietuva, Viļņa, 2019. gada 16.–17. maijs. Vilnius: VGTU Press, 2019, pp. 1–8. DOI: 10.3846/mbmst.2019.012.
8. Mironovs, D., Mironov, A. Vibration Based Signal Processing Algorithm for Modal Characteristics Change Assessment, (2018) *AIP Conference Proceedings*, 2029, art. nr. 020043, DOI: 10.1063/1.5066505 (indeksēts *Scopus*).
9. Mironov, A., Mironovs, D., Kabashkin, I. Advanced Structural Health Monitoring and Diagnostics of Transport, Industrial and Energy Facilities (2018) *Lecture Notes in Networks and Systems*, 36, pp. 159–171. DOI: 10.1007/978-3-3-319-74454-4_15 (indeksēts *Scopus*).

10. Mironovs D., Mironov, A., Chate, A. Pieteikuma lieta: (2018) *Engineering for Rural Development*, 17, pp. 1301–1307. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N106 (indeksēts *Scopus*).
11. Mironovs, A., Mironovs, D. OMA risinājumu eksperimentāla pielietošana rūpnieciskās struktūras modelim (2017) *IOP Conference Series: IOP Materials Science and Engineering*, 251 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/251/1/012092 (indeksēts *Scopus*).

Konferences

1. 4. starptautiskā konference par konstrukciju integritāti, ICSI 2021, Spānija, Funšala, Madeira, 2021. gada 30. augusts–2. septembris, tiešsaistē. “Prospects of Structural Damage Identification Using Modal Analysis and Anomaly Detection” referāta prezentācija un publikācija konferences materiālos.
2. 19. starptautiskā multikonference “Uzticamība un statistika transportā un komunikācijās” (RelStat-2019), Latvija, Rīga, 2019. gada 16.–19. oktobris. “Deformācijas sensoru pielietojums transporta līdzekļu konstrukcijas veselības uzraudzībai” referāta prezentācija un publicēšana grāmatas nodaļas veidā.
3. 13. starptautiskā konference “Mūsdienu celtniecības materiāli, konstrukcijas un tehnika”, Lietuva, Viļņa, 2019. gada 16.–17. maijs. “Harmonisko komponentu ekstrakcijas ietekme uz vibrējošo konstrukciju rezultējošajiem modālajiem parametriem” referāta prezentācija un publikācija konferences materiālos.
4. 14. starptautiskā konference “Mehatroniskās sistēmas un materiāli”, MSM 2018, Polija, Zakopane, 2018. gada 4.–6. jūnijs. “Vibration Based Signal Processing Algorithm for Modal Characteristics Change Assessment” referāta prezentācija un publikācija konferences materiālos.
5. 18. starptautiskā multikonference “Reliability and Statistics in Transportation and Communication” (RelStat-2018), Latvija, Rīga, 2018. gada 17.–20. oktobris. “Condition Monitoring of Helicopter Main Gearbox Planetary Stage” referāta prezentācija un publikācija konferences materiālos.
6. 17. starptautiskā zinātniskā konference “Inženierzinātnes lauku attīstībai”, Latvija, Jelgava, 2018. gada 23.–25. maijs. “Application Case: Prototype of Radar Tower Structural Health Monitoring System”, raksta prezentācija un publikācija konferences materiālos.
7. 17. starptautiskā multikonference “Reliability and Statistics in Transportation and Communication” (RelStat-2017), Latvija, Rīga, 2018. gada 18.–21. oktobris. “Advanced Structural Health Monitoring and Diagnostics of Transport, Industrial and Energy Facilities” referāta prezentācija un publikācija konferences materiālos.
8. 3. starptautiskā konference “Inovātivi materiāli, struktūras un tehnoloģijas” (IMST 2017), Latvija, Rīga, 2017. gada 27.–29. septembris. “OMA risinājumu

eksperimentāla pielietošana rūpnieciskās konstrukcijas modelī” referāta prezentācija un publikācija konferences materiālos.

9. Rīgas Tehniskā universitāte 61st Starptautiskā zinātniskā konference, 2020. gada 22. oktobris, Rīga, Latvija, Online. Aktuālā pētījuma prezentācija.
10. Rīgas Tehniskā universitāte 62nd Starptautiskā zinātniskā konference, 2021. gada 28. oktobris, Rīga, Latvija, Online.

1. KONSTRUKCIJAS STĀVOKĻA VIBRĀCIJAS MONITORINGA PAMATI

1.1. Operacionālā modālā analīze

Vibrācijās balstītu *SHM* metožu galvenā koncepcija ir tāda, ka bojājumu izraisītās konstrukcijas izmaiņas atspoguļojas konstrukcijas masas, stinguma un slāpēšanas izmaiņās. [10]. Jebkura konstrukcija ir dinamiska vairāku brīvības pakāpju sistēma, ko var aprakstīt ar pārvietojuma vienādojumu

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t), \quad (1.1)$$

kur M – masas matrica, kg;

C – slāpēšanas koeficienta matrica;

K – stinguma matrica;

$x(t)$ – atsaucis (reakcijas) vektors, $\dot{x}(t)$ un $\ddot{x}(t)$ ir atsaucis reakcijas pirmā un otrā laika atvasinājums;

$f(t)$ – pieliktā spēka vektors, N.

Atsaucis vektors parasti ir konstrukcijas punkta pārvietojums, tāpēc pirmais laika atvasinājums ir ātrums, savukārt otrais laika atvasinājums – paātrinājums. Frekvenču ω apgabalā pārvietojuma vienādojumu var parādīt kā

$$(-M\omega^2 + j\omega C + K)x(\omega) = f(\omega). \quad (1.2)$$

Sistēmas frekvenču raksturlīkne (*FRF*) ir definēta šādi:

$$H(\omega) = \frac{x(\omega)}{f(\omega)} = \frac{1}{(-M\omega^2 + j\omega C + K)}. \quad (1.3)$$

1.3. vienādojums parāda, kā konstrukcijas *FRF* ir atkarīga no masas, slāpēšanas un stinguma un kā var iegūt *FRF*, mērot pielikto spēku f un reģistrējot vibrācijas atsauci x . Izmantojot *FRF* no vairākiem konstrukcijas punktiem, ir iespējams novērtēt konstrukcijas modālos parametrus, izmantojot šādu vienādojumu:

$$H_{pq}(\omega) = \sum_{m=1}^M \frac{A_{pqm}}{j\omega - \lambda_m} + \frac{A_{pqm}^*}{j\omega - \lambda_m^*}, \quad (1.4)$$

kur p – indekss ieejas punktam, kurā tiek pielikts spēks;

q – indekss izejas punktam, kurā tiek mērīta atsauci;

m – modas indekss;

M – kopējais modu skaits;

λ_m – sistēmu pols modai m ;

A_{pqm} – atliekums (*residue*).

Unikālā gadījumā, kad $M = 1$, tā ir vienas brīvības pakāpes sistēma.

Sistēmu polos ir pašsvārstību frekvences f un slāpēšanas koeficienti ζ :

$$f_m = \frac{\text{Im}(\lambda_r)}{2\pi}, \quad \zeta_m = -\frac{\text{Re}(\lambda_r)}{|\lambda_r|}. \quad (1.5)$$

Sistēmu atlikums ietver informāciju par konstrukcijas vibrācijas modas formu ψ , kā arī mēroga faktoru Q – konkrētās modālās formas līdzdalības apjoms kopējā reakcijā, kas saistīts ar ierosmes spēka raksturu, un ir parādīts kā

$$A_{pqm} = Q_{pqm} \psi_{pqm} \psi_{pqm}^T. \quad (1.6)$$

Šajā promocijas darbā aplūkota izejas datu metode, ko sauc par operatīvo modālo analīzi. OMA laikā spēki netiek mērīti un tādējādi nav zināmi, tāpēc tiek pieņemts, ka spēki ir vienmērīgi sadalīti telpā pa visu konstrukciju un frekvenču apgabalu [18]. Dabiskajiem ierosmes spēkiem jābūt nejaušiem laikā un ar pietiekamu enerģiju, lai ierosinātu nepieciešamās modas. Šādas ierosmes piemēri ir vējš, lietus, zemestrīce, transporta plūsma utt.

OMA pieņēmuma pārkāpšana var izraisīt kļūdainu modālo parametru novērtēšanu. Piemēram, periodisku komponentu klātbūtne izmērītajā vibrācijas signālā, ko izraisa rotējošas detaļas, kas atrodas tuvu mērāmajai konstrukcijai. Šis darbs piedāvā izmantot sinhronās laika vidējošanas metodi [19] ar uzlabotu periodisku komponentu slāpēšanas/izvilkšanas funkciju.

OMA priekšrocības

- Testējamā konstrukcija var turpināt darbu, netraucējot objekta normālai ekspluatācijai.
- Nav nepieciešami nekādi ierosmes mehānismi, un tas ietaupa izmaksas un laiku.

OMA trūkumi

- OMA rezultāti ir atkarīgi no ierosmes un vides apstākļiem.
- Lai mērījumus varētu jēgpilni salīdzināt, ir nepieciešama modālo formu mērogošana.

Modālo parametru novērtēšana

OMA modālo parametru novērtēšanas metodes iedala divās kategorijās – laika un frekvenču apgabala metodes [20]. Metodes atšķiras pēc to matemātiskās sarežģītības, skaitļošanas efektivitātes un identifikācijas precizitātes. Frekvenču domēna metodes ir arī *Peak Picking (PP)*, frekvenču domēna dekompozīcija (*FDD*) un uzlabota frekvenču domēna dekompozīcija (*EFDD*). Laika domēna metožu piemēri ir divas stohastiskās apakštelpas identifikācijas (*SSI*) metodes – datu vadītā *SSI* un kovariāciju vadītā *SSI*.

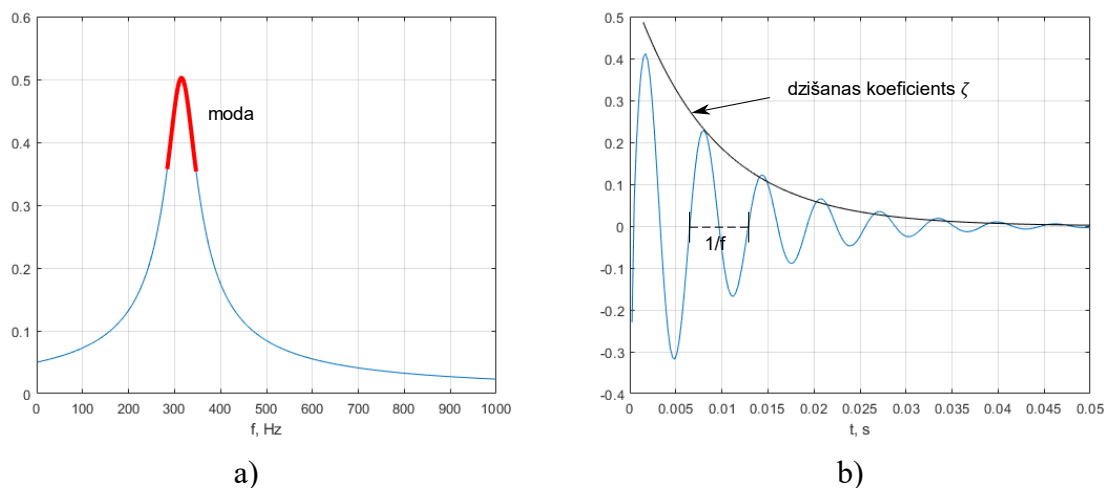
Frekvenču apgabala metodes lielā mērā balstās singulārajā vērtību dekompozīcijā (SVD), matricas faktorizāciju singulārajos vektoros un singulārajās vērtībās, kas ir proporcionālas sistēmu eigenvektoriem un eigenvērtībām. Jaudas spektra matricas SVD ir dots kā

$$G_{xx}(\omega) = U(\omega)S(\omega)U(\omega)^H, \quad (1.7)$$

kur U – singulārā vektora matrica;

S – singulāro vērtību diagonālā matrica;

U^H – konjugētā transpozīcija (Hermetiana (*Hermetian*) transpozīcija).

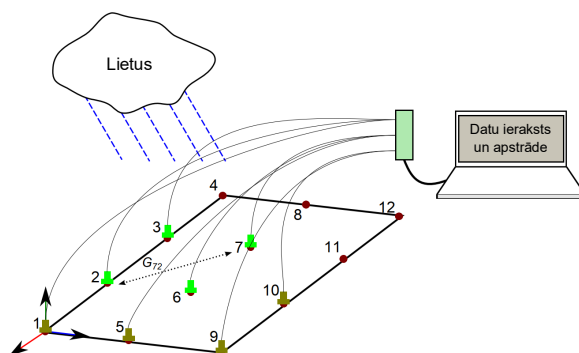


1.1. att. a) *SDOF* sistēmas SVD diagramma; b) SVD diagrammas apgrieztā *FFT*.

Paplašinātā *FDD* katru modu uzskata par *SDOF* sistēmas atspoguļojumu (1.1. att.). Singulārās vērtības $s(\omega)$, kas atbilst singulārajam vektoram $u(\omega_r)$, ir attiecīgās vienas brīvības pakāpes sistēmas automātiskā jaudas spektrālā blīvuma (*PSD*) funkcija. Šo *PSD* funkciju identificē ap maksimumu, salīdzinot modas formas novērtējumus $\hat{\psi}_r$ ar singulārajiem vektoriem, kas atbilst frekvenču līnijām apkārt maksimumam (sarkanais apgabals 1.1. a) att.). Singulārās vērtības veido auto-*PSD* funkciju, ja vien attiecīgajiem singulārajiem vektoriem ir augsta modālā nodrošinājuma kritērija (*MAC*, 1.3. nod.) vērtība ar $\hat{\psi}_r$. Kad auto *PSD* ir izveidots, to apstrādā, izmantojot apgriezto *FFT*, un iegūst laika impulsa atsaucis funkciju (1.1. b) att.), no kuras frekvence f_r tiek aprēķināta no nulles ass šķērsošanas laikiem, savukārt slāpēšanas koeficients ζ_r tiek novērtēts no eksponenciālās rimšanas līknes.

Sērijveidīgā OMA

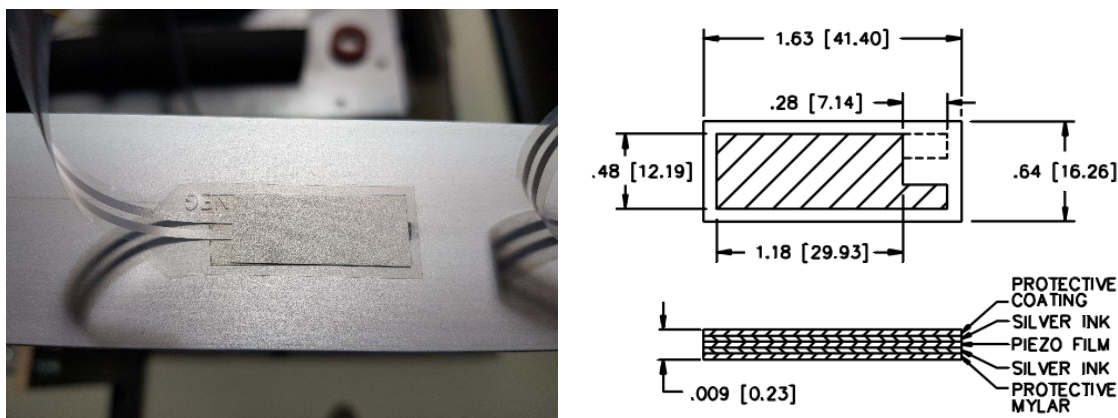
SHM sistēmas izmaksas ir iespējams ievērojami samazināt, ja izmanto sērijveidīgo OMA. Šajā OMA pieejā vibrāciju mēra konsekventi, pa sērijām, sadalot sensorus nelielās grupās. Tas ļauj samazināt nepieciešamo ieejas kanālu skaitu. Katrā grupā ir divu veidu kanāli: references kanāli, kas netiek pārvietoti, un kustīgie jeb pārvietojamie kanāli. Pēc tam, kad visas grupas ir izmērītas atsevišķi, signālu apstrādes algoritmi apvieno šīs grupas kopā, lai tālāk noteiktu modālos parametrus.



1.2. att. Sērijveidīgās OMA mērījumu shēma ar divām grupām; 2., 3., 6. un 7. sensors ir references sensors [21].

1.2. Vibrācijas devēji

OMA lietojumos parasti izmanto pjezoelektriskos vibrācijas sensorus, tostarp parastos akselerometrus. Šajā promocijas darbā ir ieviests cita veida pjezoelektriskais vibrācijas pārveidotājs kā devējs OMA lietojumam. Tas ir pjezoelektriskais plēves deformācijas sensors (1.3. att.), kas izgatavots no polarizēta puskrīstāliska fluorīda polimēra, ko sauc par polivinilidēnfluorīdu (PVDF). Plēves ir ļoti plānas (0,23 mm), un tās var pielīmēt pie testa virsmas ar parasto līmi vai abpusēju līmlenti.



1.3. att. Pjezoelektriskais PVDF plēves pārveidotājs vibrāciju mērījumiem [22].

PVDF materiāls ir daudzējādā ziņā pārāks par citiem sensoru veidiem. Tam ir:

- plašs frekvenču diapazons (no 10^{-3} līdz 10^9 Hz);
- liels dinamiskais diapazons (no $6,9 \cdot 10^{-4}$ līdz $6,9 \cdot 10^{10}$ Pa);
- augsta elastība (2–4 GPa, salīdzinot ar 43 GPa *PZT* sensoriem);
- zems blīvums (1780 kg/m^3 , salīdzinot ar 7500 kg/m^3 *PZT*);
- augsta dielektriskā izturība – var izturēt spēcīgus elektriskos laukus ($75 \text{ V}/\mu\text{m}$), kuros lielākā daļa pjezoelektrisko keramisko materiālu kļūst depolarizēti;
- augsta mehāniskā izturība un triecienizturība (no 10^9 Pa līdz 10^{10} Pa);
- augsta ķīmiskā stabilitāte – izturība pret mitrumu ($< 0,02$ % mitruma absorbcija), lielāko daļu ķīmisko vielu, oksidētājiem un intensīvu UV starojumu.

Pjezoplēves sensoros balstīti vibrācijas mērījumi ir rentabls *SHM* risinājums. Tie ir daudz lētāki (aptuveni 10–15 eiro par vienību) nekā akselerometri, kas rūpnieciskiem lietojumiem var izmaksāt simtiem eiro. [23]. Akselerometri parasti rada arī masas slodzi uz konstrukciju, un to izmērs nav niecīgs, tādējādi ietekmējot konstrukcijas modālās un aerodinamiskās īpašības.

Pjezoplēves sensoriem nav nepieciešamas balansēšanas ķēdes, kā, piemēram, Vītstona tiltiņš tenzometriem. Salīdzinot ar paātrinājuma mērījumiem, dinamiskās deformācijas mērījumi ir jutīgi pret nelieliem vietējiem bojājumiem [24], [25], [26].

Tomēr PVDF plēves sensoriem ir daži trūkumi, un viens no tiem ir jutība pret elektromagnētiskajiem traucējumiem. Šiem sensoriem ir ievērojama jutības izkliede, aptuveni 20 % [27], kas neļauj tieši salīdzināt dažādu konstrukciju modālās formas. Tomēr ir iespējams

salīdzināt modālās formas individuālai konstrukcijai, pieņemot, ka sensoru jutīgums laika gaitā būtiski nemainās.

