

Pavithra Nagaraj

**PĒTĪJUMS PAR NOGURUMA BOJĀJUMU
NOTEIKŠANU, IZMANTOJOT MĒRĪJUMU
SISTĒMAS PAŠREIZĒJO INFORMĀCIJU**

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte
Aeronautikas institūts

Pavithra Nagaraj

Doktora studiju programmas “Transports, aviācijas inženierija”
doktorante

PĒTĪJUMS PAR NOGURUMA BOJĀJUMU NOTEIKŠANU, IZMANTOJOT MĒRĪJUMU SISTĒMAS PAŠREIZĒJO INFORMĀCIJU

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. habil. sc. ing. VITĀLIJS PAVELKO

RTU Izdevniecība
Rīga 2023

Nagaraj, P. Pētījums par noguruma bojājumu noteikšanu, izmantojot mērījumu sistēmas pašreizējo informāciju. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2023. 49 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-22" 2023. gada 28. jūnija lēmumu, protokols No. 04030-9.16.1/7.

**PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES
DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2023. gada 1. decembrī plkst. 13.00 Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6b, 513. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr. sc .ing. Sandris Ručevskis,
Rīgas Tehniskā universitāte

Ph. D. Wolfgang Grill,
Leipcigas Universitāte, Vācija

Dr. habil. sc .ing. Sergey Ignatovich,
Nacionālā Aviācijas universitāte, Ukraina

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.

Pavithra Nagaraj (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, xx attēli, xx tabulas, xx pielikumi, kopā xxx lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir xxx nosaukumi.

Saturs

IEVADS.....	5
Tēmas aktualitāte.....	5
Promocijas darba mērķis un uzdevumi	6
Zinātnisko pētījumu novitāte	7
Darba praktiskais lietojums	7
Promocijas darba struktūra, tā galvenie rezultāti	7
Secinājumi.....	8
Pētījuma metodoloģija.....	9
Publikācijas un promocijas darba aprobācija.....	10
Autora ieguldījums publikācijās.....	10
1. NODAĻA. PĀRSKATS: ULTRASKAŅAS METODES SHM, JAUNĀKIE SASNIEGUMI UN JAUNĀKO PĒTĪJUMU PĀRSKATS	11
2. NODAĻA. PJEZOELEKTRISKĀ PĀRVEIDOTĀJA SPĒKS SHM	12
2.1. Sikāks problēmas apraksts	12
2.2. Pārveidotāja iznīcināšanas būtiskākie rezultāti noguruma testa laikā.....	13
2.3. Plānsienu konstrukcijā iebūvētu devēju sprieguma stāvokļa izpēte.....	15
3. NODAĻA. AKTĪVĀS SHM METODES, IZMANTOJOT ULTRASKAŅAS TEHNIKAS.....	18
3.1. Elektromehāniskā pretestība kā plaisu noteikšanas un slodzes uzraudzības primārā metode.....	18
3.2. Citi uz elektromehānisko impedanci (<i>EMI</i>) balstītas SHM sistēmas rādītāji	21
3.3. Eksperimentāls pētījums par plaisu atvēršanās/aizvēršanās efektu un tā izmantošanas perspektīvas SHM (konstrukciju veselības monitoringā).....	23
3.4. Testa paraugs, aprīkojums un testa uzstādīšana	23
3.5. Galvenie rezultāti	24
3.6. SHM (konstrukcijas veselības monitoringa) lietojums hermētiskas fizelāžas konstrukcijas apvalkam.....	26
3.7. Noguruma plaisu augšanas prognozes un kalpošanas laika novērtējums.....	27
4. NODAĻA. CITI LIETOJUMI SLODZES UZRAUDZĪBA UN AKUSTISKĀ EMISIJA.....	29
4.1. Saistītais lietojums.....	29
4.2. Slodzes uzraudzība, izmantojot <i>PZT</i> reakciju.....	30
4.3. Ekvivalentā sprieguma un noguruma robeža	36
4.4. Dzīves cikla lietošanas slodzes monitoringa SHM izturības varbūtības modelis.....	39
4.5. Akustiskā emisija	41
4.6. Daži pasīvās SHM sistēmas pilna mēroga testa rezultāti, izmantojot akustisko emisiju (<i>AE</i>).....	43
5. VISPĀRĒJIE SECINĀJUMI	46
BIBLIOGRĀFIJA.....	47

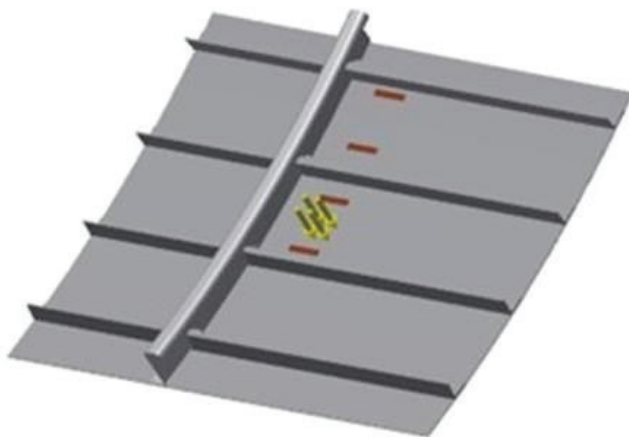
IEVADS

Tēmas aktualitāte

Ultraskaņas diagnostikas tehnoloģijas tiek plaši lietotas civilajās darbībās, medicīnā, aviācijā un daudzās citās jomās. Ultraskaņas metode kā mērījumu pamatprincips ir viena no vispiemērotākajām *SHM* sistēmai. Būtiska ultraskaņas metodes priekšrocība ir daudzfunkcionāla lietojuma iespēja (klasiskā bojājumu noteikšana, virsmas viļņu tehnoloģija, elektromehāniskā (*EMI*) tehnoloģija, sprieguma un slodzes mērīšana). Katru no šīm iespējām var optimāli piemērot dažos konkrētos apstākļos, taču var izmantot arī kombinētu lietojumu.

Tomēr pastāv vairākas problēmas, kas negatīvi ietekmē rezultātu ticamību un iekšējās uzraudzības efektivitāti. Pirmkārt, tā ir *SHM* sistēmas jutīgo elementu mehāniskās izturības un kalpošanas laika problēma. Atšķirībā no nesagraujošās testēšanas (*NGT*) šie *SHM* sistēmas elementi ir iebūvēti konkrētā konstrukcijā un pakļauti tādai pašai ekspluatācijas slodzei un vides iedarbībai kā konstrukcijas galvenā sastāvdaļa. Degradācijas procesi var izraisīt daļēju vai pilnīgu *SHM* sistēmas darbības zudumu. Šo problēmu daļēji var atrisināt, aizsargājot jutīgos elementus no negatīvām ārējām darbībām. Vēl viens veids, kā palielināt monitoringa uzticamību, ir izmantot tā saukto "bezatsauces" pieeju konstrukcijas elementa bojātā stāvokļa novērtēšanai. Šī pieeja apvieno iespējas, kurās tehniskā stāvokļa novērtējuma pamatā ir pašreizējā vai uzkrātā informācija bez atsauces uz sākotnējo stāvokli (bāzes līniju). Attiecībā uz noguruma plaisām ir zināms, ka ultraskaņas monitoringa sistēmas reakcija ir atšķirīga mehāniskās slodzes stāvoklī (plaisa ir atvērta) un bez slodzes (plaisa ir slēgta). Otrā stāvokļa reakciju var uzskatīt par pašreizējo bāzes līniju.

Promocijas darbā pētītās minētās pieejas realizācijas problēmas attiecībā uz metāla fizelāžas hermētiskās daļas apvalku (1. att.). Kreisēšanas lidojuma laikā virsējo slāni statistiski noslogo iekšējais gaisa spiediens kabīnē, bet pēc nosēšanās virsējais slānis tiek atslogots.



1. att. Tipiska metāla fizelāžas daļa, kas aprīkota ar pjezokeramikas devējiem.

Acīmredzot slodzes uzraudzība ir netiešs veids, kā novērtēt konstrukcijas strukturālo stāvokli. Šo aplēsi var iegūt, izmantojot pieņemamu vispārinātu bojājuma parametru, ko nosaka pēc slodzes monitoringa rezultātiem, salīdzinot to ar kontrolējamā konstrukcijas elementa stiprības raksturlielumiem. Bojājumu indeksa kritisko vērtību var noteikt saskaņā ar drošības koeficienta pieeju.

Alternatīva ir varbūtības pieeja. Abi salīdzinātie lielumi ir nejauši. Tāpēc bojājumu indeksam jābūt ar varbūtības formulējumu, un tas jāuztver kā prasība papildus pārbaudīt un novērtēt attiecīgā konstrukcijas elementa tehnisko stāvokli. Darbā ir izstrādāta šāda veida procedūra un izklāstīts tās fundamentālais fragments.

Līdzīgs pjezoelektriskā pārveidotāja pasīvās reakcijas izmantošanas gadījums ir akustiskās emisijas monitoringa. To var efektīvi izmantot izturības noguruma testos.

Tātad visas minētās problēmas tieši ietekmē ultraskaņas SHM sistēmu darbību un uzticamību. To izpēte un risinājumi ir aktuāli mūsdienu lietišķajā zinātnē.

Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Pētījuma vispārējais mērķis

Vairāku svarīgu problēmu analīze un risinājumi attiecībā uz ultraskaņas konstrukciju tehnisko stāvokli, uzraudzības operativitāti un uzticamību, galvenokārt izmantojot pašreizējo informāciju par iebūvētajiem pjezokeramiskajiem devējiem, kas darbojas aktīvajā un pasīvajā bojājumu noteikšanas režīmā.

Lai sasniegtu darba mērķi, jāatrisina vairāki uzdevumi. Pjezokeramisko pārveidotāju stiprības analīze, izmantojot interneta resursus, eksperimentālos datus un galīgo elementu analīzi (GEA) sprieguma stāvoklim tipiskai uzstādīšanai un tipiskai ekspluatācijas slodzei. Ieteikumu izstrāde bojājumu novēršanai pie statiskās un cikliskās slodzes.

1. Elektromehāniskā (*EMI*) tehnoloģija kā galvenā noguruma plaisu noteikšanas metodes novērtēšana, alternatīvu bojājumu indeksu īpašību salīdzinājums, detalizētas mērījumu datu apstrādes procedūras izstrāde.
2. Plaisas atvēršanas/aizvēršanas ietekme uz *EMI* izpēti, šīs ietekmes piemērotības novērtējums plaisas tipa bojājumu noteikšanai.
3. Bojājumu indikatoru uzlabošana plaisas tipa bojājumu noteikšanai, izmantojot virsmas viļņu tehnoloģiju, noguruma testu datus un simulācijas rezultātus.
4. *SHM* bezatsauces virtuālās sistēmas izmantošanas demonstrācija (lidmašīnas hermētiskās fizelāžas apvalkam).
5. Pjezoelektriskā pārveidotāja lietojuma analīze slodzes uzraudzībai. Noguruma bojājumu indeksa izstrāde, izmantojot lietus plūsmas metodi ekspluatācijas slodzes transformācijai un drošības koeficienta koncepciju.
6. Iespējamais izturības modelis kalpošanas laika *SHM*, izmantojot slodzes monitoringu.

7. Akustiskās emisijas (AE) kā pasīvās ultraskaņas metodes lietošanas analīze attiecībā uz tās izmantošanu gaisakuģu pilna izmēra sastāvdaļu laboratorijas testos.

Zinātnisko pētījumu novitāte

1. Atrastas jaunas statistiskās īpašības par tipisku pjezokeramikas pārveidotāju noguruma ilgumu.
2. Pjezokeramisko devēju sprieguma stāvokļa vispārējās īpašības dažādos to iestrādes variantos kontrolējamajā konstrukcijas elementā un ieteikumi par stiprības nodrošināšanu pie darba slodzes.
3. Plaisas atvēršanas/aizvēršanas ietekme uz bojājumu ultraskaņas indeksu ir *SHM* sistēmas bez atskaites teorētiskais pamats, kurā tiek izmantoti tikai devēja pašreizējie dati.
4. Jauna *EMI* mērījumu apstrādes procedūra, kas ietver datu kopas loga platumu izvēli un bojājumu indeksa augstākās stabilitātes frekvenču joslas noteikšanu.
5. Jauns bojājumu indekss noguruma plaisu noteikšanai, izmantojot virsmas viļņu tehnoloģiju (*GWT*). Šis rādītājs ir atbildes reakcijas konvolūcija ar ierosmes signālu kā mātes funkciju.

Darba praktiskais lietojums

1. Iegūtie reālistiskie aprēķini par tipiska pjezokeramikas pārveidotāja izturību un noguruma ilgumu ir noderīgi, lai projektētu *PZT* balstītu *SHM* sistēmu.
2. Uzlabotā *EMI* mērījumu apstrādes procedūra var paaugstināt bojājumu noteikšanas ticamību.
3. Ierosinātais bojājumu indekss *SHM GWT* nodrošina lielāku konstrukcijas bojājumu noteikšanas uzticamību un precizitāti.
4. Hipotētiskās *SHM* sistēmas piemērs hermētiskas fizelāžas apvalkam var būt noderīgs vietējās *SHM* sistēmas projektēšanā.
5. Pjezokeramikas devēja reakcijas tieša simulācija kā svarīgs slodzes (sprieguma) monitoringa izmantošanas posms.
6. Formulētas tehniskās pamatprasības helikopteru testēšanai standā un pilna mēroga reāllaika testēšanai, izmantojot akustisko emisiju (AE) kā pasīvo ultraskaņas metodi. To var efektīvi izmantot izturības noguruma testos.

Promocijas darba struktūra, tā galvenie rezultāti

Promocijas darbā ir četras nodaļas.

1. nodaļā sniegts pārskats par ultraskaņas metodēm, jaunākajiem sasniegumiem jaunākajiem pētījumiem.

2. nodaļā analizēta pjezoelektrisko devēju mehāniskā izturība un to savienojums ar kontrolējamo konstrukciju kā galvenā gaisakuģu konstrukciju SHM uzticamības problēma, kas apkopota 4. publikācijā, kurā aplūkotas trīs galvenās tēmas:

- 1) detalizētāks problēmas apraksts;
- 2) pārveidotāju iznīcināšanas būtiskākie rezultāti noguruma testa laikā;
- 3) plānsienu konstrukcijā iebūvētu devēju sprieguma stāvokļa izpēte.

3. nodaļā analizētas aktīvās SHM metodes, izmantojot ultraskaņas paņēmienus, un apkopoti 3. un 4. publikācijā iekļautie galvenie temati:

- 1) elektromehāniskā pretestība, tās komponenti un *EMI* parametri;
- 2) citi *EMI* balstītas SHM sistēmas rādītāji;
- 3) eksperimentāls pētījums par plaisu atvēršanās/aizvēršanās efektu un tā izmantošanas perspektīvas SHM jomā;
- 4) eksperimentālās izmeklēšanas mērķis;
- 5) testa paraugs, aprīkojums un testa iestatīšana;
- 6) eksperimenta būtiskākie rezultāti;
- 7) analizēts SHM lietojums fizelāžas hermētiskuma apvalkam. Pretestība demonstrēta, balstoties fizelāžas hermētiskuma apvalkā;
- 8) noguruma plaisu augšanas prognozēšana un kalpošanas laika novērtēšana.

4. nodaļā analizēti dažī nublicēti pētījumu rezultāti un apkopota 1. un 2. publikācija, kurā aplūkotas piecas tēmas:

- 1) saistītie lietojumi;
- 2) slodzes uzraudzība, izmantojot *PZT* reakciju;
- 3) ekvivalents sprieguma un konstrukcijas stāvokļa novērtējums, izmantojot slodzes (sprieguma) monitoringu;
- 4) iespējamais izturības modelis kalpošanas laika SHM, izmantojot slodzes monitoringu;
- 5) akustiskā emisija kā ultraskaņas pasīvā metode.

Secinājumi

1. Izmantojot interneta resursus, eksperimentālos datus un galīgo elementu analīzi (GEA), ir veikta pilnīga pjezokeramisko pārveidotāju stiprības analīze tipiskai uzstādīšanai un tipiskai ekspluatācijas slodzei. Sniegti ieteikumi statiskās un cikliskās slodzes bojājumu novēršanai.
2. Veikts *EMI* novērtējums kā galvenā noguruma plaisu noteikšanas metode. Veikts alternatīvu bojājumu indeksu īpašību salīdzinājums. Izstrādāta detalizēta mērījumu datu apstrādes procedūra.
3. Pētīta plaisas atvēršanas/aizvēršanas ietekme uz *EMI*, novērtējot šīs ietekmes piemērotību plaisas tipa bojājumu noteikšanai.
4. Izstrādāti divi uzlaboti bojājumu indikatori plaisas tipa bojājumu noteikšanai, izmantojot vadāmo viļņu tehnoloģiju. Abas bojājumu indikācijas (*RMSD* un lidojuma laiks) balstītas atbildes signāla konvolūcijā, kurai ierosmes signāls tiek izmantots kā mātes funkcija.