1.3. Konstrukcijas bojājumu identificēšana

Visizplatītākais bojājumu jutīgo pazīmju kopums vibrācijā balstītā *SHM* ir modālie parametri – frekvence, slāpēšanas koeficients un modālā forma. Kvalitatīvai modālās formas noteikšanai nepieciešams blīvs sensoru tīkls, ko iespējams realizēt ar PVDF sensoriem.

Noderīgs rīks modālo formu salīdzināšanai, lai atklātu izmaiņas konstrukcijas stāvoklī, ir modālā nodrošinājuma kritērijs (*Modal Assurance Criterion, MAC*). To aprēķina šādi:

$$MAC(\{\phi_i\}, \{\phi_j\}) = \frac{|\{\phi_i^T\}\{\phi_j\}^*|^2}{(\{\phi_i^T\}\{\phi_i\})(\{\phi_j^T\}\{\phi_j\})}, \quad (1.8)$$

kur $\{\phi_i\}$ un $\{\phi_j\}$ ir dažādi modālās formas vektori [27]. Parasti *MAC* attēlo kā matricu, kurā vienas kopas modālās formas tiek salīdzinātas ar tādām pašām modālām formām no citas kopas. Korelācijas vērtības, kas tuvas vieniniekam, norāda, ka modālās formas ir līdzīgas.

Viens no šī darba uzdevumiem ir ieviest alternatīvu bojājumiem jutīgām raksturīpašībām, kas balstīta modalitātē un ļauj veikt gan ātru konstrukcijas stāvokļa analīzi (bez modālo parametru novērtēšanas), gan padziļinātu modālo parametru analīzi. Šīs pieejas ir izklāstītas tālāk tekstā.

2. KONSTRUKCIJAS STĀVOKĻA MONITORINGA SISTĒMA

2.1. Ar *SHM* saistītās problēmas

Ārējie faktori

OMA balstītas *SHM* sistēmas bojājumu noteikšanas pamatā ir konstrukcijas modālo īpašību izmaiņas. Taču modālās īpašības ietekmē ne tikai stinguma, masas vai slāpēšanas izmaiņas (iekšējie faktori), bet arī slodzes, temperatūra un citi ārējie faktori. Tas var radīt viltus pozitīvus trauksmes signālus, tādējādi pasliktinot *SHM* efektivitāti. Piemēram, mainoties vēja turbīnas rotācijas ātrumam, mainās arī lāpstiņas modālie parametri, jo rodas centrālās spēka starpība.

Prasība pēc kvalificēta personāla

Pēc mērījumiem un datu apstrādes jebkura OMA balstīta izmēģinājuma sistēma sniedz modālo parametru kopumu noteiktam modālam. Ja runa ir par konstrukcijām, kas ir sarežģītākas nekā vienkāršas konstrukcijas (sijas vai plāksnes), atklāto modu skaits var būt diezgan liels. Šādu modu analīzei un interpretācijai ir nepieciešams augsti kvalificēts un pieredzējis personāls. OMA balstītas sistēmas masveida lietošana ir sarežģīta, jo ir nepieciešama subjektīva rezultātu interpretācija.

Pastāv metodikas, kas ļauj kvantitatīvi novērtēt visas konstrukcijas integrālo modālo parametru un veselas konstrukcijas robežu noteikšanu, taču praktiskie lietojumi ir reti.

Sensoru izmaksas un izmērs

OMA parasti izmanto akselerometrus, kas ir izturīgi un precīzi. Tomēr tie ir diezgan dārgi (100–1000 USD), dažos lietojumos tiem nepieciešama vītņu fiksācija, to izmērs un svars (ieskaitot ekranētus koaksiālos kabeļus) var ietekmēt konstrukcijas modālās īpašības un iekārtas darbību, piemēram, traucējot lāpstiņas aerodinamikai. Cita veida sensoriem – deformācijas sensoriem – nav lielākās daļas no minētajiem ierobežojumiem – tie ir lēti, uzliekami uz konstrukcijas virsmas, ir vienkārši un viegli, kopā ar savienojuma vadiem tos var pārklāt ar aizsargslāni, veidojot neatņemamu elementu ar mērāmu konstrukciju. Var izmantot divu veidu deformācijas sensorus – tenzometrus un pjezoplēves sensorus. Tenzometri ir ļoti nodēriģi konstrukciju testēšanai laboratorijas apstākļos, bet tos ir grūti izmantot OMA vajadzībām. Šiem sensoriem nepieciešams tilta savienojums un balansēšana, tāpēc katram devējam nepieciešams viens īpašs kanāls īpašā datu ieguves sistēmā. Liels datu iegūšanas kanālu skaits palielina *SHM* sistēmas izmaksas. Akcelerometru un tenzometru izmantošana ierobežo *SHM* sistēmu izstrādi un lietojuma daudzveidību.

Visām minētajām problēmām ir kumulatīva ietekme, kas rada augstas *SHM* sistēmu ražošanas un lietošanas izmaksas, nemaz nerunājot par sensoru izmēru un svaru. *SHM* sistēmas augstās izmaksas mazina komerciālā sektora interesi un līdz ar to neļauj *SHM* sistēmas izmantot masveidā. Aerodinamiskiem lietojumiem izšķirošā nozīme ir arī sensoru izmēram un svaram.

2.2. *SHM* problēmu risinājumi

Promocijas darbā ir ierosināta vispārēja pieeja *SHM* sistēmas izstrādes procesam. Šo procesu var iedalīt vairākos uzdevumos.

1. Uzraugāmās konstrukcijas izvēle, tās izmēru un funkcionālo īpašību iegūšana.
2. Sensoru tīkla izvēle un piemērošana.
3. Veselā stāvokļa vibrāciju datu iegūšana, ieskaitot ietekmes faktorus, veselā stāvokļa datubāzes veidošana, kas iestrādāta **Modālajā pasē** (aplūkota tālāk tekstā).
4. Periodiska nezināma stāvokļa vibrācijas datu iegūšana konstrukciju dzīves cikla laikā (monitorings), jauniegūto datu salīdzināšana ar vesela stāvokļa datiem.

Iepriekš ir ieviests termins “Modālā pase”. Tas ir metodoloģisku, algoritmisku un programmatisku risinājumu komplekss, kas ietver tipisku monitoringa objekta konstrukcijas modālā apraksta metodi, galvenokārt iekšējo un ārējo faktoru ietekmes funkcijas uz konstrukcijas modālajām īpašībām. Vēl viena modālās pases iezīme ir universāla individuāla objekta monitoringa metode, izmantojot tipiskās modālās īpašības un ietekmes funkcijas, kas iekļauj:

- integrēta konstrukcijas stāvokļa novērtēšanu mērījumu rezultātā;
- konstrukcijas veselīga (references) stāvokļa robežu definīciju;
- bojājumu (defektu) noteikšanu.

Kā risinājums kvalificēta personāla prasībām, lai samazinātu SHM sistēmas datu apstrādes posmu sarežģītību, tiek ieviesta modālo lauku salīdzināšanas metode (3.3. apakšnodaļa). Šī metode apstrādā vibrācijas reakcijas, pamatojoties uz singulāro vērtību dekompozīciju bez modālo parametru novērtēšanas.

Risinājums sensoru augstajām izmaksām ir pjezoplēves deformācijas sensoru lietošana, kas detalizēti aprakstīta 1.2. apakšnodaļā. Šiem sensoriem nav to trūkumu, kas konstatēti akselerometriem un tenzometriem, un tos plaši izmanto rūpnieciskiem mērķiem, galvenokārt signalizācijai un citos drošības risinājumos. Tāpat kā tenzometri, arī pjezoplēves sensori ir lēti, viegli un integrējami konstrukcijā. Pjezoplēvēm nav nepieciešams tilta savienojums un balansēšana. Pašreizējos pētījumos izmantotā pjezoplēves sensora izmērs ir 16 x 45 mm, biezums – 28 μm, lai gan ir pieejami arī citi izmēri. Viena sensora svars ir mazāks par 0,1 g. Pjezoplēvju lietošana ļauj izmantot arī tādas pašas datu ieguves sistēmas (*DAQ*) kā akselerometriem. Pjezoplēves sensoru un *DAQ* var savienot, izmantojot multipleksēšanas pieeju, kas samazina ieejas kanālu skaitu un vēl vairāk samazina izmaksas. Multipleksēšanu panāk, izmantojot slēdžus vai savienotājus, lai savienotu sensoru signālus ar *DAQ* ievadi pa grupām, secīgi veicot mērījumus dažādās konstrukciju zonās (secīga OMA).

Minēto risinājumu ieviešana ļaus samazināt *SHM* sistēmas izmaksas un vienkāršot tās lietošanu.

2.3. *SHM* sistēmas izstrādes posmi

Piedāvātā *SHM* sistēmas tehnoloģija nodrošinātu dažādu konstrukciju tehniskā stāvokļa monitoringa sistēmas izstrādi, sērijveida ražošanu un lietošanu tipiskām iekārtām (objektiem), kas darbojas dažādos ekspluatācijas apstākļos.

SHM sistēma ir paredzēta, lai noteiktu bojājumus atsevišķā konstrukcijā, pamatojoties uz šādas konstrukcijas kopas mērījumiem. Bojājumu noteikšana konstrukcijā no novērojamo konstrukciju kopas šeit netiek veikta, jo agrīnie pētījumi parādīja, ka bojājumiem jutīgo parametru lielā izkliedes ietekme, ko rada masas, ģeometrijas, kā arī citu materiālu īpašību izmaiņas, ievērojami samazina *SHM* sistēmas uzticamību.

Lai veiksmīgi uzraudzītu konstrukcijas stāvokli, katrā konstrukcijā ir jābūt iebūvētai *SHM* sistēmai, kas nolasa vibrācijas datus un nosūta tos uz darbstaciju (datoru). Pēc tam operators veic operatīvo modālo analīzi (OMA), novērtējot katra konstrukcijas parauga modālos parametrus. Iegūtos modālos parametrus kopā ar reģistrētajiem ārējās ietekmes faktoriem, piemēram, statistiskajām slodzēm vai rotācijas ātrumu (lāpstiņas), operators ievada datubāzē. Šī datubāze nodrošina modālās pases metodes piemērošanu (3.1. apakšnodaļa), kurā tiek glabāti šo konstrukciju iepriekšējo mērījumu rezultāti. Šādā datubāzē tiek glabāti arī neskartas konstrukcijas standarta modālie parametri un šādām konstrukcijām raksturīgās ietekmes funkcijas. Vēlāk īpašs bojāto paraugu atpazīšanas algoritms analizē datubāzi un atpazīst mērījumus (datu paraugus), kas pie noteiktiem ārējiem faktoriem uzrādīja pietiekami atšķirīgus modālos parametrus, salīdzinot ar etalona parametriem. Šo posmu sauc par bojājumu identifikāciju. Tālāk operators varēs veikt padziļinātu konkrēta bojāta parauga modālo parametru analīzi, lai izlemtu par bojājuma nozīmīgumu, iespējams, būs nepieciešams lokalizēt

bojājumu, analizējot modālo formu. Tas ļauj turpmāk plānot darbības ar konkrēto konstrukciju – labot, nomainīt vai neveikt nekādas darbības, ja defekts nav būtisks.

Pamatojoties uz iepriekš minēto, *SHM* sistēmai var definēt divus komponentus.

- Mērīšanas sistēma, kas savukārt sastāv no:
 - sensoriem un kabeļiem uz konstrukcijas;
 - datu pārraides sistēmas uz datoru.
- Datu apstrādes un analīzes daļa ietver:
 - OMA programmatūru;
 - modālo pasi ar atsauces stāvokļa datiem un ietekmes funkcijām.

Tipisku konstrukciju modālās pases veidošana ietver vairākus posmus.

1. Izveidojiet konstrukcijas galīgo elementu (GE) modeli.
2. Aprēķiniet GE modeļa modālos parametrus, ņemot vērā reālos robežstāvokļus, slodzes, temperatūras režīmus un citus faktorus. GE aprēķinu rezultāti ir nepieciešami, lai optimizētu sensoru tīklu, izvēlētos testa iestatījumus un veiktu modālo identifikāciju.
3. Izveidojiet sensoru tīklu, pamatojoties uz GE modelēšanas rezultātiem. Pēc izvēles izmantot optimizācijas algoritmu sensoru izvietošanai [28].
4. Reālā struktūra tiks aprīkota ar izstrādāto sensoru tīklu.
5. Sagatavojiet mērīšanas sistēmu, ieskaitot kabeļus, savienotājus, datu iegūšanas ierīci ar datoru, slodzes, temperatūras un citu faktoru sensorus.
6. Veiciet konstrukcijas operatīvo modālo analīzi, reģistrējot iegūtos modālos parametrus un ārējo faktoru rādītājus vienā datubāzē (modālā pase). Ja iespējams, šie mērījumi jāveic kontrolētā vidē, pakāpeniski mainot ārējās ietekmes faktorus.
7. Iegūstiet datus par bojāto stāvokli, izmantojot modelēšanas pieeju. Bojājumu modelēšana ļauj paredzēt modālo parametru izmaiņas, kas saistītas ar iespējamiem bojājumiem nākotnē:
 - a) GE modelim jāatkārto nejaušu testa situācija un jāpārbauda, vai GE modelis un testa rezultāti ir līdzīgi. Ja rezultāti nesakrīt, GE modelī jāveic nepieciešamās korekcijas;
 - b) jāievieš GE modelī konstrukcijai raksturīgie bojājumi, jāveic aprēķini un jā saglabā iegūtais parametru kopums, tostarp modālie parametri un ārējie faktori.

Turpmākajā procesā operators ņem novērtētos modālos parametrus no jauniem tās pašas konstrukcijas vai citu tāda paša tipa konstrukciju mērījumiem un, izmantojot modālo pasi, veic konstrukcijas stāvokļa novērtēšanu. Mērījumu rezultātus salīdzina ar modālās pases datiem, izmantojot bojājumu noteikšanas algoritmu (modālo parametru izmaiņas) vai alternatīvi izmantojot neapstrādātus datus, izmantojot algoritmu, kas aprakstīts 3.3. apakšnodaļā. Novērtēšanas rezultāts parasti ir prognoze par to, vai konstrukcija ir vesela vai bojāta.

2.4. Deformācijas sensoru izmantošana OMA

Pieejamās OMA lietojumprogrammas, kas nosaka darbības objekta modālos parametrus, apstrādā paātrinājuma signālus, bet ne deformācijas. Kā zināms, paātrinājums ir pārvietojuma otrais atvasinājums. Lai izmantotu deformācijas sensoru datus, ir jāpamato sakarība starp pārvietojuma un deformācijas parametriem. Pjezoplēves sensori ir piestiprināti konstrukcijas virsmai, tāpēc izmērītais signāls ir konstrukcijas virsmas deformācija. Jebkura lieces sijas virsmas punkta pārvietojumu nosaka šīs sijas tā sauktās elastīgās vai neitrālās līnijas izliekums. Šis izliekums ir atkarīgs no virsmas slāņu gareniskās deformācijas. Attiecība starp sijas virsmas slāņa deformāciju un tās pārvietojumu ir šāda:

$$\varepsilon_s = y_s'' \cdot \frac{h}{2}, \quad (2.1)$$

kur h – sijas biezums;

$h/2$ – attālums no sijas neitrālās ass līdz virsmas slānim.

Šī sakarība ir piemērojama sijas statiskajai lieces deformācijai. Tomēr ar zināmiem pieņēmumiem šis vienādojums ir derīgs arī dinamiskajām deformācijām.

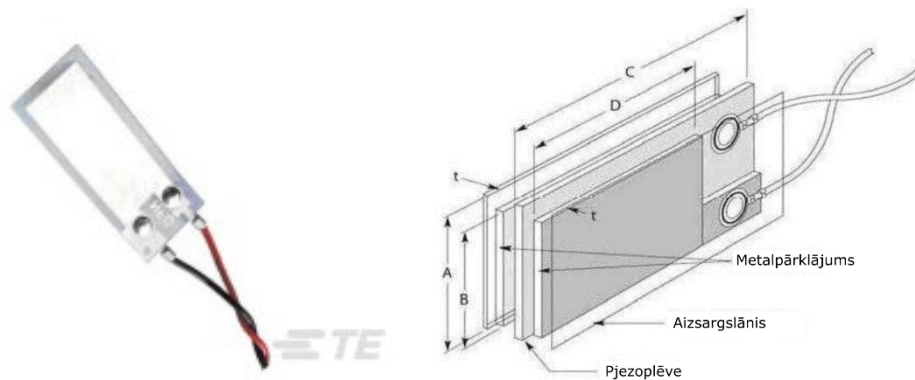
Lieces modas noteikšanai stiepes vai saspiešanas deformāciju, ko mēra uz svārstīgās sijas virsmas, nosaka pēc sijas neitrālās līnijas šķērsvirziena pārvietojumu sadalījuma funkcijas otrā atvasinājuma un attāluma no tās līdz virsmas slānim. Ja konstrukcijas biezums ir niecīgs, salīdzinot ar citiem izmēriem, tad deformācijas ir tieši proporcionālas pārvietojumu otrajam atvasinājumam.

Modālo parametru novērtēšanas rezultāts ir modālās formas, kas parāda nevis paātrinājumu (lai gan mērītais signāls ir paātrinājums), bet pārvietojumu. Tādējādi modālās formas, kas iegūtas, izmantojot deformācijas signālus no pjezoplēves sensoriem, būtu vienkārši 180° ārpus fāzes, salīdzinot ar pārvietojuma formām.

2.5. Mērīšanas sistēma

Mērīšanas sistēma ir daļa no *SHM* sistēmas, kas tiek atsevišķi un pastāvīgi uzstādīta uz pārbaudāmās konstrukcijas visā tās ekspluatācijas laikā. Mērīšanas sistēma sastāv no deformācijas devējiem, vadiem, savienotājiem un datu nolasīšanas ierīces kopā ar datoru un programmatūru.

Ierosinātajā *SHM* sistēmā izmantotais sensora veids ir polivinilidēnfluorīda (PVDF) sensors, kas sīkāk aprakstīts 1.2. apakšnodaļā. Šīs plēves ir elastīgas, vieglas un tām piemīt pjezoelektriskas īpašības. Pateicoties šīm īpašībām, plēves deformācija izraisa sprieguma izmaiņas. Pjezoelektriskā plēve atrodas starp diviem iespiestiem sudraba elektrodēm, veidojot kondensatoram līdzīgu struktūru. Šīs konstrukcijas dēļ sensors nespēj mērīt statiskas deformācijas, taču *SHM* tā nav problēma. Konkrētais sensors, kas redzams 2.1. att. ir 40 mm garš, 16 mm plats un tikai 28 μm biezs.



2.1. att. PVDF plēves deformācijas sensors no *TE* savienojamības [23].

Sensori tiek pielīmēti ar dubultās elastīgās līmlentes palīdzību (2.2. a) att.). Var izmantot arī cita veida līmi, ja vien pēc sacietēšanas tā ir elastīga. Līmlentes gabala izmēram jāsakrīt ar devēja virsmas izmēru, lai nodrošinātu pilnīgu saķeri ar konstrukcijas virsmu.

SHM sistēmā izmantotie vadi ir maza diametra (0,25 mm vai tuvu tam) emaljēti vara vadi (2.2. b) att.). Vadi ir pielīmēti devējiem, izmantojot īpašu divkomponentu epoksīda līmi. Vadi tiek piestiprināti pie konstrukcijas virsmas, izmantojot šauru abpusēji elastīgu līmlenti, un tiek pielodēti pie stieples rumba uz konstrukcijas robežas (2.4. att.).

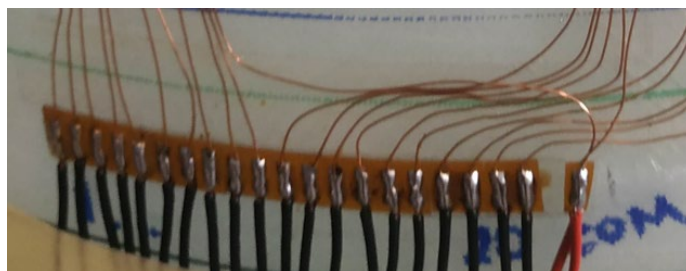
Pjezoplēves sensoram ir pozitīvs un negatīvs izejas spriegums. Pozitīvā izeja tiek uzskatīta par signāla izeju, negatīvā ir savienota ar zemi. Tādējādi visas negatīvās izejas ir savienotas. Kabeļa rumbu var realizēt arī kā kabeļa savienotāju, piemēram, *D-SUB* tipa.



2.2. att. a) Abpusēja līmlente; b) emaljēta vara stieple.



2.3. att. a) Pjezoplēves sensors ar pievienotiem vadiem; b) divkomponentu epoksīdsveķu līme.



2.4. att. Elektroinstalācijas mezgls pie konstrukcijas robežas.

DAQ ierīces galvenais uzdevums ir veikt deformācijas signālu analogo-digitālo (AD) pārveidošanu. Visbiežāk pirms AD pārveidošanas tiek veikts arī kondicionēšanas posms – signāla pastiprināšana un frekvenču filtrēšana. Kā *DAQ* ierīci var izmantot *Brüel & Kjær LAN-XI 3053* tipu vai līdzīga tipa *LAN-XI* moduli. Moduļu skaits ir atkarīgs no sensoru skaita. Piemēram, izmantojot četrus *3053* tipa moduļus, vienlaikus var mērīt 48 kanālus. *DAQ* sistēmas piedāvā arī citi ražotāji, piemēram, *National Instruments*, *Siemens* u. c.

2.6. Periodisko komponentu slāpēšana

Ir izstrādāts izmērīto datu pēcapstrādes rīks, lai pirms vibrācijas datu analīzes veiktu harmonisko frekvenču slāpēšanu vai izņemšanu.

Frekvenču apgabalā izmērīto signālu $X(\omega)$ nosaka sistēmas frekvences raksturlīkne $H(\omega)$ un sistēmu ietekmējošie spēki $F(\omega)$. Ideālā gadījumā OMA spēki ir vienmērīgi un nejauši, tāpēc to spektru var uzskatīt par vienības spektru. Ar periodisku ierosmi ir periodiska deterministiska komponente $D_n(\omega)$ ierosmes spēkos. Izmērītais signāls ir attēlots kā

$$X(\omega) = H(\omega)(F(\omega) + D_n(\omega)). \quad (2.2)$$

Pieņemot, ka ir daži eksperimentāli iegūti $D_{na}(\omega) \approx D_n(\omega)$. Iegūstot $D_{na}(\omega)$ no (3), tiek iegūts

$$X_p(\omega) \approx H(\omega)F(\omega) \quad (2.3)$$

un

$$x_p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X_p(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (2.4)$$

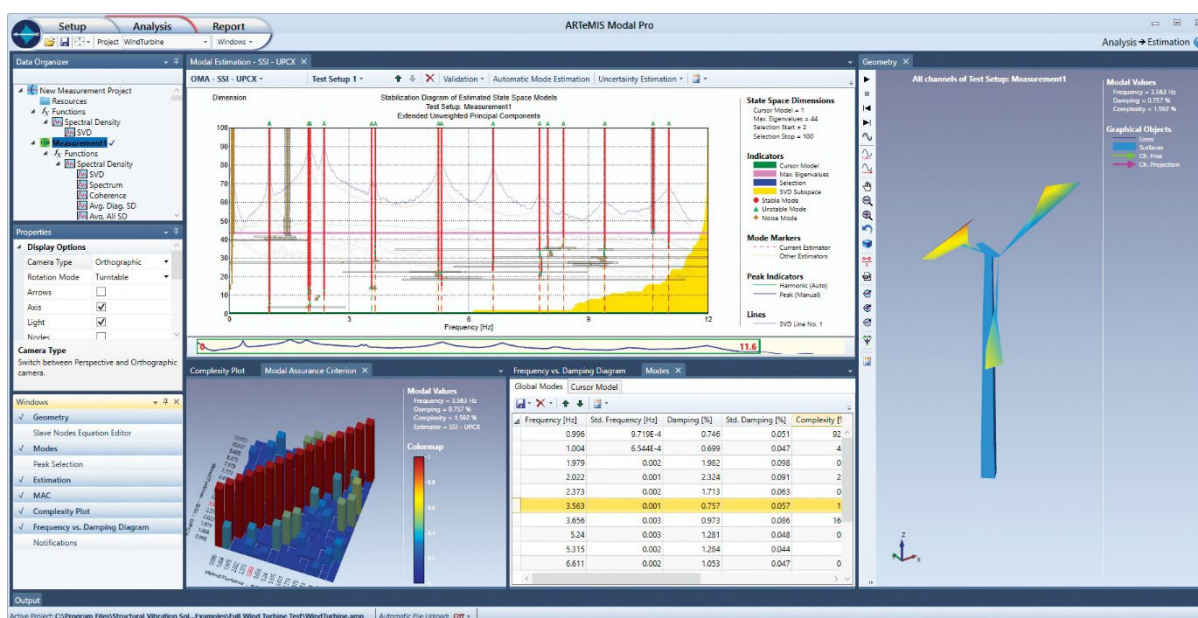
kur indekss p nozīmē “apstrādāts”. Jāņem vērā, ka $X_p(\omega) \neq X(\omega)$, jo struktūra reaģē uz piespiedu periodisku ierosmi, un šī reakcija paliek signālā. Tādējādi, ja atsaucas uz periodiskās komponentes izņemšanu, tas nozīmē minētās komponentes slāpēšanu ar pietiekamu efektivitāti.

2.7. Datu apstrāde un analīze

Kā jau iepriekš minēts, *SHM* sistēmas dzīves ciklu virknei konstrukciju var iedalīt divās daļās:

- modālās pases veidošana;
- uzraudzība.

Modālās pases izveide nozīmē izveidot tipiskas konstrukcijas modālo pasi – stabilu modālo parametru kopumu dažādiem ekspluatācijas apstākļiem. Monitorings paredz regulāru OMA veikšanu atsevišķām konstrukcijām un iegūto modālo parametru salīdzināšanu ar modālās pases vērtībām, lai novērtētu bojājumus. Reģistrētās vibrācijas reakcijas apstrādā, izmantojot OMA paredzētu programmatūru, piemēram, *ARTEMIS (Structural Vibration Solutions)*. Apstrāde ietver modālo parametru novērtēšanas metožu izvēli, piemēram, *EFDD* vai *SSI* metodes.



2.5. att. *ARTEMIS Modal* programmatūras ekrānšāviņš.

Rezultātā inženieris iegūst atpazītās modālās frekvences un formas. Šie modālie parametri tiek eksportēti teksta failā kā matrica. Frekvences tiek ierakstītas kā atsevišķas vērtības, formas tiek ierakstītas kā vektori ar izliekuma/deformācijas vērtībām katrā pārveidotāja pozīcijā.

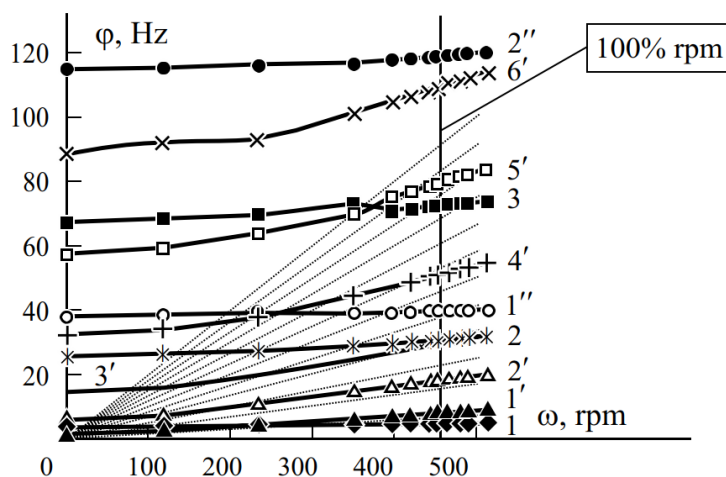
3. BOJĀJUMU NOTEIKŠANAS UN NOVĒRTĒŠANAS ALGORITMI

Šajā nodaļā izklāstīts *SHM* sistēmas prototipa bojājumu noteikšanas un novērtēšanas algoritmu teorētiskais un matemātiskais pamats. Apraksts sākas ar **modālas pases** arhitektūru un īstenošanas posmiem. Tālāk parādīts modālo parametru izmaiņu novērtējums. Tā ir novērtēšanas metode, kas ļauj uzskatāmi un ērti salīdzināt dažādu mērījumu modālo parametru (frekvenču un formu kopā un atsevišķi) kombināciju, palīdzot inženieriem analizēt konstrukcijas stāvokli. Noslēgumā ir parādīta tā sauktā modālo lauku salīdzināšanas metode, ar ko novērtē konstrukcijas stāvokli bez modālo parametru novērtēšanas metodēm.

3.1. Modālā pase

Modālā pase (MP) ir mērījumu tehnikas, modālo datu glabāšanas un apstrādes metožu apvienojums, lai veiktu konstrukcijas veselības uzraudzību. MP tiek apsvērta piemērošana virknei viena tipa konstrukciju, piemēram, vēja turbīnu lāpstiņām vai torņiem.

Lai izveidotu **tipisku modālo pasi**, tiek atlasītas modas, kas ir raksturīgas virknei viena tipa konstrukciju. Tipiskās modālās pases aprakstā ir iekļautas modālo parametru matricas: dažādu darbības faktoru frekvence, slāpēšana un forma. Minētās modālo parametru vērtības ir sagaidāmie modālo parametru vidējie lielumi (t. i., vidējās vērtības) viena tipa konstrukcijām. Papildus vidējām vērtībām tipiskā modālā pasē ir arī ticamības intervāli, kas parāda modālo parametru dispersiju ap vidējo vērtību.



3.1. att. Dažādas modālās frekvences kā rotācijas ātruma (apgriezienu minūtē, apgr./min.) funkcija kompozītam helikoptera lāpstiņām. Skaitļi pie līknēm apzīmē modas tipu: 1–3 – lieces rotācijas plaknē; 1'–6' – lieces vilces plaknē; 1'' un 2'' – griezes garenasī. [29].

Ekspluatācijas faktori, piemēram, slodze, rotācijas ātrums rotējošām konstrukcijām, piemēram, lāpstiņām, vai temperatūra, ietekmē modālos parametrus. MP atkarību no ekspluatācijas faktoriem sauc par ietekmes funkcijām. Šādu funkciju piemērs redzams

3.1. attēlā kā modālās frekvences funkcija izvēlētām modām atkarībā no helikoptera lāpstiņas rotācijas ātruma, izteikta apgriezīenos minūtē.

Tipiskā modālā pase kalpo kā paraugs noteiktas struktūras **individuālai modālajai pasei**.

Modālā pase tiek veidota manuāli *MS Excel programmā* vai daļēji automātiski *Matlab programmā*, taču to var veikt arī jebkurā citā datu apstrādes programmatūrā.

Tipiska modālās pases veidošana

Modālās pases izmantošana balstās darbības struktūras modālo parametru izmaiņu novērtēšanā kā pazīmē, kas liecina par šī parauga stāvokļa izmaiņām. Praksē masas izmaiņas var attiecināt uz piestiprinātu (vai atdalītu) elementu uz konstrukcijas korpusa, slāpēšanas izmaiņas – uz robežstāvokļa izmaiņām, savukārt stinguma izmaiņas – galvenokārt defektu, piemēram, plaisu, dēļ. Šīs izmaiņas ietekmē konstrukcijas izmērītā vibrācijas signāla *FRF*, un tā rezultātā mainās modālie parametri.

Modām jābūt stabilām un atbilstošām attiecīgajai struktūrai, lai atpazītu stāvokļa izmaiņas. Par stabilām modām (modālās pases kontekstā) tiek uzskatītas atkārtojamas līdzīgas formas modas starp dažādiem mērījumiem un/vai paraugiem. Stabīlas modas ir arī izturīgākas pret nelielām ekspluatācijas apstākļu izmaiņām. Pastāv trīs kritēriji (pārbaudīti praktiskos testos), kas liecina par stabilām modām.

1. Līdzīgas modas formas un frekvences atkārtotānos vismaz trīs reizes no piecām aplēsēm par *T* testu. Testu jāveic vismaz trīs reizes, taču ieteicams veikt piecus vai vairāk testus.
2. Ierobežota frekvences novirze. Pieņemama frekvences novirze parasti ir dažu procentu robežās.
3. *MAC* vērtība (1.8. vienādojums 1.3. apakšnodaļā) starp stabilām modālām formām vismaz 0,9, bet mazāka par 1.

Tipiskas modālās pases izveides darbību secība:

1. solis

Struktūras *OMA*, kas atrodas *s* valstī. Sākotnējais stāvoklis tipiskai pasei paredz, ka struktūrai jābūt nebojātai (veselai).

2. solis

Iegūto datu apstrāde, izmantojot piecas modālo parametru novērtēšanas metodes (*EFDD*, *CVA*, *UPC*, *PC*, *UPCX*, turpmāk tekstā – estimatori). Relatīvi stabīlu modu atlase, kas novērtētas ar vismaz trīs estimatoriem. Dažādu estimatoru modālām formām ir atšķirīgs mērogs. Lai tās saskaņotu kopējā $(-1,0... 1,0)$ mēro, katrs *m* modas formas vektora ψ_m^n elements *n* tiek normalizēts pie visu *N* elementu kvadrātu summas kvadrātsaknes vērtības. Šo soli dabiski sauc par **normalizāciju**.

3. solis

Stabīlas modas atlase no relatīvi stabīlām modām, izmantojot iepriekš minētos kritērijus – ierobežotu frekvences novirzi un $0,9 \leq MAC < 1$. Katru šādu modu attēlo $2N + 4$ datu vektors:

- forma un tās standartnovirze ($2N$ elementi);
- biežums un tā standartnovirze (2 elementi);
- amortizācijas koeficients un tā standartnovirze (2 elementi).

N būtībā ir vienāds ar sensoru skaitu uz konstrukcijas, jo formu atveido tik daudz DOF , cik ir sensoru.

Šādā veidā $M \times (2N + 4)$ no testu kopuma tiek izveidota matrica, kur M ir stabilo modu skaits. 1.–3. punktā minētos soļus atkārto katram T testam. Protams, katram testam iegūto modu skaits var atšķirties. Bet, izmantojot trīs iepriekš minētos kritērijus, tiek veikta modu atlase un tiek iegūts pilns stabilo modu kopums. K tiek iegūts T veiktajiem testiem. Šādā veidā tiek iegūts $T \times M \times (2N + 4)$ un tiek iegūta matrica.

4. solis

Dažādas aplēses var atspoguļot vienu un to pašu modālo formu pretējās fāzēs, tāpēc tiek veikta **fāžu izlīdzināšana**. Fāžu izlīdzināšanai izmantojamo modu atlasī veic, izmantojot korelācijas funkciju.

5. solis

Modālā **uzlabošana** – modālo parametru vidējās vērtības un dispersijas aprēķināšana:

- frekvence \bar{f}_m un δf_m ;
- slāpēšana $\bar{\zeta}_m$ un $\delta \bar{\zeta}_m$;
- modālā forma $\bar{\psi}_m$ un $\delta \bar{\psi}_m$.

Modālās formas vidējais lielums tiek iegūts katram modālās formas vektora elementam, savukārt dispersija tiek piedāvāta kā integrāls parametrs – viens pašam īpašajam vektoram.

Pēc 3–5 darbību veikšanas testējamā parauga (konstrukcijas, parauga) atskaites stāvoklim izmēģinājumus atkārto pārējiem konstrukciju stāvokļiem. Stāvoklis tiek attēlots ar ārējās ietekmes faktoriem. Rotējošām lāpstiņām pieliktie spēki ir centrālās spēki rotācijas laikā, tāpēc stāvokli nosaka rotācijas ātrums (3.1. att.). Ietekmes funkcija m^{th} modālās frekvences f_m attiecībai pret rotācijas ātrumu v ir aprakstīta, izmantojot otrās kārtas polinomu:

$$f_m(v) = \beta_0 + \beta_1 v + \beta_2 v^2. \quad (3.1)$$

Funkciju koeficienti β pēc tam tiek atrasti, izmantojot regresijas metodi.

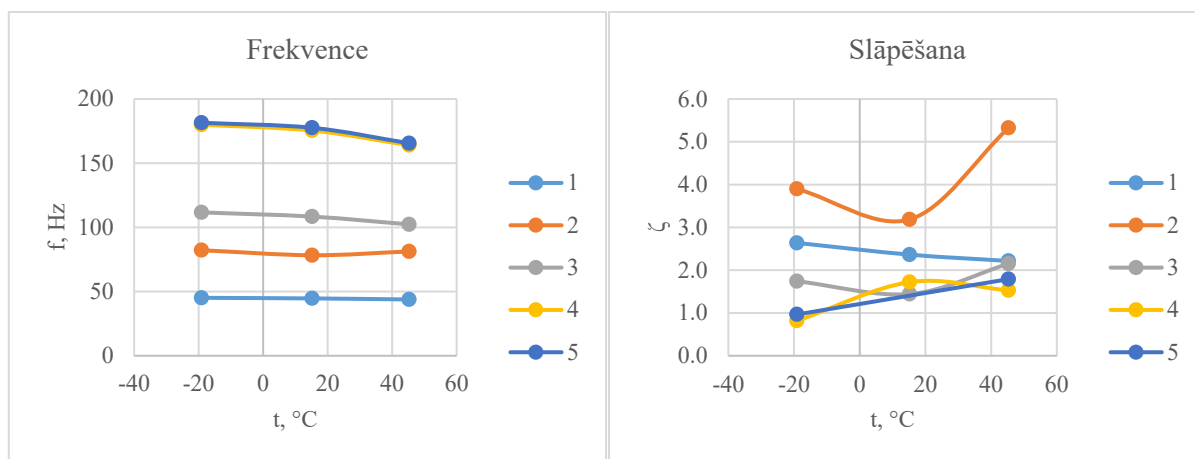
Individuālā modālā pase

Tipiski modālo parametru parametri, kas ir rūpīgi atlasīti (kā parādīts iepriekš), kalpo kā vadlīnijas modālo parametru izvēlei, apstrādājot atsevišķu konstrukciju datus. Lai individuālā pase darbotos pareizi, tai ir vajadzīgi veselas konstrukcijas stāvokļa dati, ko iegūst, testējot konkrēto konstrukciju (paraugu) tās veselā stāvoklī patvaļīgos apstākļos. Testēšana patvaļīgos apstākļos ļauj izvairīties no neērtas un dārgas testēšanas laboratorijas apstākļos. Izmantojot tipiskas modālās pases ietekmes funkcijas, šos modālos parametrus pārrēķina no patvaļīgiem apstākļiem uz standartapstākļiem. Pēc tam konstrukcijas veselības uzraudzība tiek veikta standartapstākļos. Atsevišķu modālo parametru vērtību variācijas tiek salīdzinātas ar atsevišķas

pases references ticamības intervāliem. Par bojājumu liecina tas, ka izmērītā novirze pārsniedz references ticamības intervālus. Arī turpmākie konkrētās konstrukcijas mērījumi tiek pārrēķināti uz references apstākļiem, lai šajos apstākļos tiktu veikts bojājumiem jutīgu pazīmju monitorings.