5. Demonstrēts *SHM* bezatsauces virtuālās sistēmas lietojuma piemērs (pasaižieru lidmašīnas hermētiska fizelāžas apvalka gadījumā). Var secināt, ka hermētiskā fizelāžas konstrukcija ir ļoti ērta joma konstrukcijas veselības uzraudzības ultraskaņas tehnoloģijas lietošanai, kas izmanto plaisu atvēršanas/aizvēršanas efektu.
6. Analizēts pjezoelektriskā pārveidotāja lietojums slodzes uzraudzībai. Izstrādāts noguruma bojājumu indekss, izmantojot lietus plūsmas metodi ekspluatācijas slodzes skaitīšanai, noguruma testu datus un simulācijas rezultātus. Indeksa pieļaujamo vērtību galvenokārt nosaka drošības koeficients.
7. Izmantojot slodzes monitoringu, sniegts izturības varbūtības modelis kalpošanas laika *SHM*, izmantojot slodzes monitoringu. Izmantojot šo modeli, iespējams atrisināt problēmu, kā pareizi noteikt maksimāli pieļaujamo parametru vai diagnostikas zīmi indikācijai pilotu kabīnē, ja iepriekš ir zināma tās faktiskās vērtības iepriekš noteiktā robeža.
8. Analizēts akustiskās emisijas (AE) kā pasīvās ultraskaņas metodes lietojums, ņemot vērā tās izmantošanu gaisakuģu pilna izmēra sastāvdaļu laboratorijas testos. Formulētas stenda testa tehniskās pamatprasības helikopteru pilna mēroga testēšanai reālajā laikā. Stenda testu rezultātus var izmantot helikopteru elementu resursu aprēķinos saskaņā ar īstermiņa stiprības un izturības kritērijiem.

Pētījuma metodoloģija

Pētījums ir pilnībā vērsts uz noguruma bojājumu noteikšanas izpēti, izmantojot pjezoelektrisko pārveidotāju parādību. Pētījums ir vērsts divos virzienos – aktīvās un pasīvās vadāmo viļņu izplatīšanās metodes.

Pirmkārt, tika veiktas pirmās noguruma bojājumu iznīcināšanas eksperimentālās metodes. Šajā eksperimentā uzdevums bija novērtēt paneļa noguruma izturību, kā arī *Lamb* viļņu tehnoloģijā balstītās monitoringa sistēmas efektivitāti. Šim nolūkam uz uzlikas virsmas paralēli stiegras asij katrā pusē tika uzstādītas divas grupas pa pieciem pjezoelektriskiem devējiem *PIC 151* (izmērs – $0,5 \times 10 \times 50$ mm). Noguruma plaisas rašanās stadijā periodiski (pēc 20 tūkstošiem ciklu) tika uzraudzīts pārveidotāju tehniskais stāvoklis, izmērot to elektromehānisko pretestību un salīdzinot to ar vērtību pirms testu sākuma (bāzes līnija).

Otrkārt, tika veikta galīgo elementu analīze, izmantojot *COMSOL Multiphysics* programmatūru ar pētījuma variantu *Stationary*. Modelim ir dubultā aksiālā simetrija koordinātu plaknē *xz*, tāpēc sprieguma analīzes rezultāti ir attēloti vienai modeļa ceturtdaļai. Tika attēlots vispārējais spriegumu sadalījuma skats (fon Mizes ekvivalentā sprieguma formā) un modeļa deformētā forma pie stiepes gariskās slodzes.

Treškārt, šī modeļa pamatinstruments ir sistēmas “uzņēmēja struktūra – *PZT*” dinamiskās reakcijas modālā analīze, un tiek iegūti galīgie *EMI* vienādojumi. Kā redzams, šis modelis tieši izmanto konstrukcijas modālās analīzes rezultātus un ir neatkarīgs no konstrukcijas konfigurācijas, robežstāvokļiem un ārējās slodzes,

kas ir galvenā *EMI* modeļa priekšrocība. Šajā pētījumā modālā analīze tiek veikta ar *COMSOL Multiphysics*, un tās rezultāti tiek pārnesti uz *MATLAB*, kurā tiek realizēts *EMI* modeļa algoritms.

Lai demonstrētu impedancē balstītu hermētiskās fizelāžas apvalka *SHM*, ģeometriskā modelēšana tiek veikta *Autodesk Inventor* programmā.

Lai atrisinātu pjezoelektriskuma problēmu jebkurai lineārai pjezoelektriskajai ierīcei veidojošā sakarībā tenzoriālā formā, tiek izmantoti pjezoelektriskie vienādojumi saspīestā formā.

Izmantojot Gausa sadalījuma likumu, tiek analizēts matemātiskais modelis noguruma bojājumu indeksa konstruēšanas varbūtiskajai pieejai.

Publikācijas un promocijas darba aprobācija

Konferenču materiālos ir iekļauti pilni *Scopus* un *Web of Science* datubāzē indeksēto referātu teksti.

1. Urbaha, M., Carjova, K., Nagaraj, P., Turko, V. Prasības helikoptera asmens konstrukcijas noguruma testēšanai. Publicēts: *Transport Means* 2018: 22. starptautiskās zinātniskās konferences materiāli, Lietuva, Traķi, 2018. gada 3.–5. oktobris. Kauņa: Kauņas Tehnoloģiju universitāte, 2018, 1268.–1270. lpp ISSN 1822- 296X. e-ISSN 2351-7034.
2. Nedelko, D., Urbahs, A., Urbaha, M., Carjova, K., Turko, V., Nagaraj, P. Veselības pazīmju robežu novērtējums un helikoptera pārraides lietošanas uzraudzības sistēma. *Procedia Computer Science*, 2019. 149. sējums, 252–257. ISSN 1877-0509. Pieejamsno: Doi: 10.1016/j.procs.2019.01.131.
3. Nagaraj, P., Pavelko, V. Plaisas atvēršanas/aizvēršanas ietekme uz impedanci balstītu konstrukciju veselības monitoringa sistēmā. Publicēts: *TRANSBALTICA 2022: TRANSBALTICA XIII: Transporta zinātne un tehnoloģija*, 797.–805. lpp, Lietuva, Viļņa, 2022. gada 15.–16. septembris. Lietuva: Springer, Cham, 2023, 797-805. lpp. ISBN 978-3-031-25866. e-ISBN 978-3-031-25863-3. Pieejams no: Doi:10.1007/978- 3-031-25863-3_78.
4. Vitalijs Pavelko, Pavitra Nagaraj “Par fizelāžas hermētiski noslēgtās daļas apvalka strukturālās veselības uzraudzības (*SHM*) kombinēto sistēmu”. Semināri Varšavā, Polijā, 2022. gada novembrī, raksts tiks publicēts.

Autora ieguldījums publikācijās

Visas zinātniskās publikācijas ir tapušas sadarbībā ar darba vadītājiem – profesoru Vitāliju Pavelko un bijušo institūta direktoru profesoru Aleksandru Urbahu (1958–2019). Darbu pie zinātniskajām publikācijām kolektīvi plānoja un to veica autori.

1. NODAĻA.

PĀRSKATS: ULTRASKAŅAS METODES *SHM*, JAUNĀKIE SASNIEGUMI UN JAUNĀKO PĒTĪJUMU PĀRSKATS

Tas, ka *SHM* sensori un izpildmehānismi ir pastāvīgi piestiprināti pie konstrukcijas, atšķirībā no tipiskām *NDT* sistēmām, ļauj sistēmai vākt datus praktiski nepārtraukti visu konstrukcijas kalpošanas laiku bez cilvēka līdzdalības. Parasti sistēmai ir nepieciešams ļoti liels skaits sensoru, kas izkaisīti pa visu ēku, lai tā būtu noderīga. Šis milzīgais datu apjoms ir jāanalizē nepārtraukti un automātiski, lai lietotājs (gaisa kuģa inženieris vai tehniskās apkopes speciālists) saņemtu brīdinājumus par pārslodzi, atklātiem bojājumiem vai izveidotu kumulatīvus struktūras noguruma ziņojumus. [1]

Jaunākie sasniegumi pjezoelektrisko pārveidotāju jomā *SHM* lietojumiem ir šādi:

- 1) viedie pjezoelektriskie materiāli: izstrādāti jauni pjezoelektrisko materiālu veidi, kas var pielāgoties videi, tādējādi uzlabojot veiktspēju un uzticamību dažādos apstākļos. Piemēram, ir izstrādāti pjezoelektriskie materiāli, kas spēj paši diagnosticēt un labot nelielas plaisas, kas var uzlabot devēja ilgmūžību;
- 2) elastīgi pjezoelektriskie pārveidotāji: izstrādāti elastīgi un pielāgojami pjezoelektriskie pārveidotāji, kas var pielāgoties sarežģītām virsmām un uzlabot defektu noteikšanas precizitāti izliektās vai neregulārās ģeometrijās;
- 3) daudzfunkcionāli pjezoelektriskie pārveidotāji: šie pārveidotāji var veikt vairākas funkcijas, piemēram, uztveršanas, iedarbināšanas un enerģijas savākšanas funkcijas. Piemēram, ir izstrādāti pjezoelektriskie devēji, kas var ģenerēt enerģiju no konstrukcijas vibrācijām, ko var izmantot, lai darbinātu *SHM* sistēmu vai citas gaisa kuģa ierīces;
- 4) bezkontakta pjezoelektriskie devēji: ir izstrādāti bezkontakta pjezoelektriskie devēji, kuriem nav nepieciešams fizisks kontakts ar struktūru. Šie pārveidotāji izmanto ar gaisu saistītus ultraskaņas viļņus, lai noteiktu defektus struktūrā, kas var būt noderīgi kompozītmateriālu vai grūti pieejamu struktūru pārbaudei.

Kopumā šie pjezoelektrisko pārveidotāju sasniegumi var uzlabot aviācijas un citu lietojumu *SHM* sistēmu precizitāti, uzticamību un efektivitāti.

Lai gan pjezoelektriskie pārveidotāji (*PZT*) tiek plaši izmantoti un ir piedzīvojuši daudzus attīstības lēcienus, joprojām pastāv vairāki izaicinājumi un problēmas, kas jārisina *PZT* tehnoloģiju jomā, tostarp:

- 1) temperatūras stabilitāte: *PZT* materiāliem, mainoties temperatūrai, mainās pjezoelektriskās īpašības, kas var izraisīt mērījumu kļūdas *SHM* lietojumos. *PZT* materiālu temperatūras stabilitātes uzlabošana ir liels izaicinājums;
- 2) vides izturība: *PZT* materiāli ir jutīgi pret mitrumu un citiem vides faktoriem, kas laika gaitā var izraisīt degradāciju. Lai uzlabotu *PZT* pārveidotāju

ilgmūžību un uzticamību, pētnieki pēta jaunus pārklājumus un iepakojuma materiālus, kas var aizsargāt pārveidotājus no nelabvēlīgas vides;

3) jutība pret savienošānu: *PZT* devējus parasti piestiprina pie konstrukcijas, izmantojot līmes, un līmēšanas process var ietekmēt devēja veiktspēju. Pētnieki pēta jaunus savienošanas paņēmienus, kas var uzlabot sasaisti starp pārveidotāju un struktūru un samazināt savienošanas procesa ietekmi uz pārveidotāja veiktspēju;

4) nelineāra uzvedība: *PZT* materiāliem piemīt nelineāra uzvedība, ja tie tiek pakļauti augstas amplitūdas signāliem, kas var izraisīt izkropļojumus un citas mērījumu kļūdas. Pētnieki pēta jaunas signālu apstrādes un datu analīzes metodes, kas var ņemt vērā *PZT* pārveidotāju nelineāro uzvedību.

Kopumā šie izaicinājumi un problēmas uzsver nepieciešamību turpināt *PZT* tehnoloģijas pētniecību un attīstību, lai uzlabotu *PZT* pārveidotāju veiktspēju, uzticamību un precizitāti *SHM* lietojumos.

2. NODAĻA.

PJEZOELEKTRISKĀ PĀRVEIDOTĀJA SPĒKS *SHM*

2.1. Sikāks problēmas apraksts

Ļoti svarīga ir veselības strukturālās uzraudzības sistēmas elementu pašu uzticamības problēma. Uzraudzības sistēmās, kuru pamatā ir ultraskaņas noteikšana, šī problēma ir īpaši aktuāla pjezoelektriskajiem devējiem. Zināms, ka šie elementi ir iebūvēti konstrukcijā un ekspluatācijas procesā tiek pakļauti tādām pašām ārējām ietekmēm kā galvenā konstrukcija. Pirmkārt, tā ir dinamiska slodze, kas ekstremālu pārslodžu gadījumā var izraisīt devēja bojājumus vai pilnīgu iznīcināšanu. Ilgstoša mainīgo slodžu iedarbība var izraisīt noguruma plaisas jutīgajos devēju elementos un to savienojumā ar konstrukciju. Dažāda rakstura novecošanās procesi, korozija, temperatūras iedarbība var izraisīt defektus pārveidotājos vai daļēju to funkcionālo īpašību zudumu. Pastāv profilakses un aizsardzības metodes pret nelabvēlīgu ārējo ietekmi. Taču steidzamākā ir pārveidotāju izturības un noguruma ilgizturības problēma. Zināms, ka populārākais pārveidotāju materiāls ir pjezokeramika. Zināms [2] arī tas, ka pjezokeramikai ir pietiekami augsta spiedes izturība (aptuveni 600 MPa) un salīdzinoši zema stiepes (aptuveni 45 MPa) un lieces (aptuveni 80 MPa) izturība. Tajā pašā laikā, lai nodrošinātu efektīvu stiprības defektu noteikšanu, devējiem jābūt iestrādātiem konstrukcijā, kas visbiežāk ir pakļauta stiepes spriegumam. Vienkāršākais veids, kā izvairīties no pēkšņas sagraušanas vai noguruma bojājumiem, ir uzstādīt devējus saspiestās vai vāji noslogotās stieptās konstrukcijas daļās. Jebkurā gadījumā ir nepieciešama teorētiska un eksperimentāla slodzes apstākļu analīze un drošu slodžu noteikšana pjezokeramiskajiem pārveidotājiem. Darbā [3] ir pētīti tipiska *PPT*, kas uzstādīts uz gultņa parauga virsmas, darbības zuduma apstākļi, darbojoties statistiskām un noguruma slodzēm. Pētījuma rezultātus var izmantot

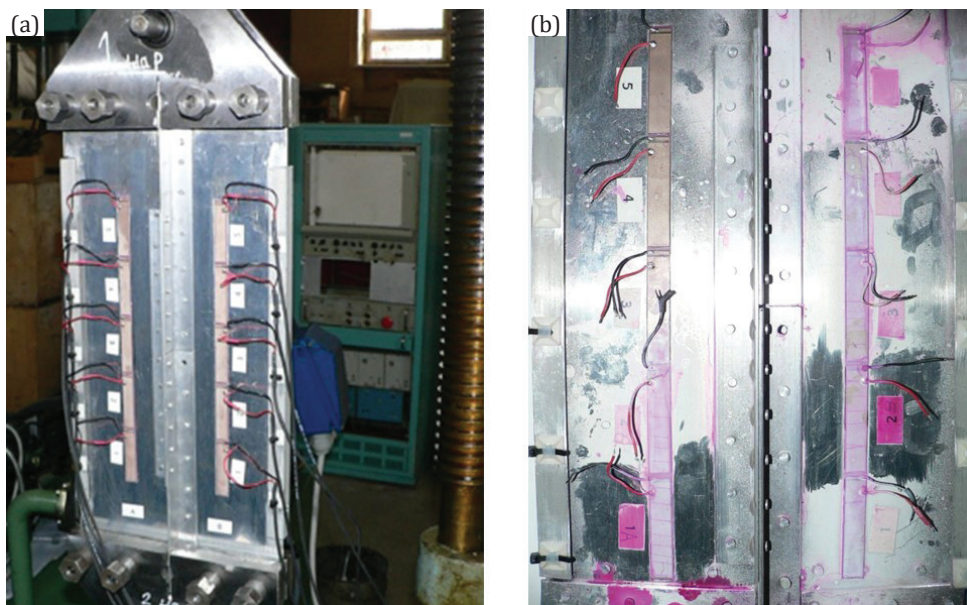
attiecībā uz kvadrātveida pārveidotājiem plaknē (7 mm × 7 mm), kas pielīmēti pie plānsienu konstrukcijas elementa. Darbā [4] ir sniegti izturības testu rezultāti, kas veikti, izmantojot kompozītmateriālu paneļos iestrādātus *PZT* pārveidotājus, kas pakļauti stiepes statiskai un cikliskai slodzei. Darbā [3] ir parādīts, ka pjezokeramikas sensori joprojām labi darbojas, ja tie ir pielīmēti pie galvenajām konstrukcijām ar stiepes deformāciju līdz 4000 $\mu\epsilon$, izmantojot optimālu līmi. Cits *PZT* aizsardzības no noguruma veids ir ierosināts un izstrādāts [5–6]. Tā pamatā ir atlikušo spiedes spriegumu lauka radīšana devējā. Pjezokeramikas izturības un noguruma problēmas mehāniskās un elektriskās slodzes apstākļos analizētas [7].

Šis īsais pārskats parāda, ka ir jāveic īpaša projektēšanas procedūra, lai nodrošinātu *PZT* balstītas *SHM* sistēmas drošu darbību ekspluatācijā. Vēl viens specifisks turpmākās analīzes mērķis ir *PZT* taisnstūra formas stiprības problēmu izpēte.

2.2. Pārveidotāja iznīcināšanas būtiskākie rezultāti noguruma testa laikā

2.1. attēlā ir parādīts aeronavigācijas paneļa piemērs, kurā ir plāns apvalks, ko balsta leņķveida šķērsriezuma stiegrojums. Paneļa darba daļas izmēri: platums – 200 mm, garums – 380 mm, loksnes biezums – 1,15 mm. Stiegrojums ir izgatavots no standarta leņķveida profila 20 mm × 20 mm × 1,5 mm. Apvalka materiāls ir alumīnija sakausējums 2024-T3. Arī stiegrojuma materiāls ir alumīnija sakausējums.

Stiegrojumam ir gareniskais tehnoloģiskais savienojums. Abas stiegrojuma daļas ir savienotas viena ar otru un apvalku ar kniedes savienojumu. Šādā



2.1. att. Noguruma testam sagatavotais un uz mašīnas *GRM-20* uzstādītais panelis (attēlā pa kreisi) un paneļa skats pēc penetrācijas testa, lai noskaidrotu plaisu *PZT* devējos.

konstrukcijā ir neizbēgams nevienmērīgs bīdes spēku sadalījums uz kniedēm, kas ir potenciāls samazinātas noguruma izturības iemesls. Šajā eksperimentā uzdevums bija novērtēt paneļa noguruma izturību, kā arī *Lamb* viļņu tehnoloģijā balstītās monitoringa sistēmas efektivitāti. Šim nolūkam uz uzlikas virsmas paralēli stiegras asij katrā pusē tika uzstādītas divas grupas pa pieciem pjezoelektriskiem devējiem *PIC 151* (izmērs – 0,5 mm × 10 mm × 50 mm).

Paneļa cikliskā slodze ar 10 Hz frekvenci tika veikta ar maksimālo spriegumu paneļa šķērsgrīzumā 150 MPa un minimālo cikla spriegumu 50 MPa. Noguruma plaisas rašanās stadijā periodiski (pēc 20 tūkstošiem ciklu) tika uzraudzīts pārveidotāju tehniskais stāvoklis, izmērot to elektromehānisko pretestību un salīdzinot to ar vērtību pirms testu sākuma (bāzes līnija).

Pēc 60 000 cikliem *EMI* mērījumi parādīja, ka tikai trīs devēji palika pilnībā darbaspējīgi. Pieci pārveidotāji bija bojāti (parasti ar vairākām plaisām), pilnībā

1. tabula

PZT pārveidotāju bojājumu statistika

<i>PZT</i> Nr.	1		2		3		4		5	
Grupās <i>ID</i>	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Kvalitāte	b	s	b	b	s	b	g	s	g	b
Plaisu daudzums	8	1	6	6	1	7	-	1	-	6

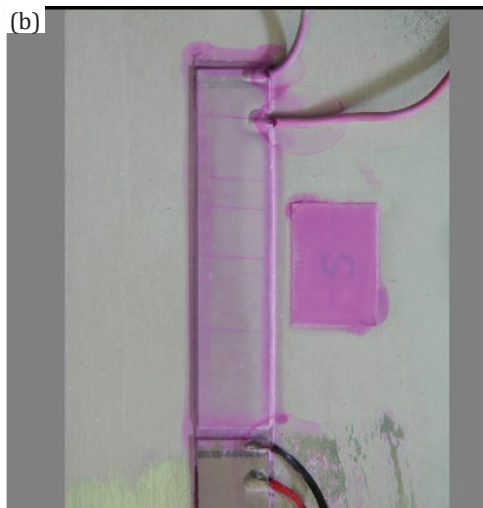
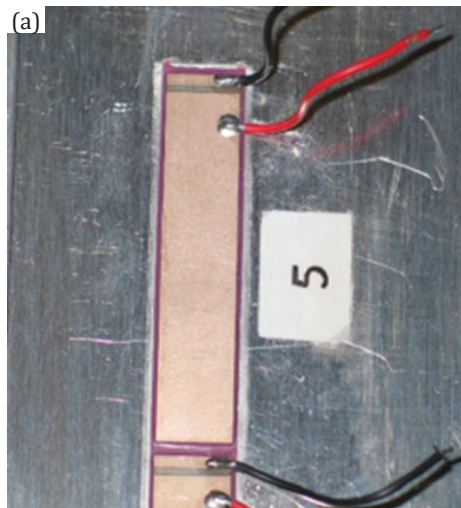
Grupās *ID*: 1 – kreisās puses vertikālā grupa;

2 – labās puses vertikālā grupa.

Kvalitāte: g – pilnīga darbaspēja;

s – daļēja darbaspēja;

b – pilnīgs darbaspējas zudums.



2.2. att. *PZT* Nr. 5 skats pirms (a) un pēc (b) noguruma testa un plaisu novērtēšanas ar penetrācijas metodi.

zaudējot funkcionālās īpašības. Atlikušajiem diviem devējiem nebija redzamu bojājumu, izmantojot izmantoto noteikšanas metodi, un tie daļēji saglabāja spēju reaģēt uz ārējo ierosmi. Tomēr dinamiskā reakcija uz trieciena spēku ievērojami atšķīrās no bāzes līnijas. Zaudējumu statistika ir parādīta 1. tabulā.

2.2. attēlā redzams labās grupas devējs (Nr. 5) pirms noguruma testa sākuma (attēlā pa kreisi) un pēc tā pabeigšanas (attēlā pa labi). Uz sensora virsmas pēc testiem skaidri redzamas septiņu plaisu pēdas, kas šķērso sensoru visā platumā.

1. tabulas dati dod iespēju novērtēt trīs dažādu notikumu varbūtību pēc 60 alternatīvas slodzes kilocikliem:

- 1) PZT pilnīgas darbības saglabāšana 0,2;
- 2) PZT daļējas darbības saglabāšana 0,3;
- 3) PZT pilnīgs darbības zudums 0,5.

Novēroti daži plaisu izvietojuma modeļi, ņemot vērā sensora novietojumu:

- 1) PZT šķērsriezumos, kas ir perpendikulāri stiepes slodzes virzienam, stipri parādās noguruma plaisas;
- 2) gar pārveidotāja garumu noguruma plaisu sadalījums ir aptuveni vienmērīgs;
- 3) vērojama salīdzinoši vāja tendence, ka noguruma plaisas pārsvarā koncentrējas vertikālo grupu galējos pārveidotājos (Nr. 1. un Nr. 5.): 21 plaisa no 36.

2.3. Plānsienu konstrukcijā iebūvētu devēju sprieguma stāvokļa izpēte

SHM ultraskaņas sistēmas mērvienība ietver divas galvenās sastāvdaļas: PZT un to balstošo elementu, kas šajā darbā attēlots ar līmes slāni. Lai detalizētāk novērtētu sagraušanas apstākļus pie ekspluatācijas slodzes, ir nepieciešama mērvienības sprieguma stāvokļa analīze. PZT pārveidotāja ģeometriskie izmēri atbilst PIC151 pārveidotājam, kas tiek izmantots visos šī darba testos, Hysol930.3NA līmes slāņa biezums ir 0,25 mm. Al2024-T3 loksne (izmērs 1,15 mm × 80 mm × 240 mm) ir uzņēmēja struktūra trim kolineāriem pārveidotājiem ar 1 mm atstarpi starp tiem (2.2. att.). Tajā pašā attēlā redzami divi statiskās slodzes varianti ar vienmērīgi sadalītu 150 MPa spriegumu. Visu modeļa materiālu mehāniskās īpašības ir apkopotas 2. tabulā.

Galīgo elementu analīze tika veikta, izmantojot COMSOL Multiphysics programmatūru ar pētījuma variantu Stationary. Tā kā modelim ir dubultā aksiālā simetrija

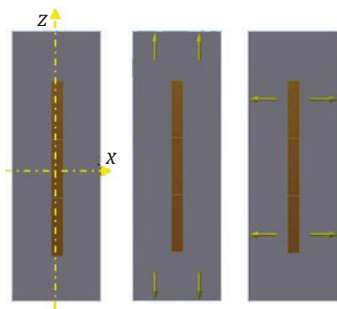
2. tabula

Materiālu elastīgās īpašības un stiepes izturība

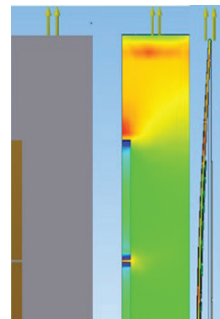
Materiāls	E , MPa	Puasona attiecība	Stiepes izturība, MPa
Al2024-T3	71 000	0,33	
PIC 151	67 000	0,34	~45
Hysol930.3NA	2232	0,42	31

koordinātu plaknē xz , tāpēc turpmāk ir parādīts sprieguma analīzes rezultāts vienai modeļa ceturtdaļai. 2.3. attēlā redzams vispārīgs spriegumu sadalījuma skats (*Von Mises* ekvivalentā sprieguma formā) un modeļa deformētā forma pie stiepes gareniskās slodzes. 2.4. attēlā redzams, ka devēju klātbūtne izraisa nevienmīgu sprieguma stāvokli starp tiem un loksni. Acīmredzot pārveidotāja vidējais tiešais spriegums vienmēr ir mazāks par loksnes spriegumu, un starpība starp šiem spriegumiem ir monotoniski sarūkoša loksnes relatīvā biezuma funkcija. Redzams, ka uz devēja un līmes slāņa robežas tiešais spriegums ir lielāks nekā uz brīvās ārējās robežas. Tādējādi, ja pārveidotāja trausluma vai noguruma bojājums notiek līdzīga tipa konstrukcijā, pārveidotāja sabrukšanai jābūt pie šīs iekšējās robežas.

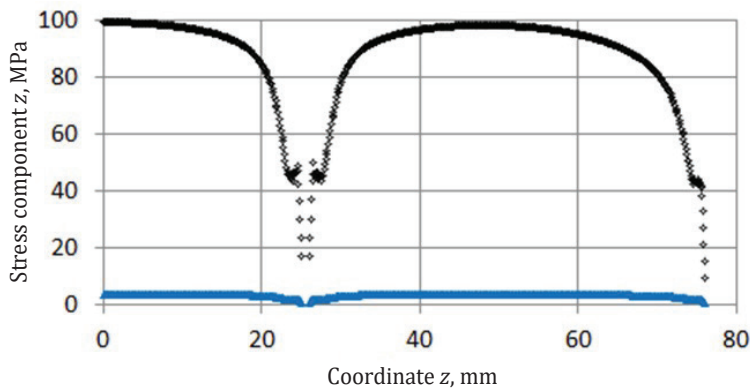
Sīkāka informācija par devēja sprieguma stāvokli šai kritiskajai robežplaknei ir sniegta 2.5. attēlā. Leņķa līknes koordinātu intervālā $z \in [0...25 \text{ mm}]$ atbilst vidējā devēja pusei, bet līknes $z \in [26...76 \text{ mm}]$ atbilst ārējam devēja punktam. Vienkāršs šo rezultātu aprēķins liecina, ka praktiski visos aplūkoto intervālu punktos (izņemot īsās gala zonas) iedarbības spriegumi pārsniedz pjezokeramikas stiepes (un



2.3. att. Parauga modelis *FEA* pārveidotājiem pie diviem slodzes variantiem: stiepes garenvirzienā un šķērsvirzienā.



2.4. att. Vispārējs modeļa spriegojuma stāvokļa skats.



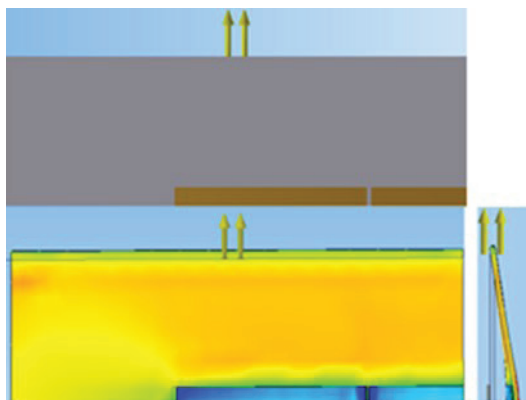
* Sensor (boundary with glue layer) * Glue layer (boundary with sensor)

2.5. att. Pārveidotāju un līmes slāņa stiepes spriegumu sadalījums robežplaknē starp tiem.

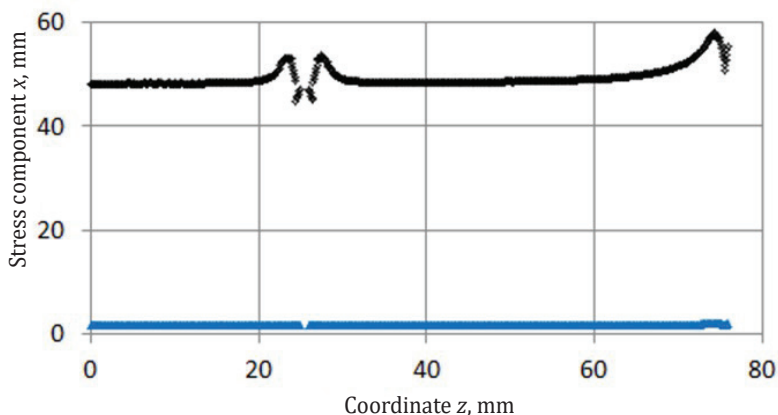
lieces) izturību. Tas nozīmē, ka pie noteiktā parauga ārējās slodzes līmeņa ir ļoti ticama vismaz trauslo plaisu rašanās pārveidotājos.

Līdzīga analīze tika veikta arī parauga slodzei virzienā, kas ir perpendikulārs tā garākajai malai (2.6. att.). Šeit ir attēlots vispārējais skats uz spriegumu sadalījumu (*Von Mises* ekvivalentā sprieguma formā) un modeļa deformētā forma pie stiepes slodzes. Pārveidotāju klātbūtne izraisa to un loksnes neviendabīgu sprieguma stāvokli. Pārveidotāja vidējais tiešais spriegums vienmēr ir mazāks par loksnes spriegumu, un starpība starp šiem spriegumiem ir monotoniski sarūkoša loksnes relatīvā biezuma funkcija. Taču atšķirībā no iepriekš aplūkotā stiepes gadījuma (2.6. att.) redzams, ka pie tādas pašas ārējās slodzes intensitātes spriegums devējos ir daudz mazāks. Šajā gadījumā kritiska pārveidotāja izturībai ir arī tā pati robežplakne starp pārveidotāju un līmes slāni.

Sīkāka informācija par devēja sprieguma stāvokli šajā plaknē ir sniegta 2.7. attēlā. Viena no tiešo spriegumu sadalījuma īpatnībām ir spriegumu



2.6. att. Vispārējs skats uz modeļa spriegojuma stāvokli stiepes stāvoklī.



• Sensor (boundary with glue layer) • Glue layer (boundary with sensor)

2.7. att. Detalizētāks skats uz devēju un līmes slāņa stiepes spriegumu sadalījumu robežplaknē starp tiem.

koncentrācija devēja gala daļās, un vislielākā koncentrācija atbilst devēja ārējai pozīcijai.

Svarīgākā informācija par veikto pētījumu, kas ir visbūtiskākā turpmākajā darbā vai citiem lietojumiem, apkopota 3. tabulā. Tajā parādīts maksimālais tiešais spriegums, kas ir paralēls stiepes slodzes virzienam, visām katra modeļa komponenta robežplaknēm. Tabulā ir norādīta arī visu faktisko materiālu stiprība, un tas ļauj novērtēt jebkura pārveidotāja uzstādīšanas varianta atbilstību statistiskās stiprības prasībām.

3. tabula

Maksimālais tiešais spriegums mērvienības robežplaknēs

Sastāvdaļa, tās slānis	Slodzes virziens		Stiprība, MPa
	gareniski	šķērsām	
Sensors, augšējā brīvā virsma	75,03	24,66	45 (80)
Sensors, robeža ar līmes slāni	98,22	58,12	45 (80)
Līmes slānis, robeža ar sensoru	3,29	1,94	31
Līmes slānis, robeža ar apvalku	10,25	3,07	31
Apvalks, robeža ar līmes slāni	306,31	91,71	350*

Šajā tabulā šūnas krāsa norāda statistiskās stiprības prasības statusu: zaļa krāsa – prasība ir izpildīta, dzeltena – daļēji izpildīta, sarkana – nav izpildīta.

3. NODAĻA.

AKTĪVĀS SHM METODES, IZMANTOJOT ULTRASKAŅAS TEHNIKAS

3.1. Elektromehāniskā pretestība kā plaisu noteikšanas un slodzes uzraudzības primārā metode

3.1.1. Elektromehāniskā pretestība, tās komponenti un EMI parametri

Elektromehāniskās pretestības (*EMI*) tehnoloģija ir izvēlēta, lai primāri atklātu noguruma plaisu hermētiskā fizelāžas apvalkā. Šī tehnoloģija ir vienkārša, uzticama, un to var efektīvi realizēt, izmantojot lētas un vienkāršas mērīšanas iekārtas. Šajā apakšnodaļā ir aplūkota jauna pieeja *EMI* piemērošanai. Tas ietver bojājuma indeksa (*IOD*) izvēli, tā kritiskās vērtības noteikšanu, bojājuma noteikšanas novērtēšanu, izmantojot tikai *PZT* strāvas informāciju. Minēto problēmu risināšanai tiek izmantots *EMI* modelis un īpašu testu rezultāti.