Piemēram, temperatūras ietekmes funkcijas frekvences $f(t)$ un amortizācijas $\zeta(t)$ ir redzamas 3.2. att. Dažas atkarības ir lineāras (galvenokārt attiecībā uz frekvenci), dažas nav. Šīs funkcijas ļauj aproksimēt modālos parametrus citām temperatūrām.

Atsevišķs MP apsver iespēju konstatēt bojājumus. Bojājuma (ja tāds ir) stāvokļa noteikšana tiek veikta, izmantojot bojājumu noteikšanas algoritmu. Bojājumu smaguma pakāpes novērtēšanu var veikt, izmantojot modālo parametru variāciju (MPV).



3.2. att. Temperatūras ietekmes funkcijas stikla šķiedras kompozīta cilindram pirmajām piecām modām.

3.2. Modālo parametru izmaiņas

Lai noteiktu bojājumus un to nopietnību, ir nepieciešams visaptverošs objekta modālo parametru modifikācijas novērtējums. Ir piemēri un zināma pieredze modālo parametru izmaiņu novērtēšanā [30]. Šajā darbā ir piedāvāts modālo parametru izmaiņu novērtēšanas matemātiskais formulējums.

Lai novērtētu m^{th} modas modifikāciju no konstrukcijas testa, kas nav izmantots tipiskās modālās pases veidošanai, kā integrētu parametru izmanto modālo parametru variāciju (MPV), kurā ņemta vērā modālās frekvences, slāpēšanas un formas modifikācijas, salīdzinot ar tās atskaites stāvokli (bāzes līniju). MPV ir modālās pases neatņemama sastāvdaļa.

Modālais tests i apskata tipiskas konstrukcijas testēšanu. Tiek pieņemts, ka šīs konstrukcijas stāvoklis nav zināms. Modālo parametru aplēses tiek veiktas, izmantojot standarta pieeju, tāpat kā tipiskās pases veidošanas 1. un 2. posmā. Tiek veikta arī normalizācija un fāžu izlīdzināšana, lai saskaņotu jaunās modālās formas $\bar{\psi}_m^i$ ar tipiskajām formām. Tipiskie modālie parametri kalpo kā atskaites punkts, ar kuru, izmantojot vienkāršu modālo atšķirību, tiek salīdzināti jauniegūtie parametri. Attiecībā uz frekvenci un dempingu normalizētā modālā starpība modai m ir:

$$\Delta \bar{f}_m = \bar{f}_m^i - \bar{f}_m, \quad (3.2)$$

$$\Delta \bar{\zeta}_m = \zeta_m^i - \bar{\zeta}_m. \quad (3.3)$$

Formas novirzi $\Delta \bar{\psi}_m$, salīdzinot ar tipisko formu, aprēķina kā visu formas elementu noviržu ģeometrisko summu:

$$\Delta \bar{\psi}_m = \sqrt{\sum_{n=1}^N (\bar{\psi}_{m,n}^i - \bar{\psi}_{m,n})^2}. \quad (3.4)$$

Ir izdevīgi novērtēt pārbaudāmās konstrukcijas integrālo novirzi, kur tiek ņemtas vērā visu modu novirzes. Šim nolūkam izmanto integrālās novirzes parametrus – frekvenci $\Delta \bar{f}$, dempingu $\Delta \bar{\zeta}$ un formu $\Delta \bar{\psi}$:

$$\Delta \bar{f} = \sqrt{\sum_{m=1}^M (\Delta \bar{f}_m)^2}; \quad \Delta \bar{\zeta} = \sqrt{\sum_{m=1}^M (\Delta \bar{\zeta}_m)^2}; \quad \Delta \bar{\psi} = \sqrt{\sum_{m=1}^M (\Delta \bar{\psi}_m)^2}. \quad (3.5)$$

Integrālo modālo novirzi sauc par modālo parametru variāciju. Ja nepieciešams veikt konstrukcijas kopējo modālo novērtējumu, izmantojot vienu vērtību, tad var izmantot modālo parametru variāciju intensitāti:

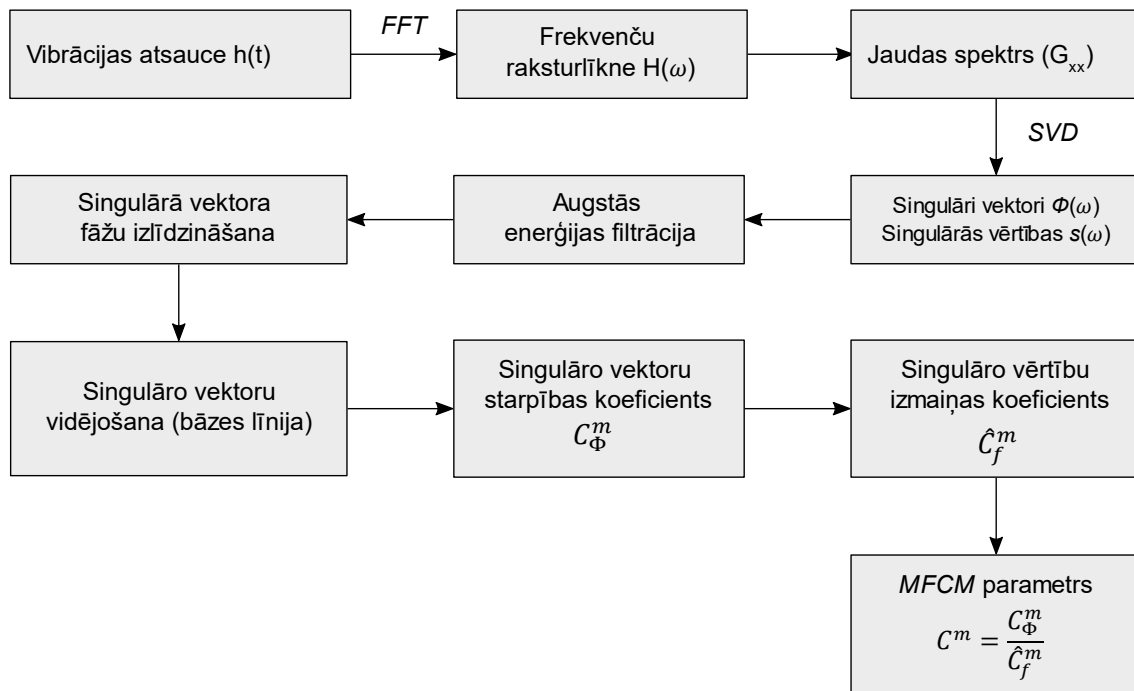
$$MPVI = \sqrt{\Delta \bar{f}^2 + \Delta \bar{\zeta}^2 + \Delta \bar{\psi}^2}. \quad (3.6)$$

3.3. Modālo lauku salīdzināšanas metode

Modālo lauku salīdzināšanas metode ir vibrāciju signālu apstrādes metode, kas ļauj iegūt konstrukciju stāvokļa skaitlisku novērtējumu. Modālais lauks šeit ir termins, ar ko apzīmē singulāro vektoru matricu $\Phi(\omega)$ un vērtības $s(\omega)$. Novērtējums ir relatīvs, t. i., ir jānosaka atskaites stāvoklis, kas kalpo par atskaites punktu. Šī bāzes līnija var būt modālais lauks, kas iegūts ar vienu veselīga stāvokļa mērījumu, vai modālais lauks, kas iegūts kā vairāku mērījumu vidējais rādītājs. Lai objektīvi salīdzinātu modālo lauku, tika izstrādāta modālā lauka salīdzināšanas metode (*MFCM*).

3.3. att. redzama modālā lauka salīdzināšanas metodes parametra aprēķina algoritma shēma. Detalizēts metodes apraksts ir sniegts promocijas darba pilnajā tekstā.

MFCM ir opcionālā metode, un to var izmantot kā atsevišķu instrumentu konstrukcijas veselības uzraudzībai. Galvenā *MFCM* priekšrocība ir tā, ka tai nav nepieciešama modālo parametru novērtēšana. Tas ievērojami ietaupa apstrādes laiku. No otras puses, šī metode nav tik izturīga kā modālās pases pieeja.



3.3. att. *MFCM* parametru aprēķināšanas algoritms.

4. LIETOŠANAS PIEMĒRI

Šajā nodaļā aplūkoti ierosinātie *SHM* sistēmas lietojuma gadījumi. Aprakstīto pieeju eksperimentālā verifikācija ir balstīta gan esošajās metodēs, galvenokārt OMA un vispārārtzītajās modālo parametru novērtēšanas metodēs, gan vairākos jaunos risinājumos:

- PVDF pjezoplēves sensoru izmantošana OMA;
- bezvadu datu pārraides risinājumu izmantošana rotējošo lāpstiņu OMA;
- novērtēto modālo parametru novērtēšanas metodes bojājumu noteikšanai un identificēšanai.

Šajā darbā izklāstītie jēdzieni un teorijas pārbaudītas, izmantojot šādus objektus: 85 cm garu alumīnija siju, 1,5 m augstu vēja turbīnas modeli, 20 m augstu lidostas radara torni un 2 m mazu helikoptera kompozītmateriāla lāpstiņu.

4.1. Deformācijas sensoru izmantošana

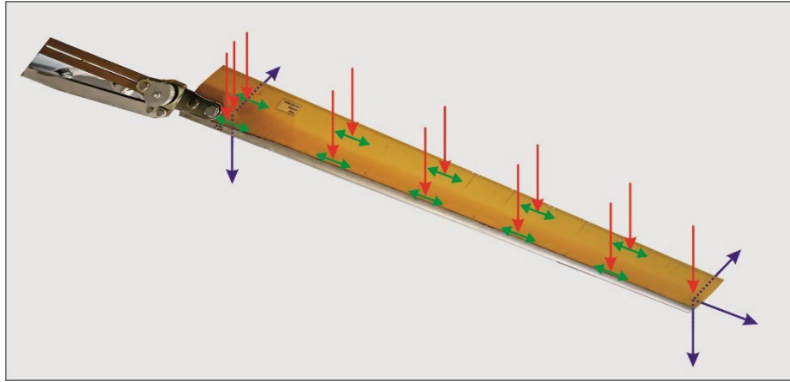
Secinājumiem, kas aprakstīti 2.4. apakšnodaļā, nepieciešams eksperimentāls apstiprinājums – testējamā objekta vibrāciju un deformāciju formu salīdzinošā analīze, kas ir viens no promocijas darba mērķiem. Turklāt šī pētījuma mērķis ir apstiprināt pjezoplēves sensoru lietojumu bez priekšpastiprinājumiem.

Par eksperimentālā pētījuma objektu tika izvēlēts saliktās lāpstiņas izmēģinājuma paraugs. Šīs lāpstiņas modālo parametru eksperimentālu novērtēšanu nodrošina divas modālās metodes: eksperimentālā modālā analīze (EMA) un OMA. Veicot EMA, lāpstiņa tika ierosināta ar dinamisko āmuru ar spēka pārveidotāju, savukārt reakcijas mērījumi tika veikti ar diviem akselerometriem. OMA metode izmanto 10 pjezoplēves sensorus, kas mēra lāpstiņas deformācijas. Izmantojot OMA, lāpstiņu ierosina ar parastiem āmura sitieniem pa metāla detaļām, kas piestiprina lāpstiņas sakni pie testa stenda. Triecienu biežums un stiprums ir mainīgs, nodrošinot patvaļīgu ierosmi, kas atbilst OMA ierobežojumiem. Abu metožu mērījumu uzstādīšana redzama 4.1. attēlā. Lāpstiņa ir savienota ar rotoru, izmantojot adapteri un vērpes.

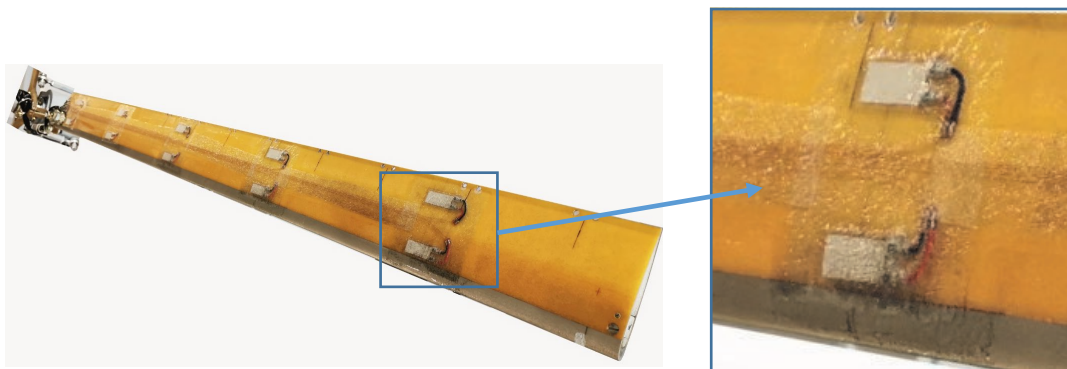
Uz lāpstiņas virsmas ir 10 pjezoplēves sensori, kas izvietoti piecās sekcijās gar tās asi divās līnijās: viena – pie lāpstiņas priekšējās malas, otra – pie lāpstiņas aizmugurējās malas. Lāpstiņas galā un pie tās saknes ir piestiprināti divi trīskomponentu akselerometri atskaites vibrāciju mērīšanai.

Konstrukcijā iestrādāti pjezoplēves deformācijas sensori

Uzlabetām kompozītmateriālu konstrukcijām pjezoplēves sensori sniedz būtisku priekšrocību, jo tos var iestrādāt konstrukcijā. Kā piemēru var minēt 4.2. attēlā redzamo eksperimentālo paraugu kompozītmateriāla lāpstiņām ar plēves sensoriem, kas iestrādāti tās virsmas slāņos. Sensori ir pielīmēti uz lāpstiņas virsmas (kā aprakstīts 2. nodaļas 2.5. apakšnodaļā) un pārklāti ar neaustās stikla šķiedras matu, kas pēc tam piesūcināts ar epoksīdsveķiem. Tādējādi uz lāpstiņas tiek izveidots papildu aizsargslānis, kas kopā lāpstiņas aerodinamisko formu un saglabā sensorus neskartus.



4.1. att. Lāpstiņu vibrāciju un deformāciju mērījumu komplekts. Paātrinājums (zilā krāsā), deformācija (zaļā krāsā) un trieciena virziens (sarkanā krāsā).



4.2. att. Kompozītmateriāla lāpstiņas virsmā iestrādātie pjezoplēves sensori.

Modālo formu apstrāde

Akselerometra atbildes reakcijas no EMA testiem tiek mērītas un apstrādātas, izmantojot programmatūru *Pulse Labshop*, lai iegūtu modālos parametrus ar klasiskajām modālajām formām (novirzes/izspiešana). Atbildes no pjezoplēves sensoriem OMA testu laikā tika reģistrētas un apstrādātas *Artemis* programmatūrā. Iegūtie modālie parametri ietver deformācijas modālās formas. Ir salīdzinātas divu veidu modālās formas.

Modālas formas, kas iegūtas, izmantojot OMA, nodrošina katras modas eigenvektoru $\bar{\varepsilon}(x)$ relatīvajā mērogā, kas normalizēts pēc lāpstiņas deformācijas maksimālās vērtības šajā modā ε_m .

$$\bar{\varepsilon}(x) = \varepsilon(x)/\varepsilon_m \quad (4.1)$$

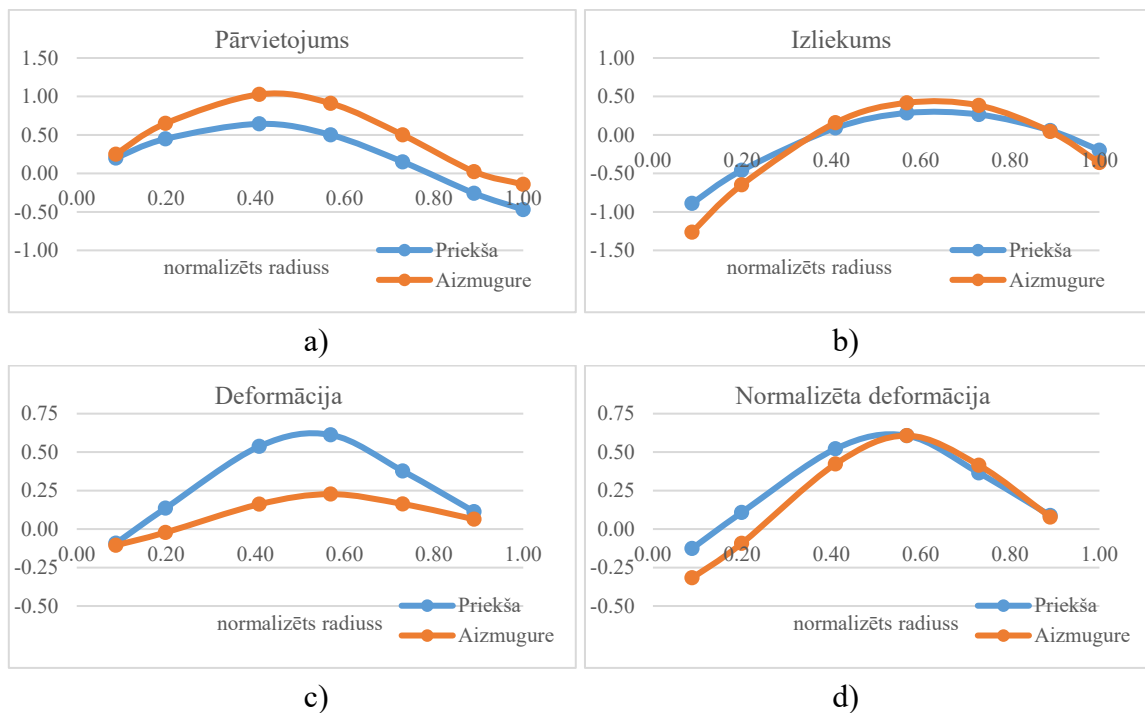
Deformācija ir virsmas augstuma funkcija (no neitrālā slāņa), tāpēc tiek piemērots koeficients C (augstuma apsvēruma).

$$\bar{k}(x) = \bar{\varepsilon}(x)/C. \quad (4.2)$$

Virsmas slāņa izliekums patvaļīgā punktā ir proporcionāls šī slāņa stiepes un saspiešanas deformācijai $k_i = C\varepsilon_i$, tātad normētais izliekums $\bar{k}(x)$ atbilst lāpstiņas normalizētajai deformācijai ar proporcionalitātes koeficientu C , kas atspoguļo lāpstiņas profila augstumu pie izmērītā *DOF*.