Izstrādāti daudzi *EMI* modeļi [8–17]. Rakstos [18] tika izstrādāts jauna tipa *EMI* modelis un tā lietojums gaisa kuģu konstrukcijas veselības monitoringam (*SHM*). Tika iegūta elektromehāniskās pretestības izteiksme, kas ir kopīga jebkurai

modeļu dimensijai (1D, 2D, 3D) un ir tieši neatkarīga no definētajiem ierobežojumiem. Šī modeļa pamatinstruments ir sistēmas "saimniekstruktūra - PZT" dinamiskās reakcijas modālā analīze. Galīgais *EMI* vienādojums ir šāds (1., 2., 3. vienādojums):

$$Z(\omega) = \frac{1}{i\omega C} \left[1 + \frac{k_{31}^2 \omega^2}{\left((1-\nu) - 2 \frac{E'}{E} \nu^2 \right) Ah} \Phi(\omega) \right]^{-1}, \quad (1)$$

kur

$$\Phi(\omega) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\int f(\xi) dW \int \rho(\xi) (\xi - \xi_C) U_k(\xi) dW}{M_k (\omega_k^2 - \omega^2)} \quad (2)$$

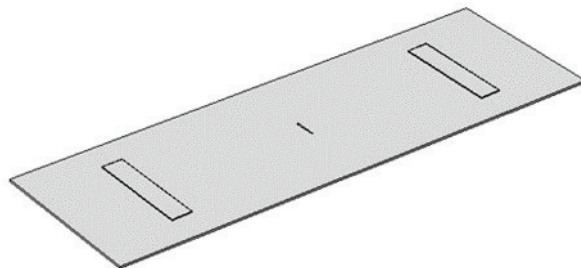
un

$$f(\xi) = (\varepsilon_{1k} + \varepsilon_{2k} + 2\nu' \varepsilon_{3k}) + \frac{d_{33}}{d_{31}} \left(\nu' (\varepsilon_{1k} + \varepsilon_{2k}) + \frac{E'}{E} (1-\nu) \varepsilon_{3k} \right) \quad (3.)$$

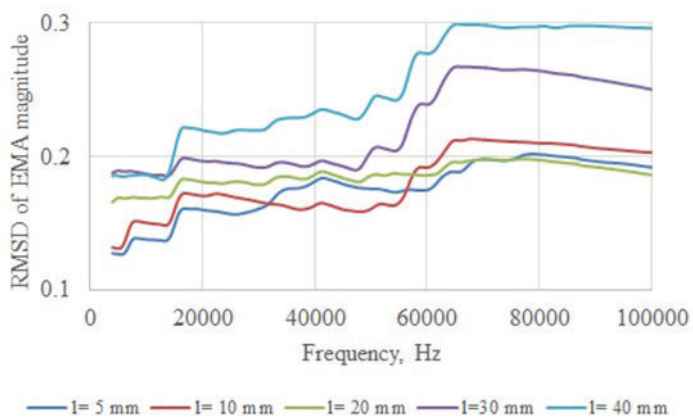
$k_{31}^2 = d_{31}^2 / (\varepsilon_{33} s_{11})$ - elektromehāniskās saites koeficients, s_{11} - mehāniskās atbilstības komponente pie nulles lauka, ε_{33} - dielektriskā konstante pie nulles sprieguma, un d_{31} - inducētās deformācijas koeficients, t. i., mehāniskā deformācija uz elektriskā lauka vienību, E un E' - elastības modulis, savukārt ν un ν' - PZT šķērseniski izotropā materiāla Pausona koeficienti, $C = \varepsilon_{33} A / h$ - kapacitāte, A un h - elektrodu laukums un PZT biezums, $\varepsilon_{jk} = \partial U_{jk} / \partial x_j$, ($j = 1, 2, 3$) un $U_k(x)$ un ω_k - k -tā režīma forma un frekvence.

Kā redzams, šis modelis tieši izmanto konstrukcijas modālās analīzes rezultātus un ir neatkarīgs no konstrukcijas konfigurācijas, robežstāvokļiem un ārējās slodzes. Tā ir galvenā šī *EMI* modeļa priekšrocība. Šajā pētījumā modālā analīze tiek veikta ar *COMSOL Multiphysics*, un tās rezultāti tiek pārnesti uz *MATLAB*, kurā tiek realizēts *EMI* modeļa algoritms.

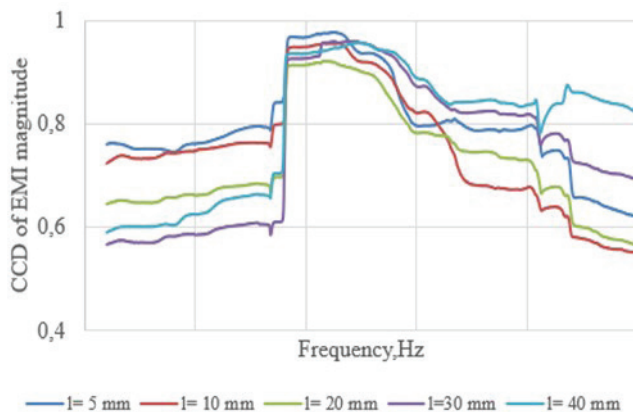
3.1. attēlā redzams 240 mm × 80 mm × 1,15 mm Al sakausējuma loksnes modelis, kas aprīkots ar diviem sensoriem *PIC151* (3.1. att.) un izmantots *EMI* simulācijai, kā arī noteikta saistība starp *EMI* indeksu un plaisas izmēru simetrijas plaknē. Simulācijas rezultāti sniedz informāciju dažādu veidu bojājumu indeksa salīdzinošai novērtēšanai, kā arī ļauj noteikt ticamu indeksa vērtības noteikšanas procedūru.



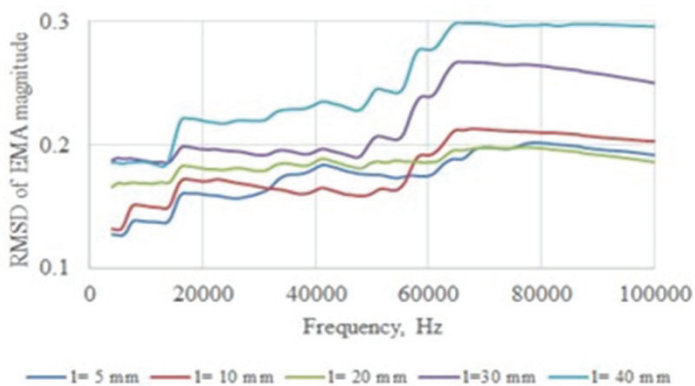
3.1. att. Plāksne ar plaisu ir aprīkota ar diviem PZT devējiem.



3.2. att. *EMI* lieluma *RMSD* kā izvēles loga sākotnējās frekvences funkcija.



3.3. att. *EMI* lieluma *CCD* kā loga izvēles sākotnējās frekvences funkcija.



3.4. att. *EMA* lieluma *RMSD* kā loga izvēles sākotnējās frekvences funkcija.

Šeit aplūkoti divi integrālās *DI* veidi un iegūta informācija salīdzināmam novērtējumam: vidējā kvadrātiskā novirze (*RMSD*) un korelācijas koeficienta novirze (*CCD*).

RMSD indeksu nosaka ar šādu vienādojumu:

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N [y(\omega_k) - y_0(\omega_k)]^2}{\sum_{k=1}^N [y_0(\omega_k)]^2}} \quad (4.)$$

Šeit y ir kāda *EMI* signatūras pašreizējā realizācija, kas jānovērtē, $y_0(\omega_k)$ apzīmē šo *EMI* signatūras sākumstāvokli (bez slodzes), N ir paraugu punktu skaits interesējošā frekvenču joslā (4. vienādojums).

CCD indeksu nosaka ar šādu vienādojumu:

$$CCD = 1 - CC = 1 - \frac{Cove(y(\omega), y_0(\omega))}{\sigma_y \sigma_{y_0}}, \quad (5.)$$

kur CC ir korelācijas koeficients, kas norāda statistisko saistību starp diviem *EMI* signatūras signāliem $y(\omega)$ un $y_0(\omega)$ (5. vienādojums).

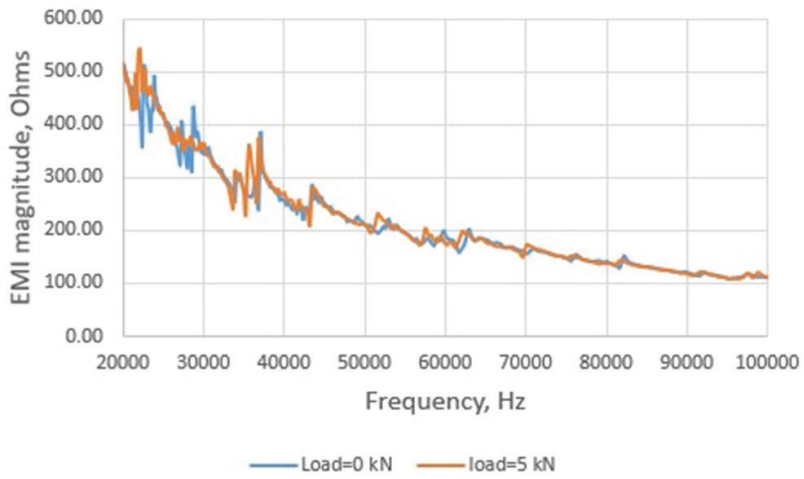
Iepriekšminētā simulācijas procedūra tika veikta visām sešām *EMI* pazīmēm (*EMI* lielums, pretestība, reaktance, *EM* pielaides lielums, vadītspēja un reaktīvās vadītspējas). Taču visu šo pazīmju būtiskās iezīmes, reaģējot uz bojājumiem, ir līdzīgas. Tāpēc turpmāk šīs pazīmes ir ilustrētas dažām atsevišķām signatūrām (3.2.–3.4. att.). Šajos attēlos redzami grafiki ir simulācijas rezultāti frekvenču joslā no 4 kHz līdz 300 kHz ar 100 Hz diskretizācijas soli. *DI* tika aprēķināts 2000 paraugu logā, kas atbilst loga platumam frekvenču jomā 200 kHz. Tātad (3.2.–3.4. att.) frekvence atbilst izvēles loga sākuma punktam, un ordināte rāda *DI* vērtību šajā logā.

3.2. Citi elektromehāniskajā impedancē (*EMI*) balstīti *SHM* sistēmas rādītāji

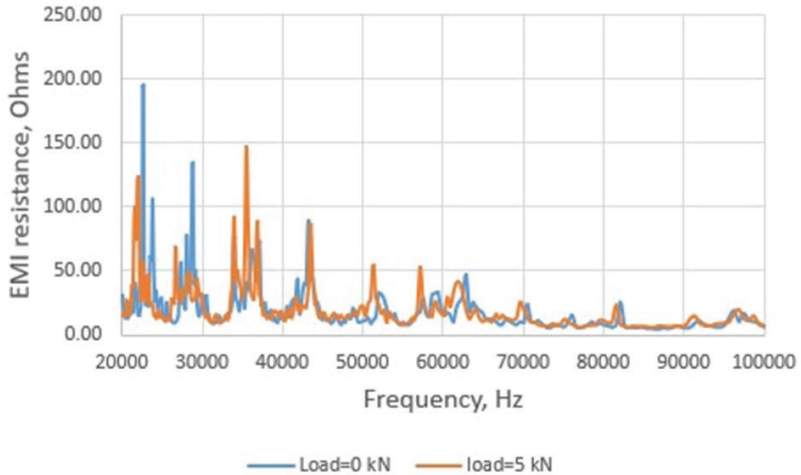
Bojājumu ietekme parasti tiek novērtēta ar bojājumu indeksu (*DI*), piemēram, *RMSD*, *CCD* un citiem mazāk populāriem rādītājiem. Visi šie indeksi ir integrāli, taču diskrēti *EMI* līknes ieraksti rada daudz lokālu paraugu ņemšanas problēmu. Datu kopas loga platumam, izlases punktu skaitam un frekvenču joslas izvēlei ir svarīga bojājumu indeksu stabilitātes nodrošināšanai. Tiek ierosināta racionāla procedūra *EMI* bojājumu indeksu noteikšanai.

Pretestībā balstītā *SHM* sistēmā ir arī citi *EMI* rādītāji. Šeit tiek izmantots tikai viens no tiem kā vidējā *EMI* signatūras vērtība izvēlētajā frekvenču joslā. Šis indekss ir efektīvs, lai novērtētu *EMI* līknes vertikālo nobīdi frekvenču jomā.

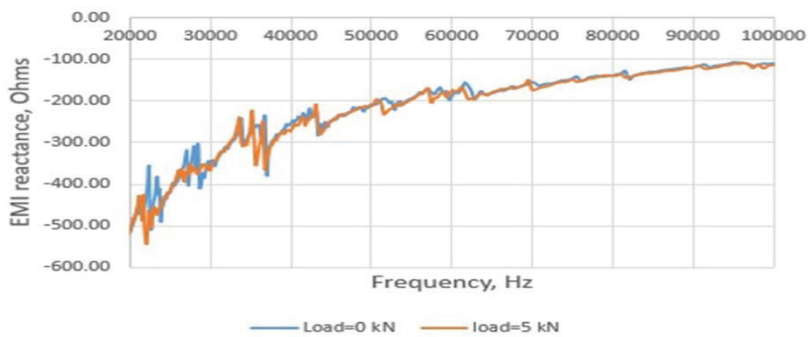
Aprēķiniem tiek izmantoti dati, kas iegūti no *Cypher Graph*. Slodzes ietekme uz elektromehānisko pretestību tiek noteikta, uzzīmējot dažādus grafikus starp slodzēm un vidējo kvadrātisko novirzi (*RMSD*) *EMI*. Katrā grafikā dažādu signatūru *RMSD* vērtības ir attēlotas atkarībā no slodzes. Grafiki ir iegūti dažādām iterācijām. Testa paraugs tika pakļauts periodiskai noslogošanai un atslogošanai. *RMSD* vērtības vienmēr sākas no nulles.



3.5. att. Slodzes ietekme uz *EMI* lieluma spektrogrammu.



3.6. att. Slodzes ietekme uz *EMI* pretestības spektrogrammu.



3.7. att. Slodzes ietekme uz *EMI* reaktances spektrogrammu.

2. LWDS45 (KUL) programmatūra kopā ar LWDS45 aparatūru.
3. USB450-25: 4 Ch osciloskopa 25 MHz versija (Acquitek) sensoru reakcijas mērījumiem.
4. Pretestības mērīšana C60 (Cypher Instruments Ltd).

3.5. Galvenie rezultāti

3.9. attēlā redzams šī pētījuma rezultāts attiecībā uz *EMI*. Šeit tiek izmantots *RMSD* indekss vadītspējai. Attiecībā uz citām *EMI* sastāvdaļām reakcija ir līdzīga.

Jaunā veida bojājumu indekss (*DI*), kas šeit izmantots plaisas lieluma noteikšanai, izmantojot vadāmo viļņu tehnoloģiju. Īsumā *DI* jēga ir izskaidrota turpmāk. Ja funkcija $f(t)$ ir signāls, ko izraisa ierosmes impulss $\varphi(t)$ pie plaisas garuma l (6. vienādojums), tad integrālā transformācija ir šo divu funkciju konvolūcija.

$$\Phi(\tau, l) = \left| \int_0^{\infty} f(t)\varphi(t - \tau) dt \right|, \quad (6.)$$

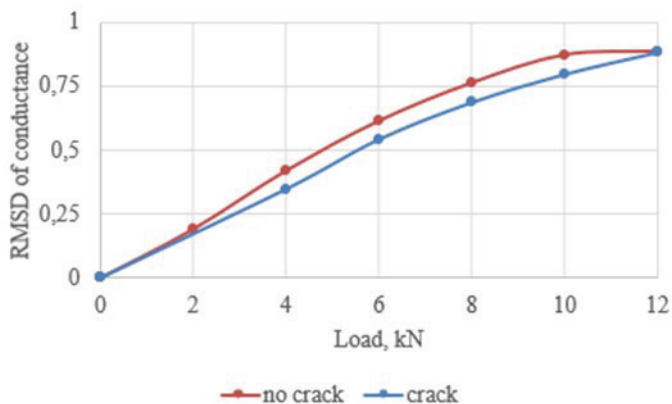
kur τ – pārvietojamais mainīgais ar laika vienību. Par bojājuma mērauklu tiek izvēlēts pirmais globālais $\Phi(\tau)$ maksimums. To var iegūt, konstruējot signāla transformācijas $\Phi(\tau, l)$ kreiso augšējo aploksni $E(\tau, l)$, izmantojot 7. vienādojumu:

$$E(x, l) = \max[\Phi(x, l)], \quad \text{ja } x \in [0, \tau] \quad (7.)$$

Par lidojuma laiku var pieņemt $\tau_c \in [0, \tau]$ mainīgā lieluma vērtību, kas atbilst minētajam maksimumam. $E(\tau, l)$ atbilst signāla transformācijas pirmajam globālajam maksimumam.

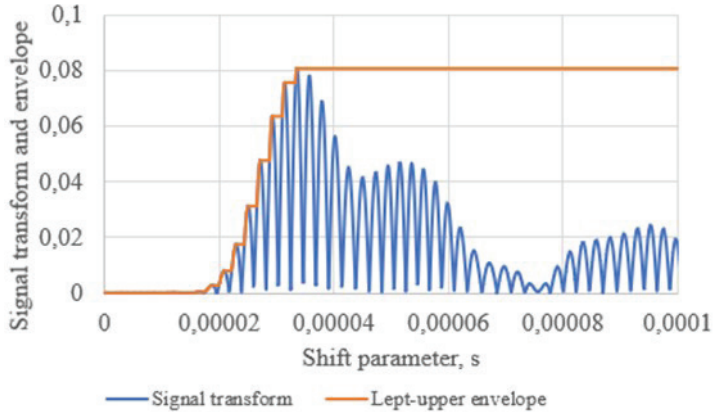
$E(\tau, l)$ plaisas garuma $l = 13$ mm noteikšanas procedūra ir redzama 3.10. attēlā. Bezdimensiju bojājumu indeksu $DI(l)$ definē 8. vienādojums.

$$DI(l) = 1 - \frac{E(\tau, l)}{E(\tau, 0)} \quad (8.)$$

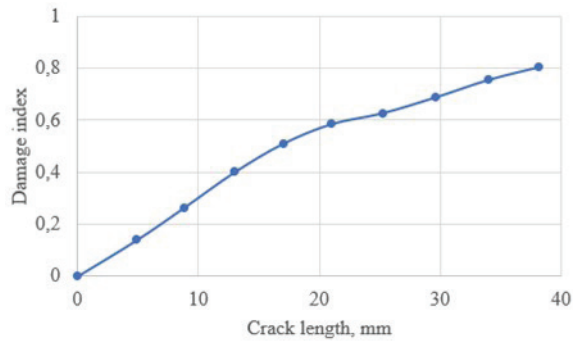


3.9. att. Noslogošanas ietekme uz sistēmas vadītspēju.

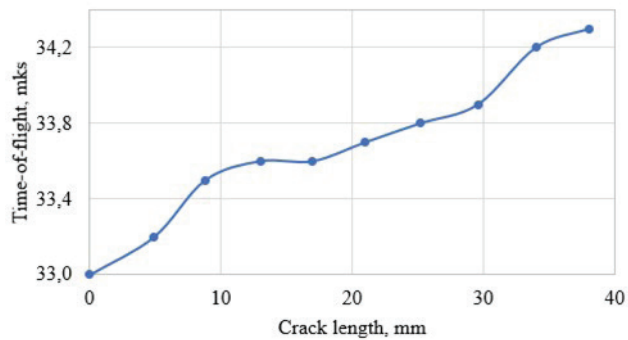
3.11. attēlā redzams eksperimentālā pētījuma rezultāts. DI ir monotona plaisas garuma funkcija. Vēl viens svarīgs rezultāts ir lidojuma laika raksturojums (3.12. att.).



3.10. att. Signāla konvolūciju transformācija un DI noteikšana.



3.11. att. Bojājumu indekss, izmantojot plaisas garumu.



3.12. att. Lidojuma laiks, izmantojot plaisas garumu.

3.6. SHM (konstrukcijas veselības monitoringa) pielietojums hermētiskas fizelāžas konstrukcijas apvalkam

3.6.1. Pretestībā balstītas SHM (konstrukcijas veselības monitoringa) demonstrācija hermētiskam fizelāžas apvalkam

Lai demonstrētu iepriekš veikto strukturālo analīzi un definētu tās SHM sistēmas pamata arhitektūru, ir ņemta neliela daļa no tipiska aeronavigācijas paneļa no Al sakausējuma (2024-T3) hermētiskās fizelāžas.

Al sakausējuma (2024-T3) hermētiskās fizelāžas tipiska aeronavigācijas paneļa neliela daļa redzama 3.13. attēlā. Tiešais attālums starp devējiem ir 77 mm, apvalka biezums ir 1,5 mm, un galvenais izliekuma rādiuss ir 2000 mm. Tas nozīmē, ka plaisu atklāšanas problēmas nosacījumi apvalkā ir tuvi šajā darbā aplūkotajiem. Var novērtēt pārveidotāja paša spēka problēmu, kā arī sagaidāmās bojājumu indeksu vērtības šāda garuma plaisai.

Pirmkārt, izvēlētās vienības sprieguma stāvokļa simulācija kabīnē, kurā ir spiediens (3.13. att.), liecina, ka maksimālais devēja spriegums uz robežas ar līmes slāni nepārsniedz 17 MPa. Tas nozīmē, ka statiskās stiprības prasība ir pilnībā izpildīta (2. nod., 3. tab.) un, iespējams, nebūs arī noguruma stiprības problēmu.

3.14. attēlā redzams apvalka fragments ar diviem PZT un 35 mm plaisu starp tiem. Šos bojājumu rādītājus var aptuveni novērtēt, izmantojot iepriekš minētās izmeklēšanas rezultātus.

EMI attiecībā uz EMA lieluma RMSD

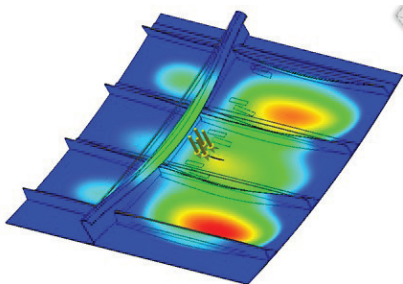
kabīne bez spiediena – 0,285;

kabīne ar spiedienu – 0,27.

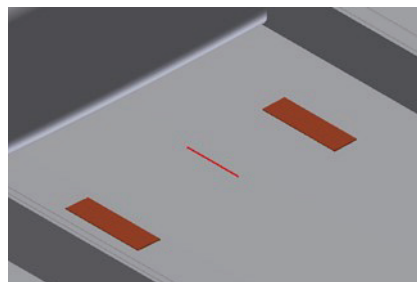
Vadāmā viļņa bojājuma indekss

kabīne bez spiediena – $DI = 0,655$, līdz $F = 34,2$ mks;

kabīne ar spiedienu – $DI = 0,785$, līdz $F = 35,0$ mks.



3.13. att. Spiediena fizelāžas stresa stāvokļa analīze.



3.14. att. Apvalka fragments ar diviem devējiem.

3.7. Noguruma plaisu augšanas prognozes un kalpošanas laika novērtējums

Geometrijas modelēšana tiek veikta *Autodesk Inventor* programmā. Vispirms tiek projektēts panelis (3.15. att., attēlā pa kreisi), kas atbilst lidojumderīguma prasībām. Tiešās un bīdes slodzes fizelāžas apvalkā, ko izraisa saliekums un vērpes, netika ņemtas vērā. Tiek pieņemts, ka paneļa apvalkā perimetrālie tiešie spriegumi ir divas reizes lielāki par meridionālajiem tiešajiem spriegumiem un šos spriegumus rada 100 mPa gaisa spiediens kabīnē. Tātad minētajā spriegumu laukā noguruma plaisa izplatās garenvirzienā (3.15. att., attēls vidū un pa labi). Spriedzes stāvokļa analīze tiek veikta, izmantojot *Autodesk Inventor* moduli *Environments* (opcija *Static Analysis*). Vienlaikus ir attēloti divi pilno pārvietojumu skati (3.15. att.).

Noguruma plaisas kritisko garumu nosaka pēc plaisas augšanas sākuma stāvokļa:

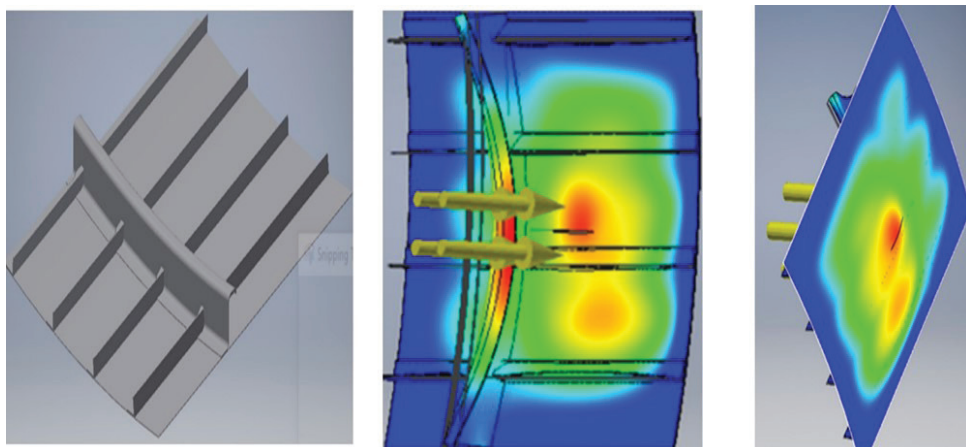
$$K_I = K_{Ic} \quad (9.)$$

kur K_I – sprieguma intensitātes koeficients (*SIF*), kas ir plaisas lieluma funkcija, un K_{Ic} – materiāla konstante, ko sauc par lūzuma stingrību (9. vienādojums). Tiek pieņemts, ka

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi l} Y(l) \quad (10.)$$

kur l – plaisas pusgarums, σ – perimetriskais tiešais spriegums paneļa apvalkā, $Y(l)$ – korekcijas reizinātājs. To var precīzi aprēķināt, izmantojot *FEA* rezultātus, un aptuveni tas ir vienāds ar 1 (10. vienādojums).

Apvalka materiāla mehāniskās īpašības, kas nosaka tā izturību pret plaisām pie statistiskas un cikliskas slodzes, redzamas 4. tabulā. C un m ir Parisa likuma



3.15. att. Aeronavigācijas panelis un sprieguma stāvokļa analīzes rezultāti iespējamās noguruma plaisas klātbūtnē.

konstantes, kas raksturo plaisu augšanas ātrumu cikliskās slodzes gadījumā (11. vienādojums).

Izmantojot 9. un 10. vienādojumu, noguruma plaisas kritiskais garums, kas atbilst apvalka atlikušajai stiprībai 34,6 MPa (apkārtējais tiešais spriegums pie maksimālā spiediena pasažieru salonā), ir 265 mm.

Noguruma plaisu izplatīšanās prognozēšana tiek veikta, izmantojot Parisa likumu par noguruma plaisu augšanas ātrumu (11. vienādojums).

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K_I)^m \quad (11.)$$

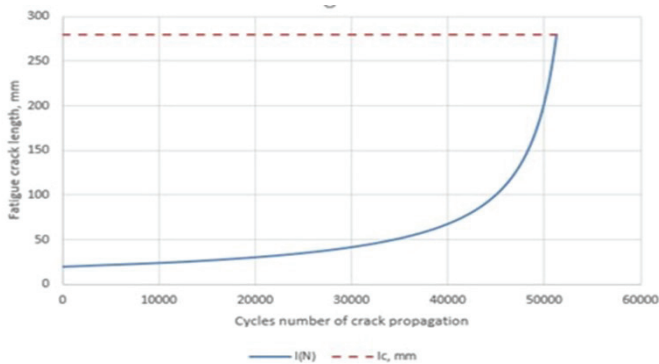
Tas ir vienkāršs pirmās kārtas diferenciālvienādojums. Risinājumu iegūst ar skaitlisku integrāciju ar sākotnējo nosacījumu – sākotnējās plaisas garums ir viēnāds ar 20 mm. Tas ir izmērs, ko var ticami noteikt ar *EMI* metodi.

Prognozes rezultāts parādīts 3.16. attēlā. Redzams, ka paredzamais plaisas izplatīšanās ilgums līdz kritiskajam garumam ir aptuveni 50000 lidojumu. (3.16. att.)

4. tabula

Al sakausējuma 2024-T3 mehāniskās īpašības

Materiāli	K_{Ic} , MPa·m ^{0.5}	m	C
2024-T3	26	4,2	$8,8 \cdot 10^{-11}$



3.16. att. Noguruma plaisu augšanas prognozēšana un kalpošanas laika novērtēšana.

4. NODAĻA.

CITI LIETOJUMI, SLODZES UZRAUDZĪBA UN AKUSTISKĀ EMISIJA

4.1. Saistītais lietojums

Šajā nodaļā aplūkotas citas konstrukciju monitoringa iespējas, kurās tehniskā stāvokļa novērtējums balstās pašreizējā vai uzkrātajā informācijā bez atsaucē uz sākotnējo stāvokli. Pirmkārt, šī situācija attīstās, ja jāuzrauga slodze un citas ārējās ietekmes. Mehāniskās slodzes intensitāte, tās mainīgais raksturs, dinamiskie efekti, temperatūras ietekme, korozijas bojājumi un citi apkārtējās vides ietekmes efekti ir galvenie faktori, kas nosaka konstrukcijas degradāciju ekspluatācijas laikā. Ja tiek izmērīta un pienācīgi ņemta vērā katra no šiem faktora ietekme un to savstarpējā ietekme uz konstrukcijas kalpošanas laiku, tad, pamatojoties uz to, ir iespējams izveidot iebūvētu monitoringa sistēmu, kas statistiskā nozīmē spēj prognozēt bojājumu pakāpi un novērtēt kritiskā stāvokļa tuvošanās bīstamības pakāpi. Šāda visaptveroša ārējo ietekmju monitoringa sistēma ļautu precīzāk novērtēt to kumulatīvo ietekmi, taču tās izveide un darbība būtu apgrūtināša un dārga. Tāpēc praksē, lai nodrošinātu optimālu prognožu precizitātes un ekonomiskās efektivitātes kombināciju, tie aprobežojas tikai ar to parametru mērījumiem, kuriem ir vislielākā ietekme uz ekspluatējamās konstrukcijas ekspluatācijas laiku. Daudzos gadījumos noteicošais parametrs ir slodze. Jo īpaši mehāniskā slodze ir galvenā ārējā ietekme, kas nosaka no metāliskiem materiāliem izgatavotu gaisa kuģu galvenās konstrukcijas sastāvdaļu noguruma ilgumu. Pēc ārējās slodzes monitoringa un tās kumulatīvās ietekmes novērtēšanas principa ir izveidota mūsdienu helikopteru galvenās konstrukcijas un spēka bloku monitoringa sistēma [19, 20], kas demonstrē augstu darbības efektivitāti.

Acīmredzot slodzes uzraudzība ir netiešs veids, kā novērtēt konstrukcijas strukturālo stāvokli. Šo aplēsi var iegūt, izmantojot pieņemamu vispārinātu bojājuma parametru, ko nosaka pēc slodzes monitoringa rezultātiem, un salīdzinot to ar kontrolējamā konstrukcijas elementa stiprības raksturlielumiem. Pamatproblēmas, kas saistītas ar šīs pieejas īstenošanu attiecībā uz metāla konstrukcijas noguruma bojājumiem, ir aplūkotas 4.2. apakšnodaļā. Abi salīdzinātie lielumi ir nejauši. Tāpēc bojājumu indeksam jābūt ar varbūtības formulējumu, un tas jāuztver kā prasība papildus pārbaudīt un novērtēt attiecīgā konstrukcijas elementa tehnisko stāvokli. Šāda veida procedūra ir izstrādāta darbā [21], un tās fundamentālais fragments ir izklāstīts 4.3. apakšnodaļā.

Līdzīgs pjeoelektriskā pārveidotāja pasīvās reakcijas izmantošanas gadījums ir akustiskās emisijas monitoringa. To var efektīvi izmantot izturības noguruma testos [22], un tas ir aprakstīts 4.4. apakšnodaļā.

4.2. Slodzes uzraudzība, izmantojot PZT reakciju

Viens no svarīgākajiem pētījumiem, kas saistīts ar slodzi: aksiālā, šķērseniskā un noguruma slodze ir galvenie konstrukciju bojājumu avoti. Tāpēc šajā apakšnodaļā ir aprakstīta *EMI* tehnoloģijas izmantošana konstrukciju slodzes monitorīngam (*SLM*), kas ir daļa no *SHM* [23].

4.5. apakšnodaļā ir noteiktas prasības pilna izmēra stenda noguruma testiem, lai noteiktu gaisa kuģu konstrukciju kalpošanas laiku. Tas tieši ietekmē lidojumu drošību, tāpēc pētījums koncentrējas uz risinājumiem, kā pagarināt kopējo kalpošanas laiku elementiem, kam ir ierobežots kalpošanas laiks. Lai pamatoti paplašinātu ierobežojošo elementu resursus, iesniegti reāliem datiem tuvi dati par šo elementu slodzi regulārā lidojuma režīmā, kā arī reāla mēroga modeļu testēšanas dati, izturības analīze. Izmantojot šos datus, var novērtēt detaļu īstermiņa izturību un ilgmūžību [24].

4.2.1. Par stresa un slodzes mērījumiem

Tālāk īsumā aplūkotas trīs pieejas slodzes (sprieguma) mērīšanai, izmantojot mehānisko parametru pārveidošanu proporcionālā elektriskā reakcijā.

Mehāniskā spriegojuma ietekme uz vadītāja elektrisko pretestību, ko izraisa ģeometriskā izmēru maiņa, nemainoties materiāla īpašībām, ir spriedzes mērītājs.

Par metāla stieples elektriskās pretestības izmaiņām pie tās spriegojuma tika ziņots [19]. Šī parādība tika pētīta daudziem materiāliem [20] plašā deformācijas diapazonā. Elektriskās pretestības mērīšanas dinamiskā metode ir aprakstīta [21].

1. Tika noteikta un praksē nostiprināta lineāra sakarība starp elastīgo deformāciju ε un deformācijas mērītāja relatīvo pretestību $\Delta R/R$.

$$\frac{\Delta R}{R} = GF \cdot \varepsilon \quad (12.)$$

GF ir konstants, ko sauc par gabarīta koeficientu.

Metāla gadījumā kopējās pretestības izmaiņas, ko izraisa stieples ģeometrijas izmaiņas, ir garums l un šķērsriezuma laukums A (13. vienādojums).

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (13.)$$

kur ρ – materiāla īpatnējā pretestība (rezistence).

2. Pjezo pretestības efekts.

Termins “pjezo pretestība” pirmo reizi tika lietots rakstā [25]. Pusvadītājiem pretestība nav konstanta, bet mainās arī pie slodzes, un, kā norādīts [26].

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2\mu)\varepsilon \quad (14.)$$

kur μ ir Pausona koeficients.