Izliekuma un deformāciju salīdzinošā analīze

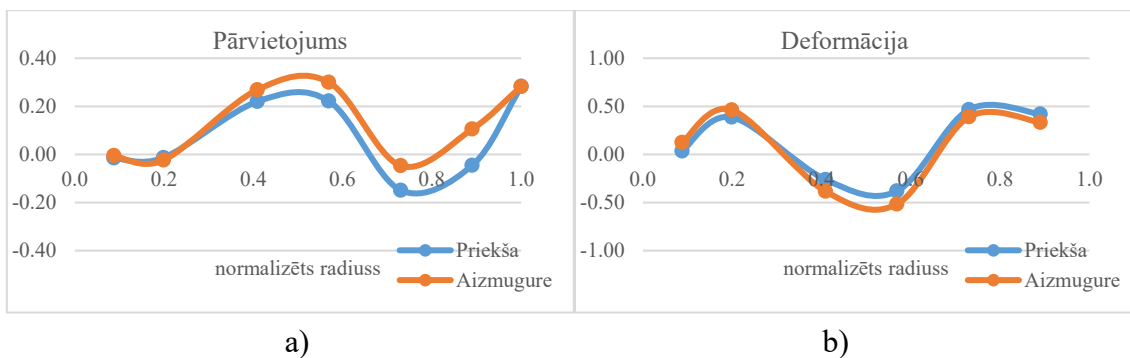
Lai salīdzinātu lāpstiņas pārvietojumu un deformāciju formas, tiek izmantotas diagrammas, kas ilustrē izliekuma vai deformāciju sadalījumu gar lāpstiņas garenvirziena asi, t. i., pa eigenvektoru. Zilie punkti diagrammās parāda pašu deformāciju, kas aprēķināta, izmantojot mērījumus *DOF* gar lāpstiņas priekšējo malu, sarkanie – gar aizmugurējo malu. Diagrammas, kas redzamas 4.3. 4.3. att. ļauj salīdzināt divas lieces formas, ko atspoguļo: modālā forma, kas aprēķināta, izmantojot EMA (pārvietojumu; 4.3. a) att.), izliekuma atvasinājumu no minētās formas (4.3. b) att.), deformācijas, kas izmērītas ar pjezoplēves sensoriem (4.3. c) att.), un normalizētās deformācijas (4.3. d) att.).



4.3. att. Eigenvektoru diagrammas: a) pārvietojums; b) izliekums; c) izmērītās deformācijas; d) normalizētās deformācijas.

Turpinot iepriekš minētos apsvērumus un izmantojot pusviļņu pieeju lieces modas identifikācijai, var aplūkot līkni, kas redzama 4.3. a) attēlā kā otrā lieces forma, kurai trūkst kreisās puses – tā atrodas uz neredzamās vērpes. Izliekuma diagramma (4.3. b) att.) ir par 180° nobīdīta pēc fāzes, salīdzinot ar pārvietojuma līkni. Deformācijām jābūt līdzīgām otrajam atvasinājumam, tāpēc arī fāzes nobīdei jābūt 180° attiecībā pret pārvietojuma formu. Šī nobīde ir novērojama starp diagrammu līknēm, kas redzamas 4.3. a) un d) attēlā. Tādējādi eksperimentāli iegūto otrās lieces modas pārvietojuma un deformācijas formu aprēķinu līdzība apstiprina iepriekš minēto pieņēmumu pamatotību.

4.4. attēlā redzamas pārvietojuma un deformācijas formas diagrammas, kas raksturo tās pašas lāpstiņas ceturto lieces modu. Pārvietojuma (novirzes) forma ir līdzīga (4.4. a) att.), deformācijas forma (4.4. b) att.) ir ar nobīdi starp tām par aptuveni 180° .



4.4. att. Normalizētie pašu vektori: a) pārvietojums; b) deformācija.

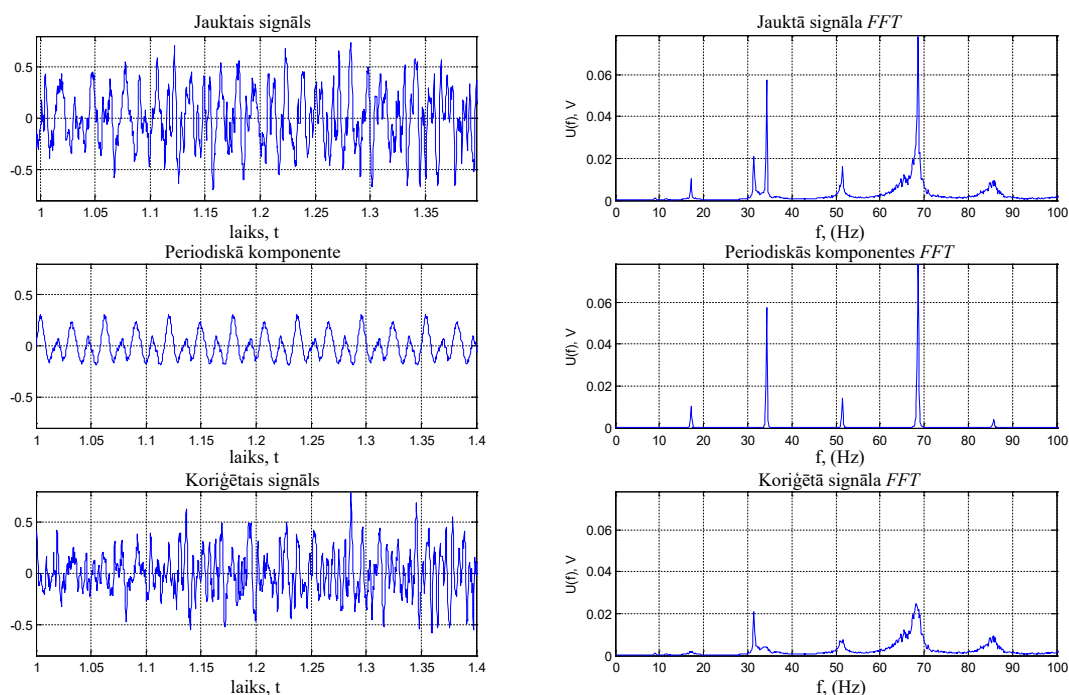
Ekspērimētālā verifikācija apstiprina 2.4. apakšnodaļā izklāstīto pieņēmumu pamatotību par sakarību starp pārvietojuma otro atvasinājumu un virsmas slāņa deformācijas formu. Šī lineārā atkarība ļauj izmantot šijai līdzīgas konstrukcijas elementu deformāciju mērījumus, lai noteiktu to modālos parametrus.

4.2. Periodisko komponentu slāpēšana

Šī pētījuma uzdevums ir apstiprināt periodisko komponentu slāpēšanas metodi, kas formulēta 2.6. apakšnodaļā. Testēšanas objekts ir helikoptera lāpstiņa uz rotējošas rotora vārpstas. Lāpstiņa ir tāda paša tipa kā iepriekšējā pētījumā. Lāpstiņai ir piecas sekcijas ar diviem sensoriem katrā, kas ir paralēli lāpstiņas asij, kopā – 10 sensori. Turklāt uz vārpstas ir uzstādīta taho zonde, kas reģistrē rotācijas ātrumu, kā izejas signālu, dodot impulsus. Sensori ir piestiprināti pie lāpstiņas virsmas ar abpusējās līmlentes palīdzību un pārklāti ar zema blīvuma stikla šķiedras mata un epoksīdsveķu slāni. No sensoriem saņemtie signāli tiek ievadīti *DAQ* sistēmā, kas bezvadu režīmā pārsūta datus uz datoru, izmantojot *WiFi*.

Lai pastiprinātu harmonisko komponentu, izmērītajiem vibrāciju signāliem tika piemērota laika sinhrona vidējā izlīdzināšana. 4.5. attēlā redzami trīs izmērītā signāla grafiki, kur augšējā ir gan periodiskā, gan nejaušā komponente (“jauktais signāls”), vidējā ir periodiskais signāls, kas uzkrāts, izmantojot taho impulsus, apakšējā – iegūtais signāls (“korigētais signāls”), kas iegūts, atņemot periodisko komponenti no jauktā signāla. Laika apgabals ir attēlots pa kreisi, frekvenču apgabals – pa labi, izmantojot ātro Furjē transformāciju. Ļoti svarīga ir jauktā un periodiskā fāžu izlīdzināšana, un to panāk, rūpīgi izmantojot taho signālu.

Periodiskās komponentes pamatfrekvence ir 17,1 Hz. Jauktā signāla otrās harmonikas pie 34,2 Hz magnitūda ir 57,5 mV. Signāla korekcija šo harmonisko samazina 16 reizes – līdz 3,5 mV.



4.5. att. TSA ekstrakcijas piemērs vibrācijas signālam.

Modālo parametru novērtēšana

Modālo parametru novērtēšanas procedūra tika veikta, izmantojot paplašināto frekvenču apgabala dekompozīcijas (*EFDD*) analīzi. Rezultātā iegūtā modālā frekvence, modu formas un slāpēšanas koeficienti 10 aprēķinātajām modalitātēm ir redzami

Kā redzams 4.1. tabulā, harmonikas izvilkšana samazina periodisko daļu ietekmi. Tā rezultātā samazinās 5., 7. un 10. modas sarežģītība – vidēji par 5,5 %. No otras puses, 2. un 6. modām pēc apstrādes sarežģītība ir augstāka. To varētu izskaidrot ar faktu, ka minētās modas būtībā ir vairāku modu superpozīcija (visticamāk, divu modu), no kurām viena ir piespiedu harmoniskā moda, otrā – dabiskā moda. Modas, kas nav harmonisko modu tuvumā (1., 3. un 8.), neuzrādīja nopietnas *MCF* parametra izmaiņas.

4.1. tabula Tika novērots, ka pēc harmoniku ekstrakcijas vislielākās frekvences un slāpēšanas izmaiņas parādās harmoniskajās frekvencēs, kas bija sagaidāms, jo šīs frekvences ietekmēja ekstrakcijas algoritms.

Ekstrakcijas rezultātā bija iespējams novērtēt divas papildu modas, no kurām viena atrodas uz otrās harmonikas frekvences (34,29 Hz), otra moda (137,27 Hz) ir augstākās kārtas moda.

Lai kvantitatīvi novērtētu atšķirību starp vienādām modālām formām pirms (oriģināls) un pēc (iegūts) apstrādes, tiek izmantots *MAC* (4.6. att.). Modas var uzskatīt par līdzīgām, ja *MAC* ir $> 0,8$. Tas ir labs rādītājs, ja vienādu modu pāri (pirms un pēc apstrādes) uzrāda *MAC* vērtības, kas ir tuvas 1. Tas nozīmē, ka apstrāde nav būtiski mainījusi modālo informāciju signālos.

Salīdzinot tos pašus modu pārus (oriģinālos un iegūtos kopumus), *MAC* vērtība attiecīgi ir 0,618 un 0,583, kas liecina, ka *MAC* vērtības nav būtiski samazinājušās.

Cita pieeja, kā novērtēt atšķirību pirms un pēc apstrādes, ir izmantot modālo sarežģītību un tās mērvienību – modālās sarežģītības koeficientu (*Mode Complexity Factor, MCF*).

Kā redzams 4.1. tabulā, harmonikas izvilksana samazina periodisko daļu ietekmi. Tā rezultātā samazinās 5., 7. un 10. modas sarežģītība – vidēji par 5,5 %. No otras puses, 2. un 6. modām pēc apstrādes sarežģītība ir augstāka. To varētu izskaidrot ar faktu, ka minētās modas būtībā ir vairāku modu superpozīcija (visticamāk, divu modu), no kurām viena ir piespiedu harmoniskā moda, otrā – dabiskā moda. Modas, kas nav harmonisko modu tuvumā (1., 3. un 8.), neuzrādīja nopietnas *MCF* parametra izmaiņas.

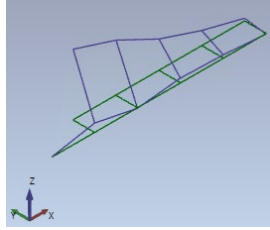
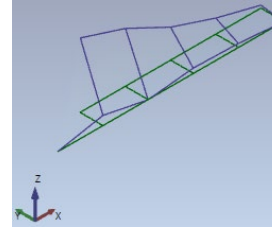
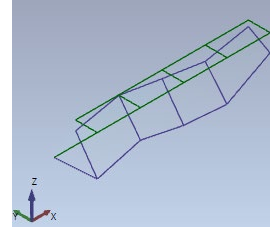
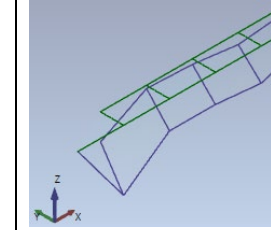
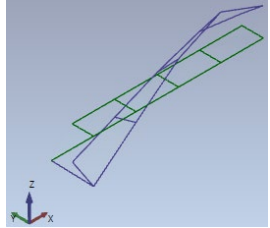
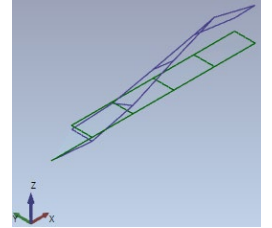
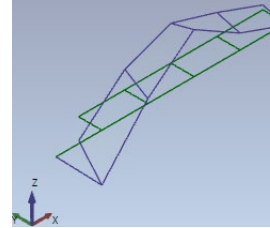
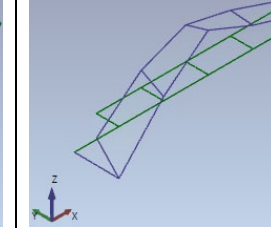
4.1. tabula

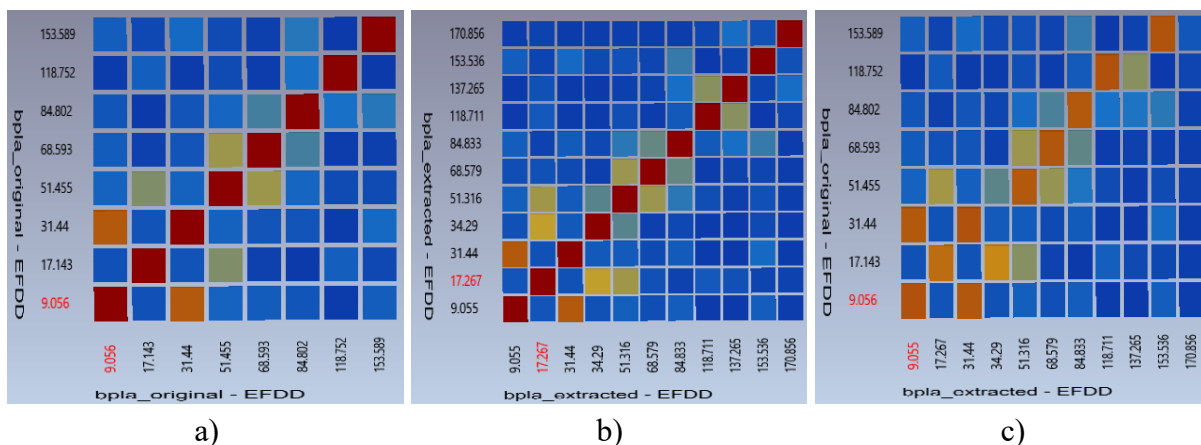
Kompozīta lāpstiņas modālā frekvence un slāpēšana. Novērtēšana bez un ar periodisku ekstrakciju

| Nr. p. k. | f , Hz | | slāpēšana | | sarežģītība | | Formas apraksts |
|-----------|-----------|--------|-----------|--------|-------------|--------|--|
| | oriģināls | iegūts | oriģināls | iegūts | oriģināls | iegūts | |
| 1. | 9,06 | 9,06 | 1,756 | 1,755 | 15,4 | 14,9 | 1. lieces Y ass |
| 2. | 17,14 | 17,27 | 0,337 | 0,864 | 14,3 | 37,4 | piespiedu saliekums (1. rotora harmonikas) |
| 3. | 31,44 | 31,44 | 0,234 | 0,235 | 21,2 | 21,3 | 1. lieces Z ass |
| 4. | – | 34,29 | – | 1,058 | – | 4,0 | piespiedu lieces Z ass (2. rotora harmonikas) |
| 5. | 51,46 | 51,32 | 0,368 | 1,394 | 99,2 | 94,2 | (3. rotora harmonikas) |
| 6. | 68,59 | 68,58 | 0,921 | 1,321 | 10,3 | 13,7 | 3. lieces Z ass (4. rotora harmonikas) |
| 7. | 84,80 | 84,83 | 0,118 | 0,166 | 70,7 | 66,9 | 2. lieces Y ass |
| 8. | 118,75 | 118,71 | 1,284 | 1,293 | 0,8 | 0,7 | 4. lieces Z ass |
| 9. | – | 137,27 | – | 0,072 | – | 48,2 | |
| 10. | 153,59 | 153,54 | 0,546 | 0,557 | 42,6 | 35,0 | 3. lieces Y ass |

4.2. tabula

Kompozīta lāpstiņas modālās formas. Novērtēšana bez un ar periodisku ekstrakciju

| oriģināls | iegūts | oriģināls | iegūts |
|---|---|--|---|
| 9 Hz | | 17 Hz | |
|  |  |  |  |
| 51 Hz | | 84 Hz | |
|  |  |  |  |



4.6. att. Oriģinālo un ekstrahēto modu kopu formu *MAC* vērtības: a) oriģinālo modu kopu formu *autoMAC*; b) ekstrahēto modu kopu formu *autoMAC*; c) *MAC* starp oriģinālo un ekstrahēto modu formu.

Izpētes secinājumi

Harmonisko komponentu ekstrahēšanas algoritma ietekme uz modālajiem parametriem ir diezgan maza, kas nozīmē arī mazu ietekmi uz reakciju, līdz ar to – mazu kļūdu. Apstrāde dod iespēju novērtēt dažus papildu modas, ko varētu slēpt harmonikas. Iegūto harmonisko komponentu datu kopa liecina par modālo parametru novērtēšanas kvalitātes uzlabošanu. Iespēja salīdzināt oriģinālo un ekstrahēto versiju sniedz plašāku ieskatu par konstrukcijas reakciju un harmoniku ietekmi reakcijā, kas ļauj labāk izprast konkrētā objekta svārstības un labāk novērtēt tās.

4.3. Modālās pases pielietojums

Prezentētā pētījuma mērķis ir apstiprināt OMA metodes un modālās pases piemērošanu rotējošai lāpstiņai. Darbā veikta vibrācijas un deformācijas sensoru un datu pārraides sistēmas salīdzinošā analīze, kā arī kompozītmateriālu helikoptera lāpstiņu modālās pases izveides validācija.

Ir divi kompozītmateriālu lāpstiņu modālās testēšanas posmi. Pirmajā posmā lāpstiņas tiek testētas statistiskā stāvoklī, izmantojot EMA un OMA, otrajā posmā rotējošām lāpstiņām piemēro tikai OMA metodes.

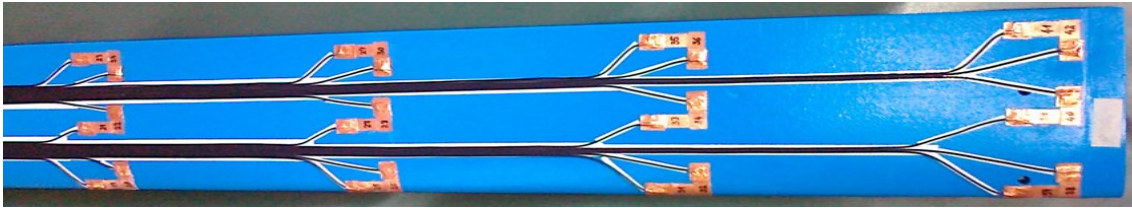
Statiskā testēšana

Tika izgatavoti divi eksperimentāli lāpstiņu modeļi. Pirmais modelis ir aprīkots ar 21 akselerometru (4.7. a) att.). Šī lāpstiņa tiek izmantota eksperimentālajai modālās analīzes statistiskajai analīzei, izmantojot klīstoša āmura metodi.

Otrā lāpstiņa ir aprīkota ar pjezoplēves deformācijas sensoriem (4.7. b) att.). Šai lāpstiņai tiek izmantota OMA metode, lietojot nejaušu manuālu ierosināšanu ar āmuru uz lāpstiņas stiprinājuma daļām.



a)

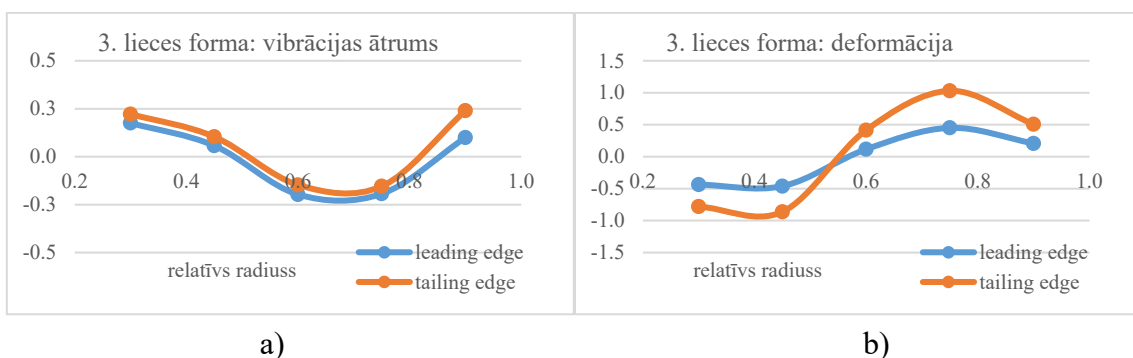


b)

4.7. Vibrācijas akselerometri (a) un vibrācijas deformācijas sensori (b) uz līdzīgām lāpstiņām.

4.8. a) attēlā redzama modālās formas diagramma trešajai lieces (plīvošanas) modai, kur zilā līnija ilustrē modālās formas vektora sadalījumu gar lāpstiņas priekšējo malu, zaļā līnija – gar aizmugurējo malu.

Vibrācijas modu identifikācija un klasifikācija tiek veikta, pamatojoties uz modālajiem parametriem, kas iegūti abos statistiskajos testos. Identificējot vibrācijas un deformācijas modas, standarta metodes (piemēram, *MAC*, *COMAC* u. c.) nav piemērotas, jo, pat ja tās atspoguļo vienu un to pašu modu, līknes ir atšķirīgas. Tāpēc modu saskaņošanai un identificēšanai izmantota analītiska pieeja attiecībā uz vibrāciju un deformāciju sadalījumu pa lāpstiņas garumu un kordiem katrai vibrācijas modai, ņemot vērā secinājumus, kas gūti pētījumā, kas izklāstīti 4.1. apakšnodaļā. Klasificējot kompozītmateriālu lāpstiņu modas, parasti tiek definētas lieces modas, kā arī griezes modas.



4.8. att. Trešās svārstību modas vibrācijas ātruma (a) un deformācijas ātruma (b) formas diagrammas.

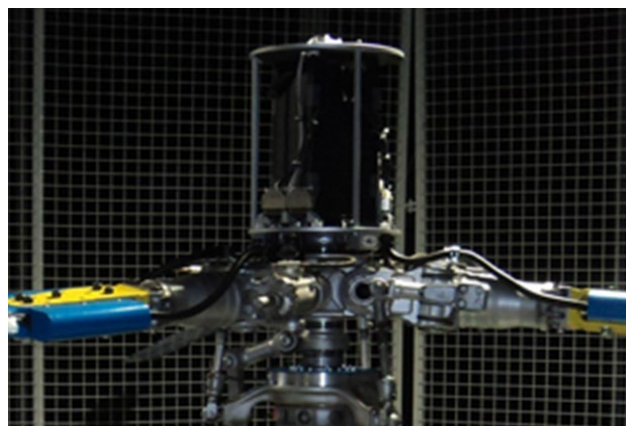
Rotējošo lāpstiņu testēšana

Testēšana tiek veikta ar cita veida lāpstiņu. Rotējošo lāpstiņu testēšanas tehnoloģija ietver metodisko un mērījumu daļu. Uzlabotā daudzkanālu sistēma mēra un pārraida vibrācijas deformācijas sensoru signālus. 4.9. attēlā redzama rotējošo lāpstiņu mērīšanas iekārta ar

deformācijas sensoriem, kā parādīts 4.7. b) attēlā. 4.10. attēlā redzams daudzkanālu datu iegūšanas bloks (*DAU*) ar bezvadu datu pārraides ierīci propellera augšdaļā.



4.9. att. Integrēts deformācijas sensoru un vadu masīvs.



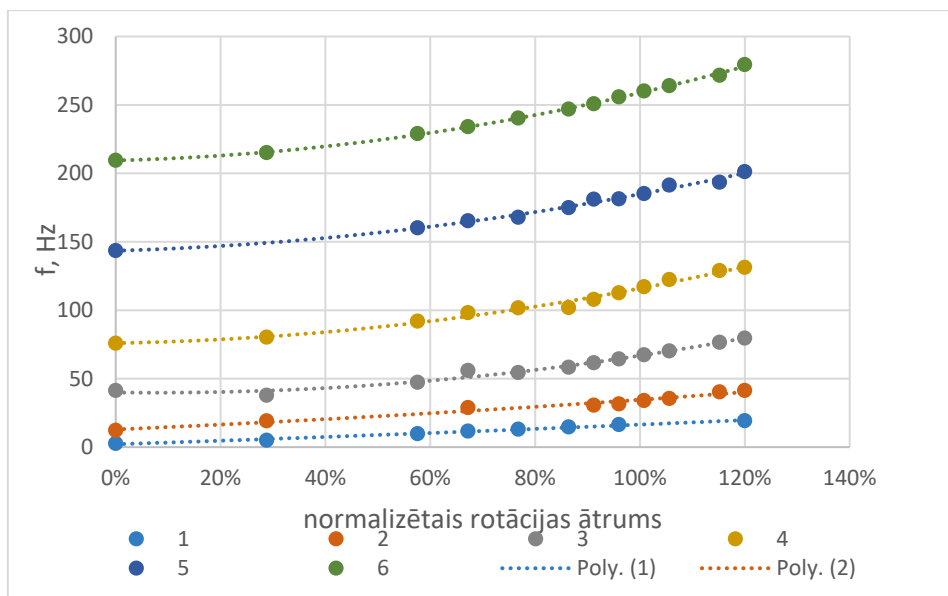
4.10. att. Daudzkanālu bezvadu *DAU* ar savienojuma kabeļiem no lāpstīņām griežas kopā ar rotoru.

Sistēma, kas nodrošina mērījumu datus un to pārraidi, atbilst skarbiem vides apstākļiem, kad rotācijas ātrums ir līdz 1200 apgriezieniem minūtē. Bezvadu maršrutētājs, kas rotē ar *DAU*, pārraida datus uz darbstaciju, kas nodrošina datu saņemšanu, glabāšanu un turpmāku apstrādi. Modālos parametrus ietekmē pastāvīgās centrālās slodzes, kas iedarbojas uz lāpstīņu.

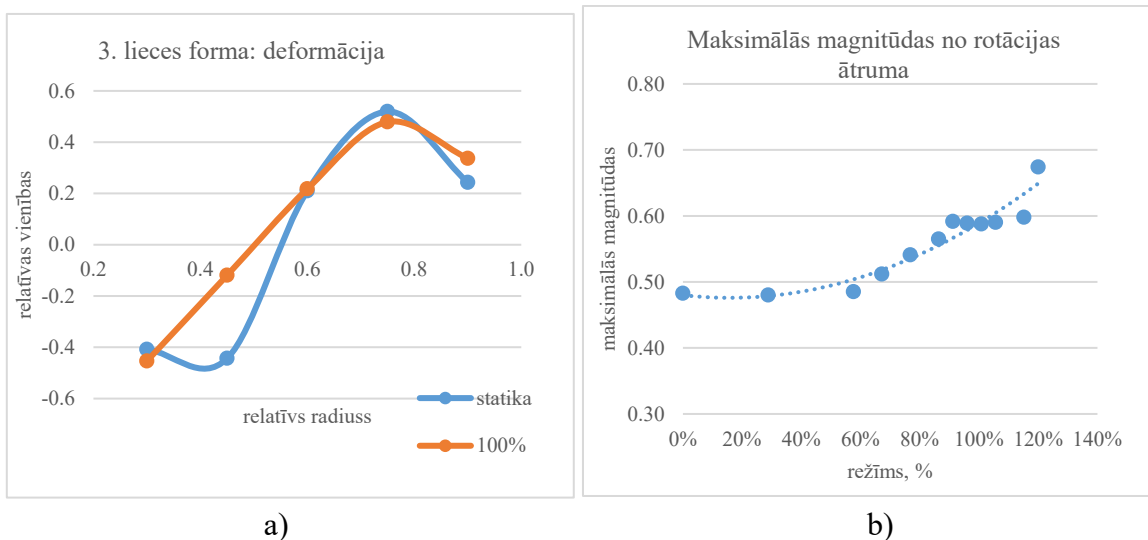
Testus rotējošai lāpstīņai veic darba diapazonā no statistiskā līdz maksimālajam rotācijas ātrumam, kas pārsniedz nominālo ātrumu par 20–30 %. Modālie parametri tiek aprēķināti katram rotora apgriezienu skaitam atsevišķi.

Modālās pases veidošana

Iegūtie modālie parametri tiek saglabāti tabulās katram testētajam darbības stāvoklim. Piemēram, modālās frekvences atkarība no rotācijas ātruma redzama 4.11. attēla tabulā kopā ar attiecīgo otrās kārtas polinoma aproksimāciju – ietekmes funkciju.



4.11. att. Rotācijas ātruma ietekmes funkcija uz modālo frekvenci.



4.12. att. a) Modālās formas deformācija, palielinoties rotācijas ātrumam; b) trešās modas magnitūda kā darbības režīma funkcija.

Lāpstiņas sešu lieces modu ietekmes funkcija (4.11. 4.11. att.) var turpmāk izmantot monitoringa vajadzībām. Ir iespējams veikt OMA lāpstiņai rotācijas laikā ar jebkuru rotācijas ātrumu, pēc tam pārrēķinot aprēķinātos modālo parametrus uz atskaites stāvokli, kas ir 0 % vai bez rotācijas, statiskā stāvoklī. Pārrēķinātos modālo parametrus pēc tam salīdzina ar iepriekš iegūtajiem individuālajiem veseliem modālajiem parametriem.

Kā redzams 4.11. attēlā, vienas un tās pašas modas parametru vērtības dažādiem rotācijas ātrumiem atšķiras. Piemēram, trešā lieces moda ievērojami maina savas īpašības centrālās slodzes ietekmē. Modālā frekvence palielinās no 41 Hz statiskā stāvoklī līdz 64 Hz pie nominālā rotācijas ātruma, slāpēšanas koeficients samazinās no 4,1 % līdz 0,6 %. Tajā pašā laikā mainās modālās deformācijas forma, kā redzams 4.12. att. Pielikto centrālās spēku dēļ lāpstiņa kļūst cietāka, un tas palielina modālo frekvenču vērtības.

4.4. Vēja turbīnas laboratorijas modelis

Promocijas darba pētījumā definēti šādi uzdevumi:

- 1) veikt OMA metožu lietojamības validāciju modālo parametru modifikāciju noteikšanai;
- 2) veikt sērijveidīgo OMA testēšanu, lai samazinātu nepieciešamo mērīšanas kanālu skaitu.

Šajā pētījumā tiek pārbaudīta pieeja, kā ņemt vērā dabas apstākļus, kas varētu ietekmēt bojājumu noteikšanas precizitāti. Šim nolūkam tika izstrādāts un izgatavots vēja turbīnas laboratorijas modelis kā tipiskas konstrukcijas modelis ar darbības mehānismiem.

Modelis ir aprīkots ar 28 deformācijas devējiem, kas izvietoti septiņos vertikālos līmeņos, katrā līmenī ir četri sensori. Pjezoplēves sensori ir savienoti ar priekšpastiprinātājiem, kas izrādījās nevajadzīgi turpmākajos šī darba izstrādes posmos. Katrs sensors ir piestiprināts pie rāmja siju virsmas, izmantojot līmlenti. Sensoru vadi ir pielodēti pie plakanas lentes kabeļa, kas stiepjas gar torni, izlokoties ap šķēršļiem. Kabeļi ir pabeigti komutācijas blokā, kas ļauj signālus grupēt pa grupām.

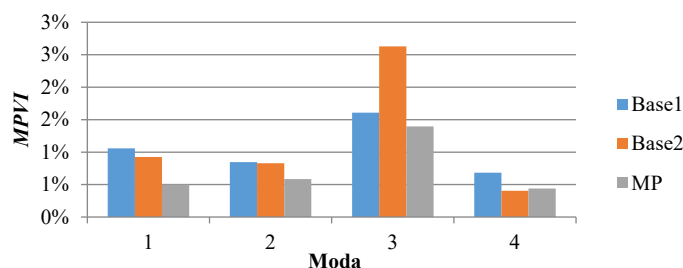
Datu apstrādes sistēmā ietilpst *DAQ*, kas ir *Brüel & Kjær PULSE* 48 kanālu rāmis un apstrādes bloks, kas ir dators ar *ARTEMIS* programmatūras platformu.

Testējot iespējamās vibrāciju ierosmes, tika konstatēts, ka torņa modu ierosme nav piemērota OMA, izmantojot tikai rotora rotāciju torņa stingrības, ierobežotā ierosmes frekvenču diapazona un periodiskās ierosmes dēļ.

Šajā pētījumā tika izmantoti nejauši triecieni pa modeļa pamatni, lai nodrošinātu ierosinājumu.

Modālo parametru izmaiņas vienam nosacījumam

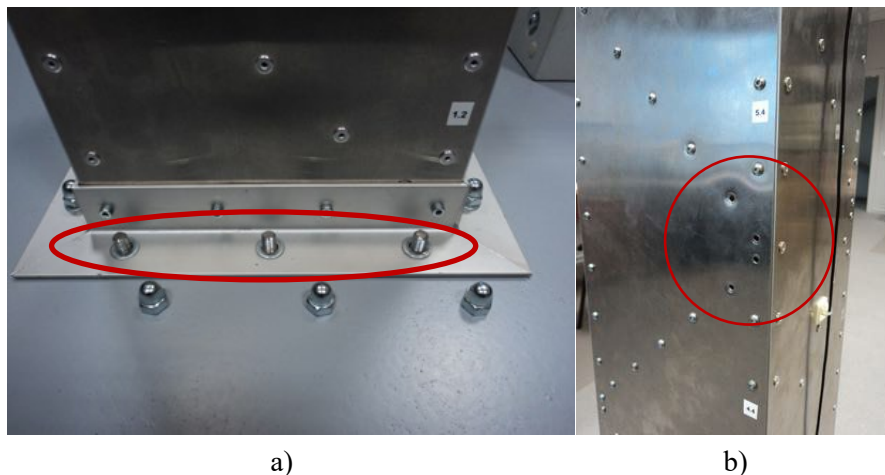
Modālo parametru izmaiņas visos testos tika novērtētas, izmantojot *MPVI*. 4.13. attēlā redzamas atsevišķas (frekvences un formas) *MPV* vērtības, kā arī kombinētās vērtības (*MPVI*). **Base 1** un **Base 2** ir divas sesijas ar pieciem atkārtotiem testiem, izmantojot vienreizējo OMA. *MPVI* ir līdzīgs tests, bet kas ir veikts, izmantojot daudzkārtēju OMA. Sērijveidīgā OMA gadījumos izkliede ir 1,5–2 reizes mazāka nekā vienreizējos gadījumos. Noteiktās *MPVI* vērtības tiek izmantotas kā atsauce.



4.13. att. Modālo parametru integrētās izmaiņas (*MPVI*) trīs testu sērijās.

Bojājumu noteikšana

Iepriekš minēto metožu eksperimentālā validācija ietver divu defektu konsekventu ieviešanu struktūrā (defekti nav piemēroti vienlaicīgi). Pirmais – atskrūvēti pamatnes stiprinājuma uzgriežņi vienā torņa pusē (4.14. a) att.), šeit saukts par 1. defektu. To var klasificēt kā globālu defektu, jo tas maina sistēmas robežstāvokļus. Otrais defekts ir lokāls – četras atskrūvētas skrūves vienā savienojumā torņa vidū (4.14. b) att.). Šīs skrūves kalpo kā savienojums starp rāmi un paneli, kas nozīmē, ka vietējās stingrības kļūst mainīgas. Šo defektu sauc par 2. defektu. Testi, kuru mērķis bija noteikt bojājumus, tika veikti, izmantojot tikai vienreizējās OMA mērījumus.



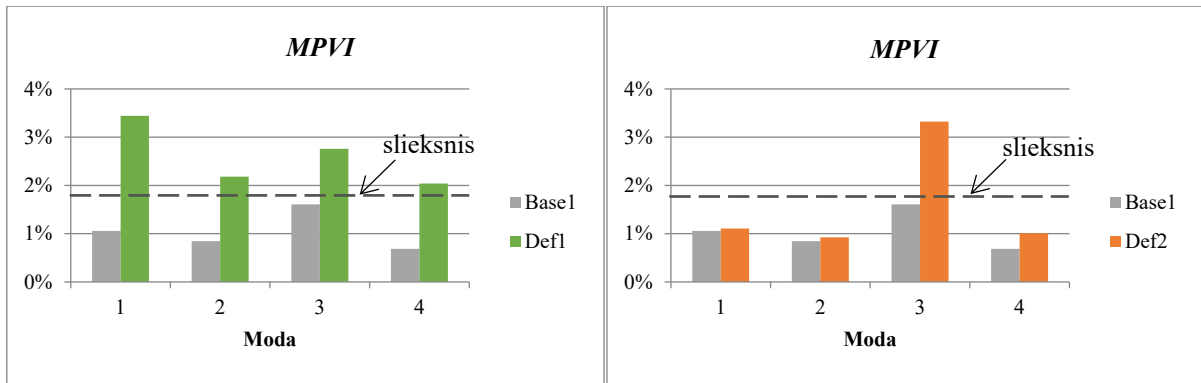
4.14. att. Mākslīgie defekti: (a) 1. defekts; (b) 2. defekts.

4.3. tabulā apkopots bāzes mērījumu (1. tabulā norādīts kā *Base 1*) un konstrukcijas bojājumu stāvokļu *MPVI* parametru salīdzinājums. Defekti izraisīja dažādas modālo parametru izmaiņas. 4.15. attēlā redzamas visu trīs stāvokļu *MPVI* vērtības.