Lineārajai deformācijai sakarība (12. vienādojums) paliek nemainīga, bet tās vērtība ir vairāk nekā 50 reizu lielāka, salīdzinot ar metālisko spriedzes mērītāju. (14. vienādojums)

Pjezo pretestības tenzora teorija tika izstrādāta [27], un visi pēdējo gadu sasniegumi ir aprakstīti [28].

3. Pjezoelektriskuma efekts

Lineāru pjezoelektrisko materiālu elektrisko un mehānisko mainīgo mijiedarbību var aprakstīt ar konstitutīvo sakarību tenzoriālā formā. Tālāk tekstā ir sniegti tā sauktie sensoru pjezoelektriskie vienādojumi saīsinātā veidā (15. vienādojums).

$$\begin{cases} \{\mathbf{S}\} = [\mathbf{s}]\{\mathbf{T}\} + [\mathbf{g}]\{\mathbf{D}\} + \{\boldsymbol{\alpha}\}\theta \\ \{\mathbf{E}\} = [\mathbf{g}]^t\{\mathbf{T}\} + [\boldsymbol{\beta}]\{\mathbf{D}\} + \{\mathbf{B}\}\theta \end{cases} \quad (15.)$$

kur

$\{\mathbf{S}\}$ – deformācijas vektors, kas attēlo deformācijas tenzoru saspiešanas formā;

$[\mathbf{s}]$ – atbilstības matrica;

$\{\mathbf{T}\}$ – sprieguma vektors, kas attēlo sprieguma tenzoru saspiešanas formā;

$[\mathbf{g}]$ – elektrisko un mehānisko mainīgo saistīšanas matrica;

$\{\mathbf{D}\}$ – elektrisko pārvietojumu vektors;

$\{\boldsymbol{\alpha}\}$ – termiskās izplešanās koeficientu vektors;

$\{\mathbf{E}\}$ – elektriskā lauka vektors;

$[\boldsymbol{\beta}]$ – necaurlaidības vektors;

$\{\mathbf{B}\}$ – pjezoelektriskā sprieguma koeficientu vektors;

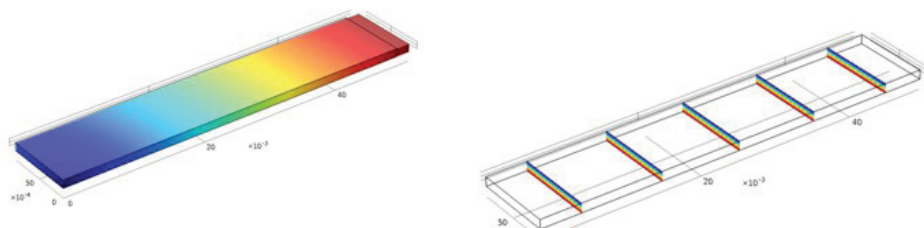
θ – temperatūra.

15. vienādojums apraksta lineāro pjezoelektriskumu un kopā ar elastības teorijas vienādojumu sistēmu ļauj atrisināt pjezoelektriskuma problēmu jebkurai lineārai pjezoelektriskai ierīcei.

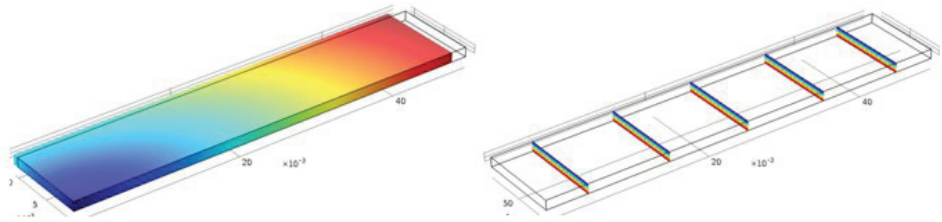
Tālāk tekstā aplūkoti vairāki pjezoelektrisko ierīču veidi, ņemot vērā to izmantošanu sprieguma vai slodzes mērīšanai.

4.2.2. PZT homogēns sprieguma stāvoklis

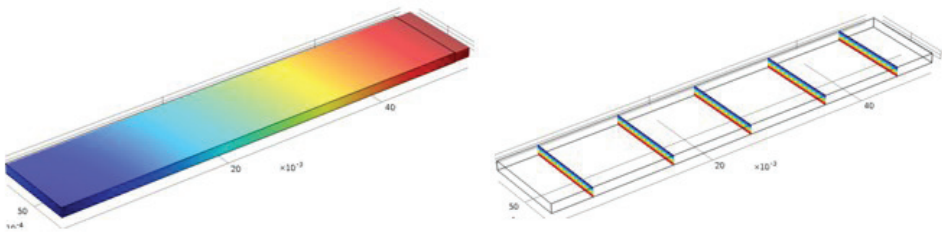
Šajā gadījumā risinājumu var viegli iegūt, izmantojot 15. vienādojumu un PZT materiāla konstantu īpašības. Šeit un citur šajā apakšnodaļā risinājumi iegūti skaitliski, izmantojot *COMSOL Multiphysics* programmatūru. Tas ļauj saglabāt vienotu rezultātu pasniegšanas stilu un nodrošināt to salīdzināšanas ērtumu. Šajā apakšnodaļā ir sniegts brīvā sensora stacionārais pētījums pie viendabīgas slodzes (5. tab.). PZT elektriskais potenciāls ir reakcija, kas ir proporcionāla slodzei (spriegumam), (4.1.–4.5. att.).



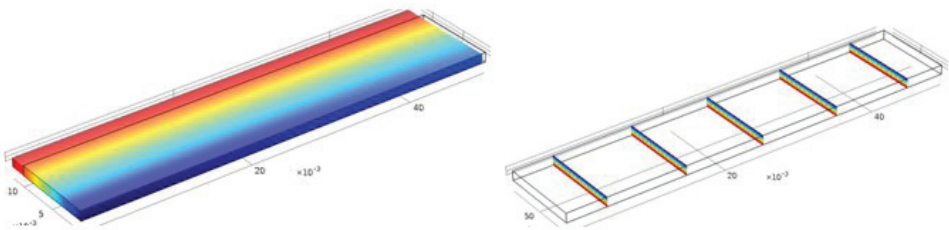
4.1. att. Vienvirziena spriegojums PZT garenvirzienā.



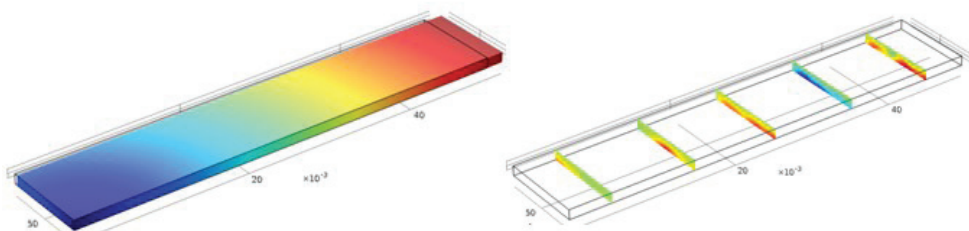
4.2. att. Vienvirziena spriegojums PZT sānu virzienā.



4.3. att. Vienmērīgs spriegojums visos virzienos plaknē.



4.4. att. Spriegums divos perpendikulāros virzienos plaknē $S_x = 5$ MPa, $S_y = 10$ MPa.



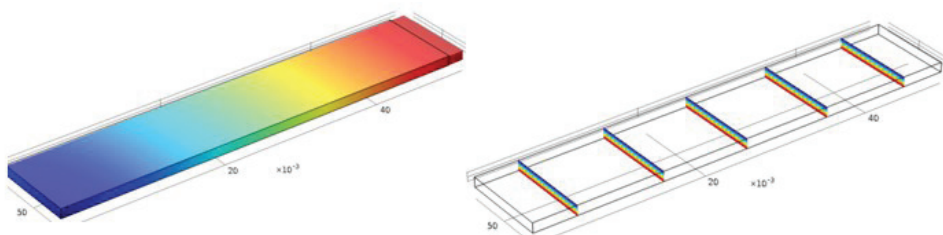
4.5. att. Tīra bīde (attiecībā uz galvenajiem spriegumiem $S_x = 5$ MPa, $S_y = -5$ MPa).

Vispārināta informācija par PZT homogēno sprieguma stāvokli

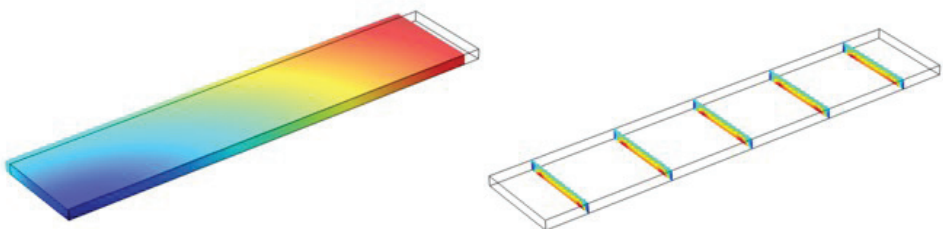
Plaknes sprieguma stāvokļa veids			Kopējais pārvietojums, mm	Potenciāls, V
$\sigma_{x'}$, MPa	$\sigma_{y'}$, MPa	$\tau_{xy'}$, MPa		
5	0	0	0,0036	65,3
0	5	0	0,0020	65,3
5	-5	0	0,0056	0
5	5	0	0,0017	130,6
5	10	0	0,0006	196,0

4.2.3. PZT nehomogēns stresa stāvoklis

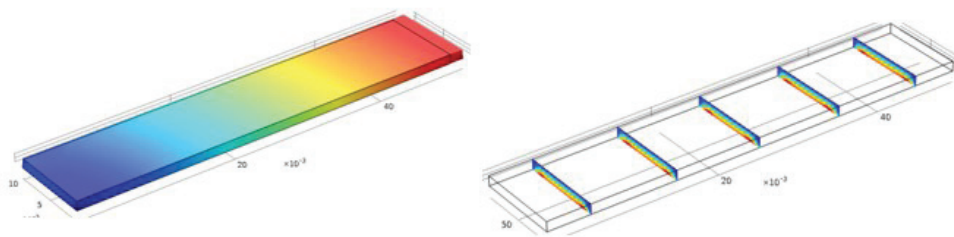
Sensora zemā plakne ir ierobežota – pārvietojums, kas ir perpendikulārs šai plaknei, ir vienāds ar nulli ($w = 0$). Sensora slodze tiek veikta ar ierobežojošās plaknes vienmērīgu sasprindzinājumu (saspiešanu), (4.6.–4.9. att.).



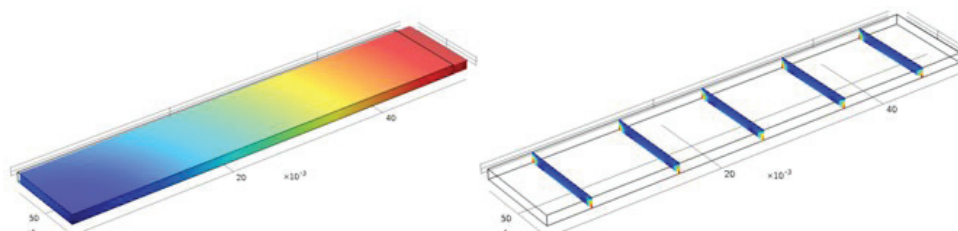
4.6. att. Ierobežojošās plāksnes vienvirziena spriegums PZT garenvirzienā.



4.7. att. PZT ierobežojošās plaknes vienvirziena spriegums sānu virzienā.



4.8. att. Vienmērīgs ierobežojošās plaknes spriegums visos virzienos plaknē.



4.9. att. Ierobežojošās plāksnes tīrā nobīde (galveno spriegumu izteiksmē).

6. tabula

PZT sprieguma stāvokļa tipa ietekme uz tā elektrisko potenciālu

Plaknes veida sprieguma stāvoklis			Potenciāls, V		
σ_x , MPa	σ_y , MPa	τ_{xy} , MPa	Homogēns sprieguma stāvoklis	Nehomogēns sprieguma stāvoklis	
				Robežas	Apjoms
5	0	0	65,3	64,0	65,3
0	5	0	65,3	59,1	65,3
5	-5	0	0	20,7	20,4
5	5	0	130,6	114,6	122,1
5	10	0	196,0	151,7	138,7

4.2.4. PZT, kas iestrādāts plānsienu plāksnē

Šajā apakšnodalā tiek simulēta un analizēta slodzes tipiskās pārraides ietekme uz PZT PIC 151, 0,5 mm × 10 mm × 50 mm (PI pjezokeramika). Taisnstūra Al sakausējuma loksne (izmērs – 1,15 mm × 80 mm × 150 mm) ir aprīkota ar PZT (izmērs – 0,5 mm × 10 mm × 80 mm), kā redzams 4.10. attēlā. PZT tiek piestiprināts pie loksnes ar 0,25 mm biezuma iepriekš minētās epoksīdsveķu pastas HYSOL EA 9309 kārtu. 3NA QT SISTĒMA.

Tālāk tekstā ir sniegti simulācijas rezultāti diviem dažādiem šī parauga slodzes variantiem.

1. Loksnes spriegojuma imitācija testa mašīnā.

Augšējā un apakšējā mala ir saspiesta, un stiepes tiešais spriegums plāksnes šķērsgriezumā ir vienāds ar 40 MPa. Redzams, ka *PZT* klātbūtne izraisa lokālu loksnes izliekumu un sarežģītu *PZT* slodzi (4.10. att.).

Vidējā (*PZT* tilpumā) sprieguma komponente $\sigma_y = 5,72$ MPa.

Vidējā (*PZT* tilpumā) sprieguma komponente $\sigma_x = -5,05$ MPa.

Ņemot vērā struktūras simetriju attiecībā pret asīm "x" un "y", var secināt, ka *PZT* sprieguma stāvoklis ir tuvs tīras bīdes stāvoklim. Šajā gadījumā, kā parādīts iepriekš, elektriskais potenciāls ir relatīvi zems – 3,81 V.

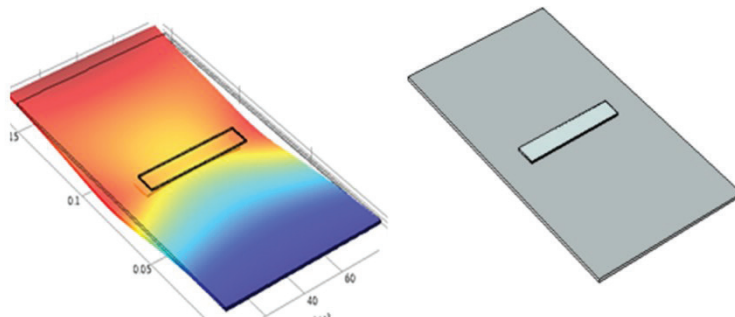
2. Divvirzienu spriegojums. Hermētiska fizelāžas apvalka slodzes imitācija plaknē.

Robežnosacījumi pie ārējā skaitītāja ir noteikti pārvietojumos. Kopējais pagarinājums:

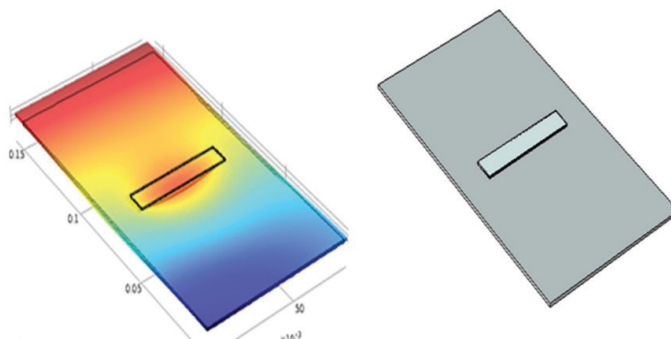
1. *x* ass virzienā ir vienāds ar 0,0229 mm;

2. *y* ass virzienā ir vienāds ar 0,0852 mm.

Redzams, ka *PZT* klātbūtne izraisa lokālu loksnes saliekumu, bet deformācija ir ievērojami mazāka nekā pie vienvirziena stiepes (4.10. un 4.11. att.).



4.10. att. Al plāksne ar *PZT* pie spriegojuma ar spriegumu 40 MPa.



4.11. att. Al plāksne ar *PZT* pie divvirzienu spriegojuma.

Šie pārvietojuma robežnosacījumi atbilst vidējiem robežspriegumiem:

- 1) horizontālām robežām sprieguma komponente $\sigma_y = 54,7$ MPa;
- 2) vertikālām robežām sprieguma komponente $\sigma_x = 35,5$ MPa.

PZT kompleksais sprieguma stāvoklis ir:

- 1) vidējā (PZT apjomā) sprieguma komponente $\sigma_y = 6,99$ MPa;
- 2) vidējā (PZT apjomā) sprieguma komponente $\sigma_x = 13,8$ MPa.

Elektriskais potenciāls ir 117,9 V.

4.3. Ekvivalentā sprieguma un noguruma robeža

Slodzes uzraudzība ir svarīga dinamiski noslogotām konstrukcijām, jo īpaši mašīnu un mehānismu metāla daļām. To izraisa noguruma efekts, ko rada alternatīva ilgstošas iedarbības slodze un kas izpaužas kā noguruma plaisu rašanās. Plaisas ir viens no bīstamākajiem konstrukciju bojājumu veidiem, jo tās izraisa pakāpenisku ļoti ievērojamu stiprības samazināšanos.

Lidojumderīguma prasības pieļauj ekspluatācijā esošu gaisa kuģu gultņu sastāvdaļu noguruma plaisas (drošas bojāejas princips) [29]. Taču atlikusī konstrukcijas stiprība nedrīkst būt mazāka par noteikto minimālo robežu.