4.3. tabula

Modālo parametru izkliede, kas iegūta, izmantojot *MPVI*, bāzes un bojātos apstākļos

| Moda | f , Hz | 1. bāze | | | 1. defekts | | | 2. defekts | | |
|----------|----------|---------|--------|--------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|
| | | frekv. | forma | komb. | frekv. | forma | komb. | frekv. | forma | komb. |
| 1. | 67,0 | 0,8 % | 1,37 % | 1,06 % | 4,4 % | 2,49 % | 3,44 % | 0,6 % | 1,66 % | 1,11 % |
| 2. | 205,7 | 0,4 % | 1,26 % | 0,85 % | 2,3 % | 2,03 % | 2,18 % | 0,1 % | 1,73 % | 0,93 % |
| 3. | 324,1 | 0,3 % | 2,95 % | 1,61 % | 0,4 % | 5,16 % | 2,76 % | 0,2 % | 6,50 % | 3,32 % |
| 4. | 532,1 | 0,7 % | 0,72 % | 0,68 % | 1,3 % | 2,78 % | 2,04 % | 0,5 % | 1,51 % | 1,01 % |
| Vidējais | | 0,52 % | 1,58 % | 1,05 % | 2,10 % | 3,11 % | 2,61 % | 0,33 % | 2,85 % | 1,59 % |



4.15. att. *MPVI* parametri, kas novērtēti bāzes līnijas un defektu mērījumiem.

1. defekts izraisīja visu četru stabilo modu modifikāciju. Tas ir labs rādītājs, ka ir notikušas globālas izmaiņas konstrukcijas stāvoklī. Globāla modālo parametru modifikācija parasti ir saistīta ar robežstāvokļa izmaiņām. Praksē tas nozīmē, ka konstrukcijas modifikāciju var identificēt tuvu pamatnei un ir jāveic šīs konstrukcijas daļas pārbaude.

Runājot par 2. defektu, trešās modas formas *MPV* vērtība (6,5 %) skaidri norāda, ka ir problēmas ar konstrukciju. *MPVI* vērtība pārsniedz sliexsni tikai trešai modai, tas nozīmē, ka visticamākā bojājuma vieta ir torņa centrālā daļa, kurā tika konstatētas maksimālās deformācijas.

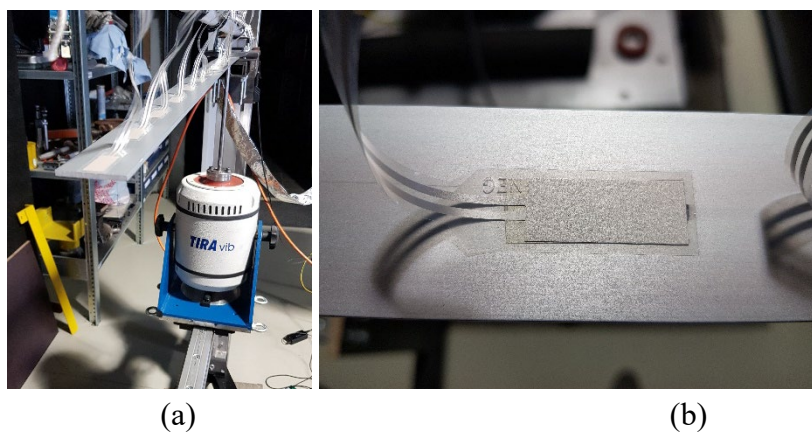
Gadījuma izpētes secinājumi

Modālo parametru variācijas kopā ar modālo formu vizualizāciju ir ļoti ērtas diagnostikas vajadzībām. Inženieris ar atbilstošu izpratni un pieredzi var identificēt un lokalizēt defektus, analizējot *MPVI* un modālās formas.

MPVI var būt ērts instruments *SHM* vajadzībām. Ja konstrukcijas mēra ar OMA metodi, veicot modālo parametru novērtēšanu un iegūstot *MPVI* parametru, tad tas ļauj analizēt frekvences un modu formas, lai potenciāli lokalizētu bojājumus. Tomēr bojājuma smagumu var novērtēt tikai kvalificēts un pieredzējis inženieris, veicot rūpīgu pārbaudi.

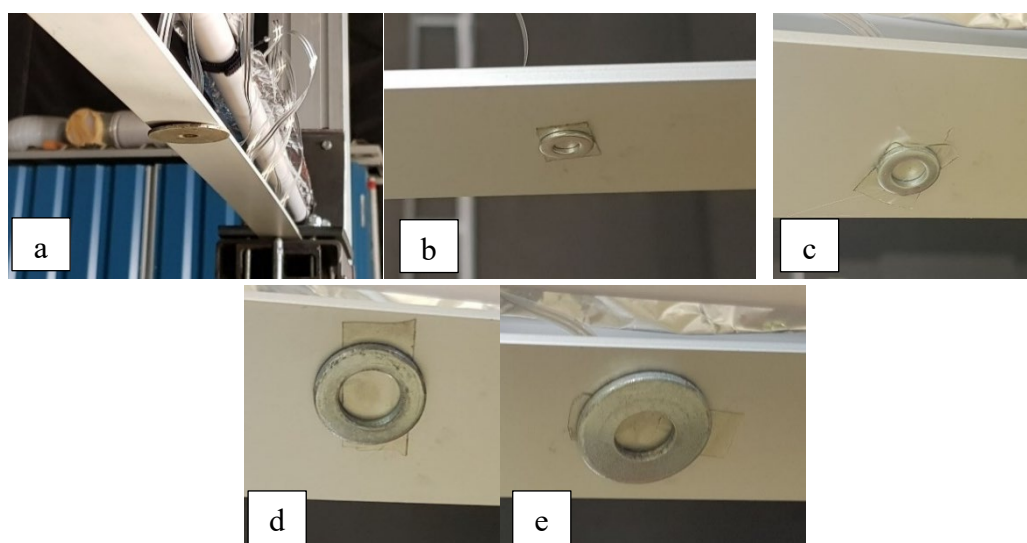
4.5. Alumīnija sijas

Eksperimenta mērķis ir apstiprināt modālo lauku salīdzināšanas metodi. Tas tiek veikts ar vienkāršu alumīnija siju, kuras viens gals ir fiksēts, bet otrs brīvs. Sijai ir 3 x 40 mm liels taisnstūra šķērsriezums. Piestiprinātās sijas garums ir 850 mm, svars – 275 g. Kā vibrāciju devējus izmanto 12 pjezoplēves deformācijas sensorus (4.16. 4.16. att.), kas ierobežo modu noteikšanu līdz pirmajām sešām lieces modām. Siju ierosina, izmantojot kratītāju un baltā trokšņa signālu.



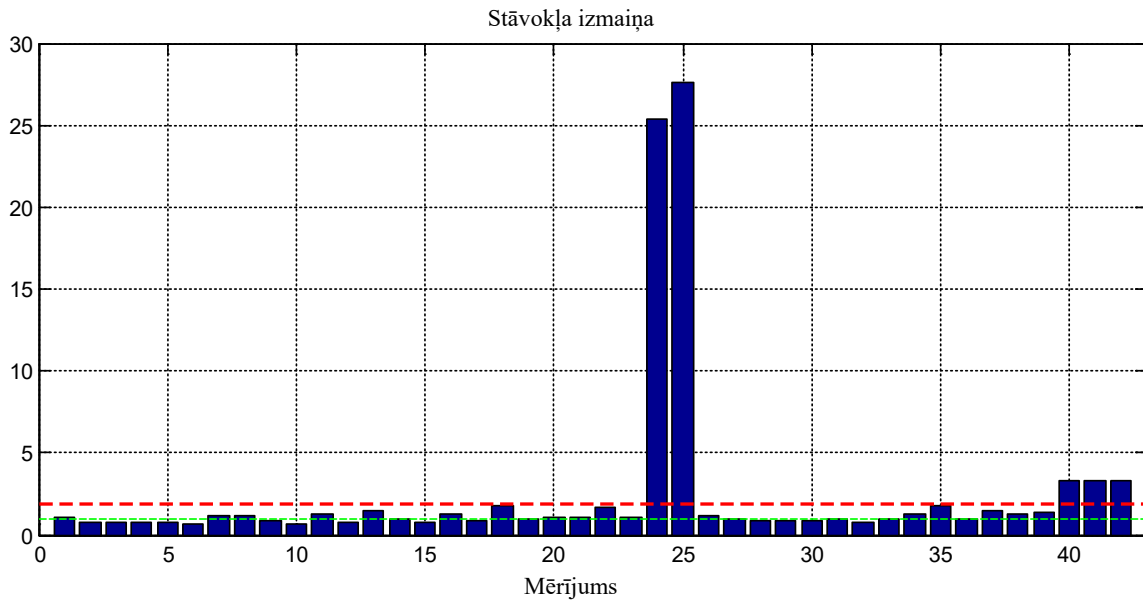
4.16. att. a) Eksperimentālā iekārta; b) pjezoplēves deformācijas sensors.

Lai simulētu sijas strukturālā stāvokļa izmaiņas, tika izmantotas dažāda svara metāla paplāksnes. Paplāksnes tika pielīmētas sijas vidū. Vispirms pie sijas tika piestiprināta smaga paplāksne, lai pārbaudītu stāvokļa izmaiņas noteikšanu. Pēc tam paplāksne tika noņemta, lai pārbaudītu, vai *MFCM* parametrs atspoguļo atgriešanos pie veselām atsaucēs vērtībām. Pēc tam tika veikta jutīguma pārbaude, izmantojot mazākas paplāksnes ar pieaugošu svaru.



4.17. att. Pievienotās masas lietošanas secībā: a) 24 g; b) 0,3 g; c) 0,8 g; d) 2,9 g; e) 9,8 g.

Veselīga standarta bāzes līnija tika veidota kā vidējais lielums starp pirmajiem 20 mērījumiem bez pievienotās masas. Mērījumu rezultāti ir attiecināti uz bāzes līniju un attēloti joslu diagrammā, kas redzama 4.18. attēlā. Vidējā vērtība ir 1, jo attēlotais parametrs ir normalizēts saskaņā ar (23). Sarkanā līnija ir trīs standartnovirzes virs vidējās vērtības, kas kalpo kā bojājumu noteikšanas sliekšnis.



4.18. att. *MFCM* parametru vērtības 42 eksperimentālajiem mērījumiem.

No pirmā acu uzmetiena ir skaidrs, ka smagā mazgājamā mašīna (4.17. a) att.) rada ievērojamu ietekmi uz konstrukciju. 24. un 25. mērījumam tas parādīts kā divas joslas ar vērtību virs 25. Stiprā paplāksne ne tikai palielina masu par aptuveni 9 %, bet arī palielina lokālo stingrību. Veicot jutīguma testus, parametrs palielinājās tikai 9,8 g paplāksnei (4.17. e) att.). Visas *MFCM* vērtības veselā stāvoklī atrodas zem robežvērtības, ieskaitot vērtības, kas aprēķinātas 21.–23. un 26.–31. mērījumam, kas netika izmantoti bāzes līnijas aprēķinos.

Ievērojamas parametru izmaiņas ir panāktas, mainoties masai par aptuveni 3,6 % no kopējās sijas masas un nedaudz mainoties nenoteiktai stingrībai.

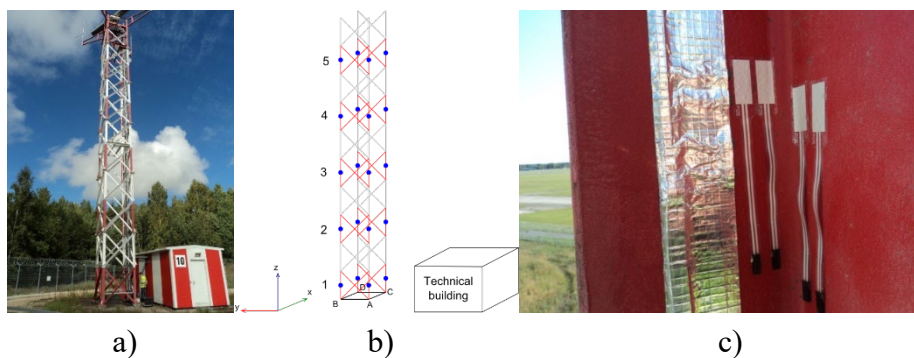
4.6. Radara tornis

Šī pētījuma mērķis ir pārbaudīt *SHM* lietošanas iespējas pilna mēroga rūpnieciskai konstrukcijai, izmantojot operatīvā modālā analīzē balstītu *SHM* sistēmu.

Testējamā konstrukcija ir radara tornis lidostā “Rīga” (4.19. att.). Tas ir 24 m augsts ar rotējošu antenu virsotnē.

Uz torņa ir 20 mērījumu punkti, kas izvietoti piecu horizontālo sekciju stūros (4.19. b) att.). 4.19. c) attēlā redzama sekcijas stūra vidusdaļa, kur uzstādīti sensori. Izvietojums ir izvēlēts katrā stūra pusē, lai reģistrētu deformāciju abos virzienos. Katrā pusē ir divi sensori, viens ir galvenais sensors, otrs – rezerves sensors, ja pirmais nedarbojas.

Sensori ir savienoti pārī ar priekšpastiprinātājiem, kas ir ievietoti ekranētā lentes kabelī (4.19. c) att.). Kabeļi savienoti ar virzības paneli (4.20. a) att.). Komutācijas panelis ļauj pieslēgt izvēlētos sensorus *DAQ* bloka ieejai (4.20. b) att.).



4.19. att. a) Radara tornis; b) punktu atrašanās vietas (zilie punkti); c) viens mērījumu punkts.

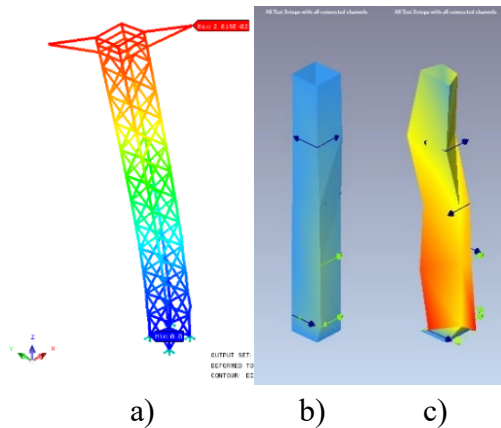


4.20. att. a) Komutācijas panelis; b) datu iegūšanas bloks.

Eksperimentu rezultāti

4.21. attēlā redzamas pirmās lieces modālās formas. 4.21. a) attēlā redzama analītiskā pirmās lieces forma Y virzienā, 4.21. b) attēlā salīdzinājumam – torņa ģeometrija līdzsvara stāvoklī, 4.21. c) attēlā – redzama eksperimentālā pirmās lieces forma. Pēdējā ir kombinētā forma lieces formām X un Y virzienā. Forma ir aplēsta kā kombinētā, jo frekvenču izšķirtspēja OMA aplēsē nav pietiekami smalka, lai varētu atdalīt divas tuvu novietotas modas. Turklāt periodiskas antenas ierosmes dēļ torņa svārstību formai ir vērpes kustība ap savu asi. Tas novērojams lielākajai daļai formu, ne tikai pirmās lieces formai. Jāatzīmē, ka eksperimentālās formas uzrāda lokālu deformāciju, ko izraisa spriegums, kas analītiskajos rezultātos ir apgriezti proporcionāls pārvietojumam. Tas vēlreiz pierāda iespēju OMA deformācijas signālus izmantot kā alternatīvu paātrinājumu.

4.4. tabulā parādīts eksperimentālo un analītisko rezultātu modālo frekvenču salīdzinājums. Atšķirības var izskaidrot arī ar to, ka tehniskajā projektā rāmja sekcijas bija 4 m augstas. Reālās sekcijas mērījumi – 3,6 m. Pilnīgi izmērīt reālā torņa izmērus nebija iespējams, tāpēc starpība starp modeli un objektu saglabājās.



4.21. att. a) Analītiskais pirmās lieces stāvoklis; b) eksperimentālais stabils stāvoklis; c) eksperimentālā pirmā liece.

4.4. tabula

Modālo frekvenču salīdzinājums

| Analītiskais | | | Eksperimentālā | |
|--------------|----------|-------------|----------------|----------|
| Moda Nr. | f , Hz | Forma | Moda Nr. | f , Hz |
| 1. | 1,92 | 1. locīšana | 1 | 2,21 |
| 2. | 2,14 | pāri | | |
| 5. | 12,11 | 2. locīšana | 4 | 12,84 |
| 6. | 12,76 | pāri | | |
| 8. | 16,47 | 1. vērpes | 6 | 16,93 |

Diskusija par eksperimentālo *SHM* sistēmu industriālā vidē

Izstrādātā eksperimentālā mērījumu sistēma ir izrādījusies rentabla, jo izmantotie materiāli ir plaši pieejami un lēti. Izmantojot mērīšanas sistēmu, ir pierādījies, ka ir piemērojama OMA pieeja, kas sastāv no vairākiem blokiem.

Mēnesi pēc eksperimenta sistēma tika pārbaudīta, OMA mērījumi veicot atkārtoti. Diemžēl daži sistēmas kanālu signāli bija bojāti. Signālu pārraide bija vai nu vāja un trokšņaina, vai arī vibrācijas signāla nebija vispār. Tika veikta mērījumu tīkla problēmu novēršana, kas neatklāja savienojamības problēmas. Tiek uzskatīts, ka vides apstākļi spēcīgi ietekmēja pārveidotāju priekšpastiprinātājus. Divi konkrēti cēloņi ir šādi:

- mitrums var radīt īssavienojumu priekšpastiprinātājā;
- spēcīgs elektromagnētiskais lauks var sabojāt priekšpastiprinātāja lauka tranzistorus (*FET*).

Pēc šīs zonas atvēršanas ap priekšpastiprinātāju tika novērots ūdens kondensāts, kas nozīmē, ka kabelis nebija pietiekami labi noslēgts. Laboratorijas apstākļos tika novērots arī tas, ka priekšpastiprinātāji dažkārt nedarbojās, pieskaroties tiem ar kailām rokām, kas varēja izraisīt statiskā sprieguma izlādi un *FET* bojājumus.

Ir acīmredzams, ka prototipa vājākā daļa ir priekšpastiprinātājs. Citi pētījumi, kas veikti šī darba gaitā, parādīja, ka priekšpastiprinātāji nav nepieciešami 3–4 m gariem vai pat garākiem lietojumiem. Tomēr joprojām nav skaidrs, vai pjezoplēves sensori var nodrošināt spēcīgu signālu desmitiem metru garumā bez priekšpastiprinātāja.

5. SECINĀJUMI

Promocijas darba mērķis bija izstrādāt *SHM* sistēmas tehnoloģiju konstrukcijām to ekspluatācijas laikā. Tehnoloģijas pamatā ir sistēmas identifikācija, izmantojot ekspluatācijas modālo analīzi, ņemot vērā konstrukciju ekspluatācijas apstākļus. Šī darba izstrādes gaitā šie apstākļi bija dažādi spēki slodžu veidā, kas iedarbojas uz konstrukciju, piemēram, helikoptera lāpstiņas modeļa dažāds rotācijas ātrums. Rezultātā tika izstrādāta jauna *SHM* sistēma, kas tika testēta, izmantojot četras dažādas sarežģītības un lieluma konstrukcijas.

SHM sistēmas izstrādes un izmantošanas process izvēlētajai struktūrai ir parādīts 2. nodaļā ceļa kartes veidā. Šie soļi ietver:

- mehāniskās procedūras – sensoru uzstādīšana, elektroinstalācija, datu ieguves sistēmas un datora ar OMA programmatūru iestatīšana;
- mērīšanas procedūras – vibrācijas reakciju mērījumu veikšana un ekspluatācijas apstākļu reģistrēšana (slodzes, rotācijas ātrums);
- metodoloģiskās procedūras – harmoniku ekstrakcija, modālo parametru novērtēšana, modālās pases piemērošana un bojājumu noteikšana.