Miner vispirms ierosina lineārā kumulatīvā bojājuma noteikuma atvasinājumu [30]. Lai pārbaudītu *Miner* noteikumu, tika veikts liels skaits testu ar mainīgu amplitūdu, un detalizēts to rezultātu pārskats atrodams [31]. Tika noskaidrots, ka kopējā kumulatīvā *Miner* summa pie darbības traucējumiem svārstās no daudz mazākas par 1 līdz ievērojami lielākai par 1. Darbā [32] tika apspriesta ideja par reālistisko *Miner* noteikumu un norādīts, ka noguruma ilguma prognozēšanas uzlabošanai ir nepieciešami testa rezultāti, piemēram, pie slodzes ekspluatācijas.

Ir zināms, ka *Miner* bojājumu skaits ir būtiski atkarīgs no slodzes vēstures apraksta [31, 33]. Populārākā ir tā sauktā lietus plūsmas skaitīšanas metode [34]. Līdzīga metode tika ierosināta [35].

4.3.1. Konstrukcijas stāvokļa novērtēšanas modelis, izmantojot slodzes (sprieguma) monitoringu

Pasažieru gaisa kuģa ekspluatācijas procesu var uzskatīt par lidojumu secību, no kuriem katru var novērtēt pēc diviem vispārīgiem parametriem: lidojuma numura τ_i darba laika τ_i un ārējās slodzes intensitātes, kas tiek novērtēta pēc šī lidojuma noguruma bojājumiem D_i . Abi ir nejauši mainīgie lielumi. Pastāv arī pieņēmums, ka visu lidojumu slodze ir statistiski līdzīga. (4.12. att.) ir parādīta spārna paneļa apvalka spriegumu shematiskā struktūra diviem lidojumiem i un $i + 1$. Zilā līnija atbilst slodzei, ko reģistrē *SHM* sistēma. Pierādīts, ka ir starpības starp divu secīgu lidojumu abiem vispārīgajiem parametriem.

Kā noguruma bojājumu novērtējumu izmanto *Miner's* atsevišķo lidojumu skaitu, kas aprēķināts ar lietus plūsmas skaitīšanas metodi. (4.12. att.)

$$D_i = \sum_{k=1}^m \frac{\tilde{n}_k}{N_f(\sigma_k)} \quad (16.)$$

kur σ_k – cikliskā sprieguma līmenis k lidojuma spektrā i ;
 m – kopējais ciklisko spriegumu līmeņu skaits lidojuma spektrā i ;
 \tilde{n}_k – kopējais šī līmeņa ciklu skaits k lidojumu spektrā i ;
 $N_f(\sigma_k)$ – konstrukcijas elementa noguruma kalpošanas laiks testā ar sprieguma līmeni k .

Šeit ir pieņemts, ka attiecīgajai konstrukcijas sastāvdaļai pilna Ūlera līkne ir funkcija starp ciklu skaitu N_f noguruma bojājumam (noguruma kalpošanas laiks) pie cikliskās slodzes iedarbības ar maksimālo spriegumu σ_f un sprieguma koeficientu R (17. vienādojums).

$$F(\sigma_f, R, N_f) = 0 \quad (17.)$$

Ir vairāki noguruma līknes parametri. Pilnai līknei jābūt arī bojājumu varbūtībai.

Katram lidojumam var noteikt līdzvērtīgu lidojumu: tas ir hipotētisks lidojums, kurā visus noguruma bojājumus rada viens slodzes cikls. 4.12. attēlā ar sarkanas krāsas līniju attēloti ekvivalentie lidojumi i un $i + 1$. Noguruma bojājumu līdzvērtības nosacījums ir vienāds reālajos un ekvivalentajos lidojumos (18. nosacījums):

$$D_i = \sum_{k=1}^m \frac{\tilde{n}_k}{N_f(\sigma_k)} = \frac{1}{N_f(\sigma_{ei})} \quad (18.)$$

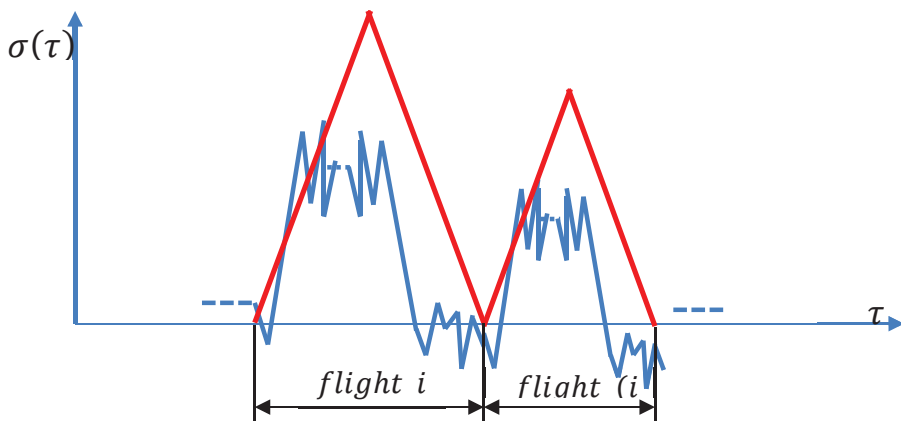
kur σ_{ei} – ekvivalents lidojuma spriegums i .

Rezultātā bojājumu indeksu var noteikt šādi.

1. Pašreizējam lidojumu skaitam N jāaprēķina vidējā ekvivalentā sprieguma novērtējums (19. vienādojums).

$$\bar{\sigma}_e(N) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_{ei} \quad (19.)$$

2. Tam pašam N no noguruma ilguma līknes var iegūt noguruma pretestības spriegumu $\sigma_f(N)$ (piemēram, matemātiski sagaidot $\bar{\sigma}_f(N)$).



4.12. att. Shematisks apvalka sprieguma ieraksts ar SHM sistēmu (zilā krāsā) un ekvivalentais spriegumu cikls (sarkanā krāsā).

3. Ērta bojājumu indeksa forma ir:

$$in(N) = \frac{\bar{\sigma}_e(N)}{\bar{\sigma}_f(N)} \quad (20.)$$

Šis indekss palielinās no 0 (pirms ekspluatācijas sākuma) līdz 1 pie (pilnīga noguruma ilguma patēriņa) (20. vienādojums)

Ja indeksa aprēķināšanai izmanto salīdzināmo parametru matemātiskās prognozes, tad pieļaujamā indeksa vērtība $[in]$ jāierobežo, izmantojot ticamības koeficientu f (21. vienādojums).

$$[in] = \frac{1}{f} \quad (21.)$$

1. piemērs. Jānosaka konstrukcijas elementa noguruma bojājuma indekss kā lidojumu skaita funkcija, ja noguruma ilguma līkni apraksta ar jaudas funkciju:

$$\sigma_f^\alpha N_f = C \quad (22.)$$

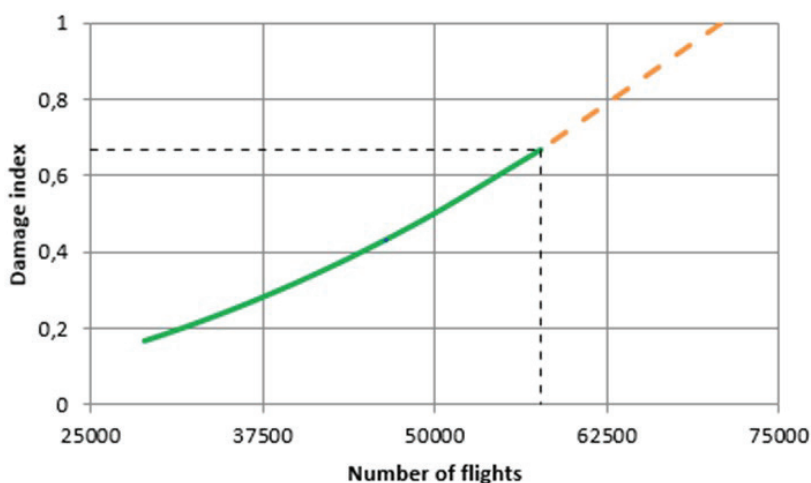
kur α un C – materiāla noguruma ilgmūžības līknes parametri, σ atbilst maksimālajam spriegumam ciklā pie nemainīgas sprieguma attiecības $R = 0$.

Pieļaujiet, ka vidējais ekvivalents spriegums pie liela ciklu skaita ir stabils un vienāds ar 50 MPa. Noguruma ilguma līknes parametri ir $\alpha = 2$ un $C = 5 \cdot 10^5$ (22. vienādojums).

Viegli pamanīt, ka šajā vienkāršajā piemērā:

$$in(N) = \frac{\bar{\sigma}_e(N)}{\left(\frac{C}{N}\right)^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (23.)$$

Aprēķinu rezultāti ir apkopoti 4.13. attēlā. Indeksa pieļaujamo vērtību $[in]$ nosaka, izmantojot $f = 1,5$ (23. vienādojums).



4.13. att. Bojājumu indekss kā lidojumu skaita funkcija.

Noguruma bojājumu indeksa noteikšanas varbūtiskā pieeja ir analizēta mūsu darbā [37] un aprakstīta nākamajā rindkopā.

4.4. Dzīves cikla lietošanas slodzes monitoringa SHM izturības varbūtības modelis

Kopumā dinamiskajā varbūtību modelēšanā balstīta gaisa kuģu SHM sistēma ir spēcīgs instruments, lai prognozētu gaisa kuģa darbības traucējumu vai defekta varbūtību. Nepārtraukti uzraugot gaisa kuģi un analizējot datus, izmantojot statistiskās modelēšanas un analīzes metodes, ir iespējams optimizēt tehniskās apkopes grafikus un remonta darbus, samazinot dīkstāves laiku un līdz minimumam samazinot avāriju vai katastrofālu kļūmju risku.

4.4.1. Veselības un lietošanas uzraudzības sistēma (HUMS)

Ar HUMS palīdzību iegūtos datus var izmantot, lai efektīvāk plānotu tehnisko apkopi un remontu, tādējādi ļaujot efektīvāk izmantot resursus un samazināt dīkstāves laiku. HUMS var izmantot arī, lai optimizētu iekārtu darbību, nosakot jomas, kurās var veikt uzlabojumus, piemēram, mainot darbības procedūras vai izmantojot dažādus materiālus.

Prognostiskā veselības uzraudzība (PHM) ir sistēmas vai iekārtas veiktspējas un veselības stāvokļa uzraudzības metode reāllaikā, lai prognozētu un paredzētu iespējamās kļūmes, pirms tās rodas. Tā izmanto sensoru un analītisko metožu kombināciju, lai apkopotu un analizētu datus un mašīnmācīšanās algoritmus, lai prognozētu turpmāko darbību un paredzētu iespējamās kļūmes. PHM var piemērot dažādām sistēmām, un tam ir daudz priekšrocību, tostarp tas samazina dīkstāves laiku, līdz minimumam samazina risku un optimizē tehniskās apkopes grafikus.

Vibrācijas veselības uzraudzība ir metode, ko izmanto, lai uzraudzītu mašīnu un mehānisko sistēmu veselību un veiktspēju, analizējot iekārtas radīto vibrāciju modeļus. Atklājot un diagnosticējot iespējamus defektus, VHM var palīdzēt proaktīvi veikt tehniskās apkopes un remonta darbības, samazināt dīkstāves laiku un līdz minimumam samazināt katastrofālu bojājumu risku. VHM tiek plaši izmantots dažādās rūpniecības nozarēs, tostarp ražošanā, transportā un enerģijas ražošanā.

4.4.2. Matemātiskais modelis

Visi ar tehnisko sistēmu darbību saistītie nejaušie lielumi parasti atbilst normālajam Gausa sadalījuma likumam (24. vienādojums). Pieņemot, ka tas attiecas uz nejaušajiem lielumiem $\Delta\sigma$ un $\delta\sigma$, izteiksme ir šāda:

$$P_{fa} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\sigma_{pl}-m_{\sigma}} \frac{1}{s_1} e^{-\frac{(\Delta\sigma-m_{\sigma})^2}{2s_1^2}} \int_{\sigma_{pv}-m_{\sigma}-\Delta\sigma}^{+\infty} e^{-\frac{(\delta\sigma)^2}{2s_2^2}} d\delta\sigma d\Delta\sigma \quad (24.)$$

$$P_{pv} = \frac{1}{2\pi} \int_{\sigma_{pv}-m_{\sigma}}^{+\infty} \frac{1}{s_1} e^{-\frac{(\Delta\sigma-m_{\sigma})^2}{2s_1^2}} \int_{-\infty}^{\sigma_{pv}-m_{\sigma}-\Delta\sigma} \frac{1}{s_2} d\delta\sigma d\Delta\sigma \quad (25.)$$

kur S_1 un S_2 – vidējā kvadrātiskā novirze vērtībām $\Delta\sigma$ un $\delta\sigma$,

Vienādojumu (24) un (25) skaitliskās integrācijas ērtībai mainīsim mainīgos pēc analogijas ar līdzīgu varbūtisko uzdevumu risinājumu, kas aprakstīts grāmatā [36]. Šeit mēs ieviesīsim jaunus mainīgos (26. un 27. vienādojums).

$$\text{And} \tag{26.}$$

Noteiksim parametrus

$$c = \frac{\sigma_{pv} - m_\sigma}{S_1} \tag{27.}$$

Tad izteiksmes (24) un (25) būs šādas:

$$P_{fa} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^c e^{-\frac{y_1^2}{2}} \int_{b-ay_1}^{+\infty} e^{-\frac{y_2^2}{2}} dy_2 dy_1 \tag{28.}$$

$$P_{pv} = \frac{1}{2\pi} \int_c^{+\infty} e^{-\frac{y_1^2}{2}} \int_{-\infty}^{b-ay_1} e^{-\frac{y_2^2}{2}} dy_2 dy_1 \tag{29.}$$

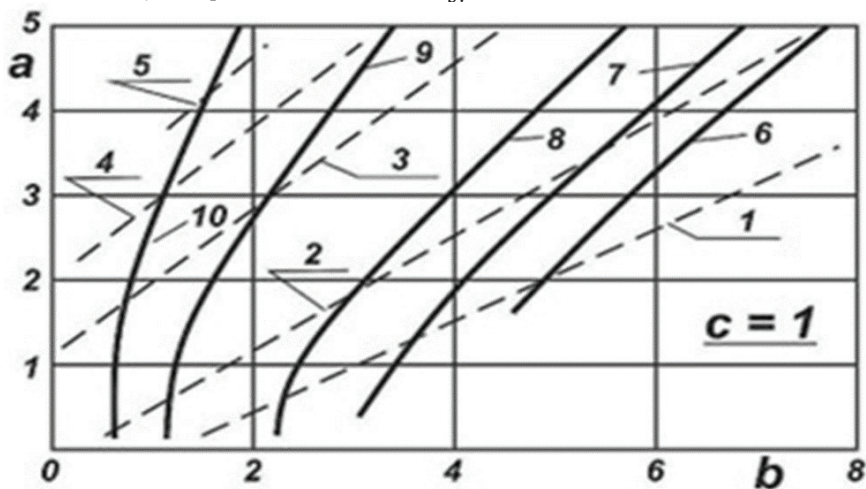
kur $a = \frac{S_1}{S_2}$, $b = \frac{\sigma_{pv}^i - m_\sigma}{S_2}$.

28. un 29. vienādojuma sistēmas atrisināšanas rezultāts, kas iegūts, izmantojot labi zināmās skaitliskās metodes, redzams 4.14. attēlā parametru a , b un c nomogrammas veidā.

Bīstamas situācijas ar postošām sekām novēršanas varbūtība (1: $P_{pv} = 1.5 \cdot 10^{-1}$; 2: $P_{pv} = 10^{-1}$; 3: $P_{pv} = 10^{-2}$; 4: $P_{pv} = 10^{-3}$; 5: $P_{pv} = 10^{-4}$).

Displeja sistēmas kļūdainas iedarbināšanas varbūtība (6: $P_{fa} = 10^{-4}$; 7: $P_{fa} = 10^{-3}$; 8: $P_{fa} = 10^{-2}$; 9: $P_{fa} = 10^{-1}$; 10: $P_{fa} = 2 \cdot 10^{-1}$).

Kā redzams 4.14. attēlā, pie dotajām iespējamībām P_{fa} un P_{pv} , kā arī pēc nejaušo lielumu sadalījuma parametriem m_σ , S_1 un S_2 un pie dotajām vērtībām σ_{pv} var noteikt ierobežojuma parametra vērtību s'_{dv} .



4.14. att. Nomogramma parametru a , b un s noteikšanai.

4.5. Akustiskā emisija

Viena no *AE* priekšrocībām, salīdzinot ar citām ultraskaņas metodēm, ir tā, ka tā ir pasīva metode, t. i., monitorējamajam materiālam nav nepieciešams pievadīt ārēju enerģijas avotu. Tas padara *AE* par noderīgu metodi ilgstošai nepārtrauktai konstrukciju uzraudzībai, jo nepastāv risks, ka uzraudzības procesa dēļ konstrukcijai varētu rasties papildu bojājumi.

Tomēr viens no iespējamiem *AE* ierobežojumiem ir tas, ka, pamatojoties uz konstatēto sprieguma viļņu frekvenču diapazonu, var būt grūti atšķirt dažādus bojājumu veidus. Turklāt *AE* sensoru savākto datu interpretācija var būt sarežģīta un prasa kvalificētus analītiķus, lai precīzi identificētu un klasificētu dažādus bojājumu veidus.