Galvenais tehnoloģiskais risinājums ir pjezoplēves deformācijas sensoru izmantošana, kas veiksmīgi aizstāj akselerometrus kā sensorus vibrācijas signālu mērīšanai.

Pjezoplēves deformācijas sensori tiešā veidā mēra virsmas slāņa gareniskās deformācijas izstiepšanas/saspiešanas formām. Šie sensori ir ļoti plāni (tikai 28 μm), tiem ir niecīga masa un zemas izmaksas, kas ļauj izmantot lielu skaitu sensoru modālo datu iegūšanai, vienlaikus radot daudz mazākus objekta mehānisko un aerodinamisko īpašību kropļojumus. Sensorus un vadus var apvilkt ar plānu aizsargslāni, veidojot viendabīgu vienību ar konstrukciju. Pjezoplēvēm nav nepieciešama balansēšana, salīdzinot ar parastajiem rezistīvajiem deformācijas sensoriem.

Ar akselerometru un pjezoplēves sensoru palīdzību iegūto modālo formu salīdzinājums pierādīja teorētiskos pamatojumu par to, ka virsmas deformācijas, kas rodas konstrukcijas vibrāciju laikā, ir saistītas ar vibrācijas pārvietojumu un līdz ar to arī ar paātrinājumu, ko tradicionāli izmanto OMA. Testi ar sijai līdzīgu konstrukciju (helikoptera lāpstiņu) parādīja, ka lāpstiņas deformācijas lieces forma ir nobīdīta par 180° attiecībā pret pārvietojuma formu, kas liecina, ka pārvietojuma formas otrās pakāpes telpiskais atvasinājums korelē ar deformācijas formu.

Tika ierosināts un eksperimentāli apstiprināts harmonikas iegūšanas algoritms no struktūras ar periodisku ierosmes komponenti vibrācijas reakcijām uz kompozītmateriālu helikoptera lāpstiņām. Šo komponentu ekstrakcija attīrīja konstrukcijas reakcijas, samazināja signāla periodisko daļu ietekmi, ļaujot atklāt slēptas modas, kas uzlaboja kopējo modālās analīzes kvalitāti. Tika panākts uzlabojums, samazinot modālo sarežģītību par 5,5 % trīs no 10 modalitātēm, ko īpaši ietekmēja periodiskie komponenti.

Turklāt konstrukcijas reakciju un aprēķināto modālo parametru salīdzinājums pirms un pēc harmoniku ekstrakcijas ir noderīgs padziļinātai konstrukciju stāvokļa analīzei.

3.3. apakšnodalā aprakstīta ieviestā modālā lauka salīdzināšanas metode. Šī metode ir ļoti noderīga izmērīto konstrukcijas reakciju iepriekšējai analīzei bez nepieciešamības novērtēt modālo parametru. Rezultātā ar šo metodi var identificēt mērījumu, kas liecina par konstrukcijas īpašību modifikāciju neatkarīgi no tā, vai tas ir masas palielinājums vai stīvuma izmaiņas, ko izraisījuši bojājumi.

Pārbaudes ar alumīnija siju ar paplāksnēm kā papildu masām parādīja, ka *MFCM* parametra atskaites stāvokļa vērtība ir 1, veselā stāvokļa robežvērtība – 1,9 vienības. Ievērojamas parametra izmaiņas (*MFCM* vērtība ir aptuveni 3,36 vienības) tika panāktas, ja masas izmaiņas bija aptuveni 3,6 % no kopējās sijas masas un zināmas nenoteiktas stinguma izmaiņas. Tika novērots, ka paplāksnes masas palielināšana uz sijas 2,5 reizes (no 9,8 g līdz 24 g) izraisīja parametra vērtības palielināšanos aptuveni astoņas reizes (no 3,36 līdz 25–27 vienībām).

MFCM trūkums ir tas, ka tajā netiek ņemta vērā ārējo apstākļu mainība, tāpēc papildu slodze vai temperatūras izmaiņas var radīt viltus trauksmi. Tomēr šis trūkums ir novērsts, ieviešot modālo pasi.

Modālā pase ir sistēma modālo parametru novērtēšanai starp vairākiem konstrukcijas mērījumiem dažādos ekspluatācijas apstākļos. Tā ir gan datubāze esošo mērījumu datu (modālo parametru un ārējo ietekmes faktoru) glabāšanai, gan rīku kopums, kas realizēts *Excel* vai *Matlab* programmā. Galvenais bojājumu novērtēšanas rīks ir modālo parametru variācijas un tā integrētā versija *MPVI*. Tas izmanto vienkāršus aritmētiskus aprēķinus, lai novērtētu dažādu mērījumu modālās frekvences un modālo formu.

MPV tika veiksmīgi ieviests, lai noteiktu globālu defektu bojājumus uz minētā *WT* modeļa pamatnes un lokālu defektu konstrukciju pusē. Globālais defekts radīja *MPV* vērtības attiecīgi 3,4, 2,2, 2,8 un 2 % 1.–4. modai, kas bija virs 1,8 % veselā stāvokļa atsaucis līmeņa. Tajā pašā laikā vietējais defekts radīja *MPV* vērtības 1,1, 0,9, 3,3 un 1 % attiecīgi 1.–4. modai, kas liecina, ka tikai 3. modai *MPV* signalizē modālo parametru izmaiņas. Novērojot šīs modas formu, bija iespējams izdarīt secinājumus par defekta atrašanās vietu.

Tika pierādīts, ka *SHM* var veikt, izmantojot arī daudzpakāpju OMA, kas ir efektīvs veids, kā ietaupīt izmaksas. Vēl viena daudzpakāpju OMA priekšrocība ir tā, ka sistēma saņem vairāk ierosmes enerģijas, jo mērījumu laiks ir ilgāks, kas stabilizē *MPV* parametru atskaites stāvoklim. Tas nodrošina lielāku bojājumu noteikšanas precizitāti vēlākajos posmos. Testos ar vēja turbīnas laboratorijas modeli tika konstatēts, ka daudzpakāpju OMA rezultātā *MPV* parametru sākotnējās vērtības ir 1,5–2 reizes zemākas, salīdzinot ar vienreizējās OMA mērījumiem.

Modālās pases sistēma vienkāršo dažādas pētniecības un rūpnieciskās procedūras, kas saistītas ar modālo analīzi, kā tas ir ilustrēts kompozītmateriālu lāpstiņu testēšanas rezultātos 4.3. apakšnodalā. Tas ļauj identificēt atsevišķas konstrukcijas vibrācijas/deformācijas modas, izmantojot datus neatkarīgi no testa vai ekspluatācijas apstākļiem. Piemēram, var izmantot

datus, kas izmērīti ziemā vai vasarā, no nekustīgas vai rotējošas konstrukcijas, maksimāli noslogotas vai dīkstāves režīmā.

Lai prognozētu atsevišķu struktūras īpašību izmaiņas atkarībā no kāda darbības faktora, nav nepieciešams pētīt konkrētas lāpstiņas uzvedību. Pietiek tikai ar tās modālo parametru zināmā stāvoklī, pēc tam izmantojot tipiskās modālās pases ietekmes funkcijas uz minēto ekspluatācijas faktoru.

Iesniegtais tehnoloģisko un metodoloģisko risinājumu kopums ir apvienots konstrukcijas veselības uzraudzības sistēmas prototipā, kas paredzēts izmantošanai dažādos ekspluatācijas apstākļos. Tehnoloģijas pamatā esošā tehnoloģija būtu noderīga turpmākai izpētei, jo īpaši modālās pases piemērošanai dažādām konstrukcijām un temperatūras ietekmes uz modālajiem parametriem pārbaudei, kas nebija šī darba mērķis. Patlaban tiek īstenots pētniecības projekts, kurā papildus visam pārējam tiek testēta ierosinātā *SHM* sistēma ar stikla šķiedras kompozītmateriālu cilindru komplektu, kā arī tiek veikti temperatūras testi.

ATSAUCES

- [1] Y. Lin, L. Tu, H. Liu un W. Li, «Fault analysis of wind turbines in China,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sēj. 55, pp. 482-490, 2016.
- [2] «Sāremā salā nolūzusi un apgāzusies 60 metru augsta vēja turbīna,» Apollo.lv, 16 Febraury 2022. [Tiešsaiste]. Available: <https://www.apollo.lv/7455790/sarema-sala-noluzusi-un-apgazusies-60-metru-augsta-veja-turbina>. [Piekļūts 15 March 2022].
- [3] «This Day in the Aviation History - On April 1, 2011, Southwest Airlines Flight 812 suffered rapid depressurization due structural failure,» FL360aero, 1 April 2021. [Tiešsaiste]. Available: <https://fl360aero.com/detail/this-day-in-the-aviation-history-on-april-1-2011-southwest-airlines-flight-812-suffered-rapid-depressurization-due-structural-failure/155>. [Piekļūts 15 March 2022].
- [4] H. F. Zhou, H. Y. Dou, L. Z. Qin, Y. Chen, Y. Q. Ni un J. M. Ko, «A review of full-scale structural testing of wind turbine blades,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sēj. 33, p. 177–187, 2014.
- [5] B. Chen, S. You, Y. Yu un Y. Zhou, «Acoustical damage detection of wind turbine blade using the improved incremental support vector data description,» *Renewable Energy*, sēj. 156, pp. 548-557, 2020.
- [6] R. Yang, Y. He un H. Zhang, «Progress and trends in nondestructive testing and evaluation for wind turbine composite blade,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sēj. 60, p. 1225–1250, 2016.
- [7] HBM, «Structural Health Monitoring | HBM,» [Tiešsaiste]. Available: https://www.hbm.com/en/5530/structural-health-monitoring/?product_type_no=Structural%20Health%20Monitoring. [Piekļūts 24 May 2022].
- [8] SGS, «Structural Health Monitoring | SGS,» [Tiešsaiste]. Available: <https://www.sgs.com/en/industries-and-environment/power/asset-integrity-management-services/non-destructive-testing-ndt/structural-health-monitoring>. [Piekļūts 24 May 2022].
- [9] C. P. Fritzen, «Vibration-Based Structural Health Monitoring – Concepts and Applications,» *Key Engineering Materials*, Sēj. %1 no %2293-294, pp. 3-20, 2005.
- [10] N. M. M. Maia un J. M. M. Silva, *Theoretical and Experimental Modal Analysis*, Wiley, 1997.
- [11] C. Ventura un R. Brincker, *Introduction to Operational Modal Analysis*, Wiley, 2015.
- [12] M. Döhler, P. Andersen un M. Mevel, «Data Merging for Multi-Setup Operational Modal Analysis with Data-Driven SSI,» %1 *Proceedings of the IMAC-XXVIII*, Jacksonville, Florida USA, 2010.

- [13] L. Zhang, T. Wang un Y. Tamura, «A frequency–spatial domain decomposition (FSDD) method for operational modal analysis,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, sēj. 24, nr. 5, pp. 1227-1239, 2009.
- [14] M. Döhler, E. Reynders, F. Magalhaes, M. Mevel, G. De Roeck un A. Cunha, «Pre- and Post-identification Merging for Multi-Setup OMA with Covariance-Driven SSI,» %1 *Proceedings of the IMAC-XXVIII*, Jacksonville, Florida USA, 2010.
- [15] L. Zhang, M. Boeswald, D. Goge un H. Mai, «Application of Operational Modal Analysis for Wind-Tunnel Testing of an Aircraft Wing Model with Control-Surface,» %1 *IMAC XXVI conference*, Orlando, Florida, 2008.
- [16] E. Neu, F. Janser, A. A. Khatibi, C. Braun un A. C. Orifici, «Operational Modal Analysis of a wing excited by transonic flow,» *Aerospace Science and Technology*, sēj. 49, pp. 73-79, 2016.
- [17] M. L. Wymore, J. E. Van Dam, H. Ceylan un D. Qiao, «A survey of health monitoring systems for wind turbines,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sēj. 52, pp. 976-990, 2015.
- [18] S. Chauhan, «Parameter estimation algorithms in operational modal analysis: a review,» %1 *6th International Operational Modal Analysis Conference*, Gijon, Spain, 2015.
- [19] E. Bechhoefer un M. Kingsley, «A Review of Time Synchronous Average Algorithms,» %1 *Proceedings of the Annual Conference of the PHM Society 2009, Vol. 1 No. 1*, 2009.
- [20] F. B. Zahid, Z. C. Ong un S. Y. Khoo, «A review of operational modal analysis techniques for in-service modal identification,» *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, sēj. 42, nr. 398, 2020.
- [21] D. Mironovs un S. Chauhan, «Modal Parameter Estimation in multi-patch Operational Modal Analysis: Perspectives and Approaches,» %1 *35th International Modal Analysis Conference*, Garden Grove, California, USA, 2017.
- [22] Measurement Specialties, Inc., «Piezo Film Sensors Technical Manual,» Norristown, PA, 1999.
- [23] M. Electronics, «Vibration Sensors DT2-028K W/RIVETS,» Measurement Specialties, [Tiešsaiste]. Available: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/Measurement-Specialties/1-1003744-0?q=sGAEpiMZZMs29kr3d%252BndI2Ss0dvAm%252B%252B8smsI%2Fyg21D0%3D>. [Pieklūts 28 February 2022].
- [24] A. K. Pandey, M. Biswas un M. M. Samman, «Damage detection from changes in curvature mode shapes,» *J. Sound Vib.*, sēj. 145, p. 321–332, 1991.
- [25] A. Deraemaeker, «On the use of dynamic strains and curvatures for vibration based damage localization,» %1 *Proceedings of the 5th European Workshop on Structural Health Monitoring*, Sorrento, Italy, 2010.

- [26] Y. Gu, L. Long un P. Tan, «Surface strain distribution method for delamination detection using piezoelectric actuators and sensors,» %1 *Proceedings of 9th International Conference on Damage Assessment of Structures*, Oxford, UK, 2011.
- [27] E. Neu, F. Janser, A. A. Khatibi un A. C. Orifici, «Fully Automated Operational Modal Analysis using multi-stage clustering,» *Mech. Syst. Signal Pr.*, sēj. 84, pp. 308-323, 2017.
- [28] S. Ručevskis, T. Rogala un A. Katunin, «Optimal Sensor Placement for Modal-Based Health Monitoring of a Composite Structure,» *Sensors*, sēj. 22, nr. 10, 2022.
- [29] D. Solovyev, S. Dadunashvili, A. Mironov, P. Doronkin and D. Mironovs, “Mathematical Modeling and Experimental Investigations of a Main Rotor Made from Layered Composite Materials,” *Mechanics of Composite Materials*, vol. 56, no. 1, pp. 103-110, 2020.
- [30] A. Mironov, P. Doronkin, A. Prikloński un I. Kabashkin, «Structural Health Monitoring of rotating blades on helicopters,» *Aviation*, sēj. 20, pp. 110-122, 2016.
- [31] M. Derriso, C. Mc Curry un C. Chubert Kabban, «2 - A novel approach for implementing structural health monitoring systems for aerospace structures,» %1 *Structural Health Monitoring (SHM) in Aerospace Structures*, Woodhead, 2016, pp. 33-56.
- [32] D. Balageas, C.-P. Fritzen un A. Güemes, *Structural Health Monitoring*, Hoboken, New Jersey: Wiley & Sons, 2006.
- [33] «Annual Analyses of the EU Air Transport Market 2016,» European Commission, 2016.
- [34] M. Luo, H. Huo, D. Axinte un D. S. Liu, «A wireless instrumented milling cutter system with embedded PVDF sensors,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, sēj. 110, p. 556–568, 2018.
- [35] T. Bregar, B. Starc, G. Čepon un M. Boltežar, «On the Use of PVDF Sensors for Experimental Modal Analysis,» %1 *Topics in Modal Analysis & Testing, Volume 8, Proceedings of the 38th IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics 2020*, Cham, Springer, 2020.
- [36] Y. Xin, H. Sun, H. Tian, C. Guo un et al, «The use of polyvinylidene fluoride (PVDF) films as sensors for vibration measurement: A brief review,» *Ferroelectrics*, sēj. 502, nr. 1, pp. 28-42, 2016.
- [37] TE connectivity, «Piezoelectric Sensors,» TE connectivity, [Tiešsaiste]. Available: <https://www.te.com/usa-en/products/sensors/piezo-film-sensors.html?tab=pgp-story>. [Pieklūts 1 June 2022].
- [38] D. Liu, M. Luo, Z. Zhang un Y. Hu, «Operational modal analysis based dynamic parameters identification in milling of thin-walled workpiece,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, Sēj. %1 no %2167, Part A, nr. 108469, 2022.
- [39] E. L. Oliveira, N. M. M. Maia, A. G. Marto, R. G. A. da Silva un et al, «Modal characterization of composite flat plate models using piezoelectric transducers,» *Mech. Syst. Signal Pr.*, sēj. 79, pp. 16-29, 2016.
- [40] Measurement Specialties, Inc., «SDT Shielded Piezo Sensors, Technical Data,» 2009.

- [41] J. M. Haun et al, «Autocorrelation-based time synchronous averaging for condition monitoring of planetary gearboxes in wind turbines,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, Sēj. 30, no 2, pp. 270-71, 2016.
- [42] M. D. Coats, N. Sawalhi un R. B. Randall, «Extraction of tachometer information from a vibration signal for improved synchronous averaging,» %1 *Proceedings of ACOUSTICS 2009*, Adelaide, Australia, 2009.
- [43] R. Janeliukstis, R. Riva, E. Di Lorenzo, Luczak M un et al, «Comparison of wind turbine blade models through correlation with experimental modal data,» %1 *Proceedings of ISMA and USD, International Conference on Noise and Vibration Engineering and International Conference on uncertainty in Structural Dynamics*, Belgium, Leuven, 2020.
- [44] D. J. Ewins, «Model validation: Correlation for updating,» *Sadhana*, sēj. 25, pp. 221-234, 2000.
- [45] C. Devriendt, F. Presezniak, G. De Sitter, K. Vanbrabant un et al, «Structural health monitoring in changing operational conditions using transmissibility measurements,» *Shock Vib.*, sēj. 17, pp. 651-675, 2010.
- [46] A. Güemes, A. Fernandez-Lopez, A. R. Pozo un J. Sierra-Pérez, «Structural Health Monitoring for Advanced Composite Structures: A Review,» *Journal of Composites Science*, sēj. 4, nr. 1, 2020.
- [47] A. Safonovs, A. Mironov, P. Doronkin un V. Kuzmickis, «Sensitivity spread of piezo electric films used as sensors for machine and structural monitoring,» %1 *Engineering for Rural Development*, Jelgava, 2023.



Deniss Mironovs dzimis 1990. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis bakalaura grādu elektrozinātnē (2012), Dānijas Tehniskajā universitātē – maģistra grādu akustikas inženierzinātnē (2016). No 2016. līdz 2019. gadam strādājis Aviācijas pētniecības centrā, ieņemot vibrācijas inženiera un pētnieka amatu. Patlaban ir RTU pētnieks un SIA "Akukon-Būvakustika" akustikas konsultants un valdes loceklis. Mācoties Dānijā, strādājis kompānijā "Brüel & Kjær" par *Labshop* programmatūras testētāju. Zinātniskās intereses saistītas ar akustiku, vibrāciju un modālo analīzi.