Šis apakšnodaļas mērķis ir iepazīstināt ar jaunākajām tendencēm un *AE* kā pasīvo metožu pielietojumu helikopteru konstrukciju bojājumu noteikšanas tehnikā [37].

Viens no svarīgākajiem ekspluatācijas kritērijiem, kas saistīts ar helikoptera konstrukciju, ir kalpošanas laiks. Konstrukcija sastāv no elementiem ar ierobežotu kalpošanas laiku. Šie elementi tieši ietekmē lidojumu drošību. Piemēram, šie elementi ir atsevišķi konstruktīvie elementi, piemēram, planera, galvenā rotora lāpstiņas un savienojumi, aizmugures rotors, galvenais reduktors, apakšreduktors, aizmugures reduktors, galvenā un aizmugures vārpsta utt. [24]

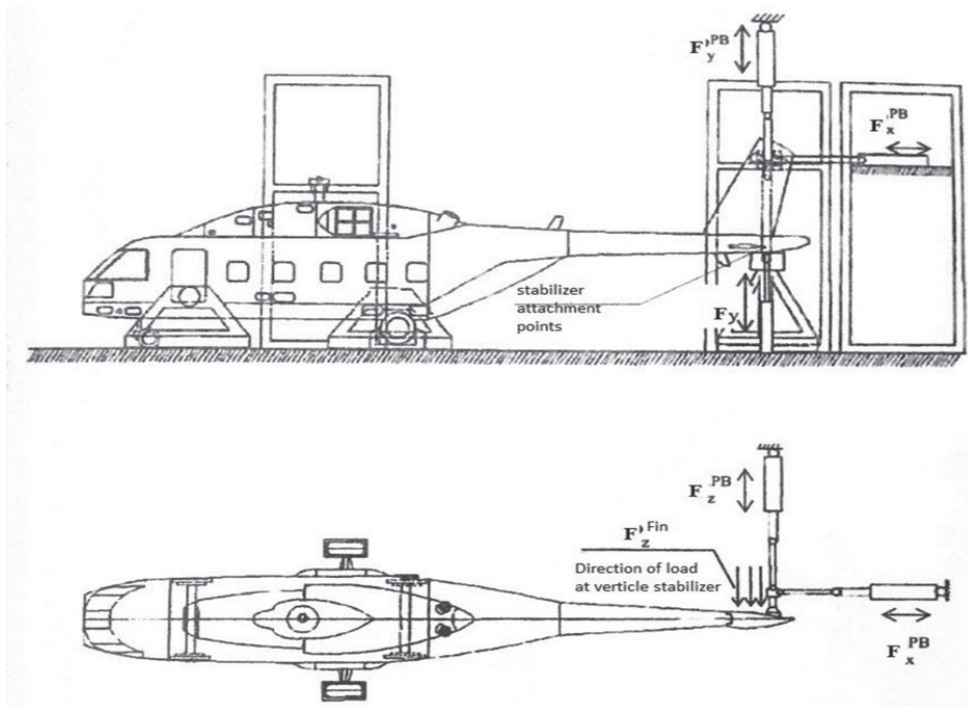
Vienīgais risinājums, kā pagarināt helikoptera kopējo kalpošanas laiku, ir krasi palielināt to elementu kalpošanas laiku, kuriem ir ierobežots kalpošanas laiks, līdz tie sakrīt ar helikoptera plāna kalpošanas laika vērtību. Lai pamatoti paplašinātu ierobežojošo elementu (elementu, kas nosaka robežas) resursus, ir jāsniedz gandrīz reāli dati par šo elementu slodzi parastā lidojuma režīmā, kā arī reāla mēroga modeļu testēšanas dati, stiprības analīze utt. Mūsdienās šādu materiālu izvēle ir ierobežota, tāpēc ir nepieciešams veikt reālus pilna mēroga testus laboratorijā / stendā, lai noteiktu konstrukcijas elementu kalpošanas laika vērtības lidojuma režīmā. Iegūtie dati jāizmanto helikoptera konstrukcijas elementu daļu kalpošanas laika papildu (dubultās pārbaudes) aprēķinos. Veicot šos aprēķinus, jāņem vērā detaļu īstermiņa izturības un ilgmūžības novērtējums. Rezultātā jāsaprot nobeiguma ziņojums ar secinājumiem par ekspluatācijas laika saprātīgu palielināšanu.

Noguruma testēšanas mērķis ir izvēlēties metodi, kā precīzi piestiprināt vidus un aizmugures reduktorus, un tas pats tiek piemērots arī mehāniskajai konstrukcijai (aizmugures balstam un spurai), izvietojot reduktorus atbilstoši noguruma prasībām. [24]

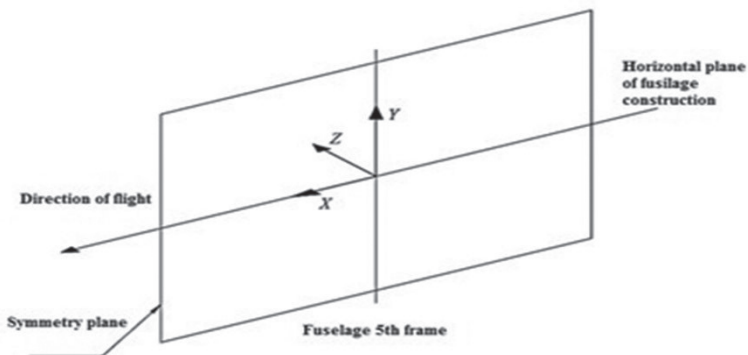
Saskaņā ar testēšanas rezultātiem jāveic vairākas darbības:

Jānorāda tehniskā kalpošanas laika vērtība (kalpošanas laika periods, kurā ekonomisku apsvērumu dēļ ir iespējams ekspluatēt helikoptera mehānismu). Ekspluatācijas periods līdz pirmajai tehniskajai apkopei/novērošanai. Jānosaka apkopes darbu ilgums, lai helikopteru varētu droši ekspluatēt. Jānosaka atbilstoši ekspluatācijas slodžu parametri (spēja izturēt slodzi laika periodā, ar dažām noguruma plaisām konstrukcijā). [24]

Lai gan visu iepriekš minēto uzdevumu risināšana nav iespējama tikai ar izolētu detaļu (reduktoru, dzinēja utt.) "stenda" testēšanu, jo šādos testos netiek ņemta vērā "blakus esošo" detaļu ietekme. Mehāniskās konstrukcijas jāspriego tā, lai katra zona būtu pakļauta norādītajai slodzei. Noguruma testēšana tiek veikta ar helikoptera mehānismu (4.15. att.). [24]



4.15. att. Eksperimentālā stenda modelis helikoptera astes sijas un vertikālā stabilizatora noguruma izturības pārbaudei.



4.16. att. Definētā koordinātu sistēma [24].

Šajā eksperimentā izmantotā koordinātu sistēma ir redzama 4.16. attēlā.

X ass ir izlīdzināta ar lidojuma virzienu (tā atrodas fizelāžas vidū).

Y ass ir perpendikulāra X asij un vērsta uz augšu.

X un Y ass atrodas fizelāžas vidū (šaurā plaknē).

Z ass ir perpendikulāra XY plaknei.

Koordinātu sistēmas nulles punkts atrodas uz X ass, kur to šķērso piedziņas rāmis.

Visām mēriekārtām jābūt sertificētām, un tām jābūt ar pareizu precizitāti. Šī iekārta nedrīkst pārsniegt $\pm 5\%$ mērījumu kļūdu.

Laboratorija ir atbildīga par deformācijas sensoru tipa izvēli. Deformācijas sensoru mērījumu kļūda nedrīkst pārsniegt $\pm 5\%$ no maksimālās sprieguma vērtības[24].

Testēšanas stenda prasības:

Testēšanas stendam jābūt aprīkotam ar visu nepieciešamo aprīkojumu, kas nodrošina iespēju veikt testēšanu, ja mehānisms ir nostiprināts kādā no šiem veidiem:

- a) [uz piedziņas grīdas] tiek izmantots strukturāls šasijas rāmis;
 - b) mehānisms ir piestiprināts pie astes rotora vārpstas, šasijas nesaskaras ar zemi. [38]
- ▶ Stenda aprīkojumam jāspēj pielikt statistisku slodzi (4.15. att.):
 - a) pie aizmugures rotora punktos FPB_x, FPB_y, FPB_z ;
 - b) pie spuras savienojuma punkta;
 - c) lai sadalītu slodzi F finz, kas iedarbojas uz spuru. [24]
 - ▶ Stendam jābūt aprīkotam ar sistēmu, kas ļauj ātri kontrolēt pieliktās slodzes un automātiski reģistrēt rezultātus.

4.6. Daži pasīvās SHM sistēmas pilna mēroga testa rezultāti, izmantojot akustisko emisiju (AE)

Kā ilustrācija integrēto pjezoelektrisko sensoru izmantošanai konstrukcijas uzraudzībai stenda testu laikā turpmāk ir sniegts piemērs viegla helikoptera pilna izmēra konstrukcijas detaļas noguruma testu plānošanai un veikšanai, kuros darba autore aktīvi piedalījās. Testu galvenais uzdevums bija eksperimentāli pierādīt helikoptera korpusa karkasa visvairāk noslogotās (griestu) daļas noguruma izturību, izmantojot līdzvērtīgu slodzes stendu. Testu galvenais uzdevums bija eksperimentāli pierādīt helikoptera korpusa karkasa visvairāk noslogotās (griestu) daļas noguruma izturību, izmantojot līdzvērtīgu slodzes stendu.

4.6.1. Īsa informācija par pjezo pārveidotāju uzstādīšanu Akustiskā emisija (AE)

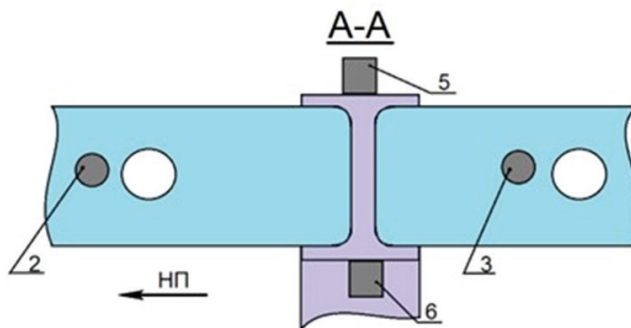
Veicot helikoptera rāmja Nr. 4 labās griestu daļas noguruma testus, tika izmantota astoņu kanālu *Vallen System AMSY-6* sistēma. AE signālu reģistrācija tika veikta, izmantojot septiņus kanālus (2-8 AE sensori). AE sensori tika uzstādīti

cikliskās slodzes piemērošanas zonā ar pozitīvu vērtējumu saskaņā ar darba uzdevumu (4.17. att.).

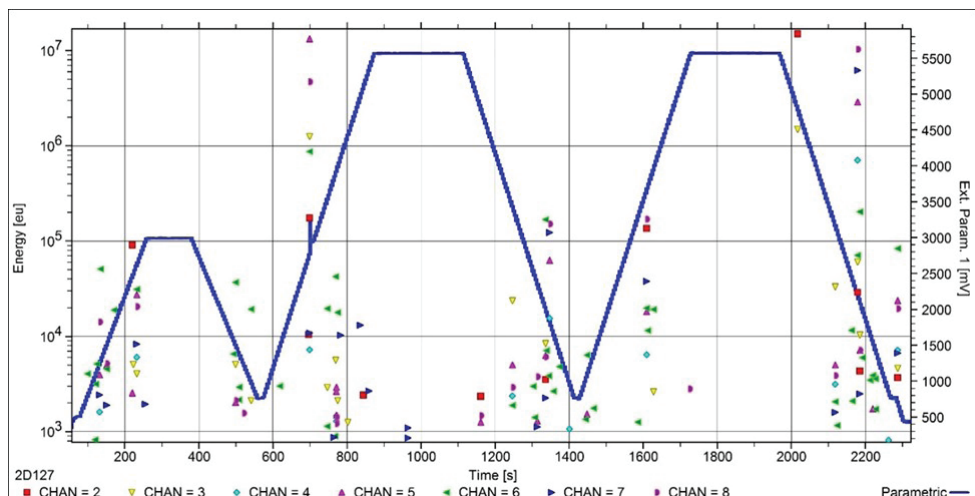
Testa laikā tika reģistrēta signāla amplitūda, enerģija, kopējais rezultāts, signāla ilgums, signāla pieauguma laiks, spriegums pie parametriskās ieejas, sliekšņa robežvērtība, signāla stiprums, vidējais signāla stiprums.

4.6.2. Papildu testa režīmi AE kontroles laikā un dažu rezultātu uzrādīšana

Galvenais kritērijs, kas raksturo noguruma plaisu veidošanos un attīstību, ir kopējā stāvokļa izmaiņas katrā reģistrācijas kanālā. Papildus pašreizējo AE parametru izmaiņu kontrolei katrā slodzes ciklā, lai palielinātu kontroles ticamību, AE parametru mērījumi tika veikti statistiskās slodzes apstākļos saskaņā ar šādu



4.17. att. Akustiskās emisijas sensoru izvietojums un numerācija rāmja Nr. 4 labajā griestu pusē (2-8 AE sensori).



4.18. att. AE signālu amplitūdas atkarības no laika grafika piemērs pakāpjveida statistiskās slodzes laikā ar plauktiem (ar darbības laiku 1 000 000 slodzes ciklā).

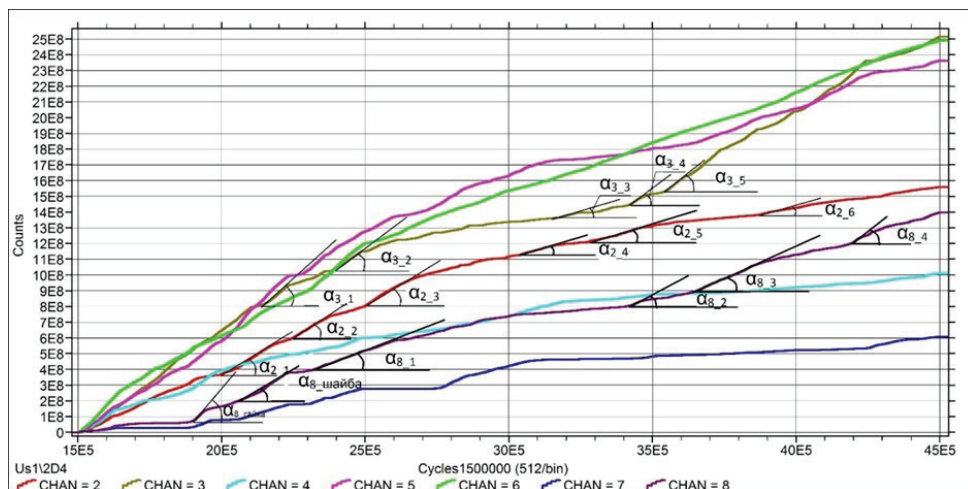
programmu: periodiski ik pēc 500 tūkstošiem ciklu. Slodzes ciklos tika veikta pakāpeniska statistiska slodzes pievienošana ar slēdža ātruma plauktiem 4 minūšu garumā saskaņā ar īpašu programmu (4.18. att.).

Lai vēlāk apstiprinātu noguruma plaisas veidošanās laiku, periodiski ik pēc 1000 cikliem uz 15 minūtēm tika veikts marķiera slodzes režīms ar slodzi, kas ir par 50 % mazāka nekā otrā posma darba slodze. Marķēšanas režīms nodrošina iespēju vizuāli fiksēt noguruma plaisas rašanās laiku turpmākajos lūzuma destrukcijas mikroreljefa fraktogrāfiskajos pētījumos.

4.19. attēlā redzami pašreizējie rezultāti, kas attēlo kopējā *AE* stāvokļa izmaiņu atkarību no slodzes ciklu skaita katram kanālam atsevišķi.

No 4.19. attēlā redzamā grafika izriet, ka *AE* kopējā stāvokļa izmaiņas nav stacionāras. Pietiekami izteikta α kritērija parādīšanās dažādos slodzes posmos liecina par bojājumu rašanos un attīstību konstrukcijā. Bojājumu raksturs tika noteikts, pamatojoties uz turpmāko analīzi un *AE* mērījumu datu salīdzinājumu ar tālākiem vizuālās pārbaudes rezultātiem.

Līdztekus sertifikācijas testiem tika novērtētas iespējas izmantot ieviestos pjezokeramiskos pārveidotājus kā sensorus pasīvai ultraskaņas kontrolei pilna izmēra konstrukciju noguruma testu laikā. Interesanti, ka konstrukcijas slodzes intensitāte testēšanas laikā parasti ir lielāka nekā ekspluatācijas laikā. Ekvivalents ilgums ir vairākas reizes lielāks par ekspluatācijā esošā gaisakuģa ekspluatācijas laiku. Iegūtie rezultāti ļauj veikt optimālu pjezoelektrisko pārveidotāju parametru izvēli to izmantošanai pasīvajā monitoringā – pjezoelektrisko pārveidotāju funkcionālās un izturības īpašības, ģeometriskie izmēri, modālās īpašības, ieviešanas veids konstrukcijā, aizsardzības veids pret ārējām ietekmēm.



4.19. att. Kopējā *AE* stāvokļa izmaiņas atkarībā no slodzes ciklu skaita pa kanāliem darbības laika posmā no 1,5 līdz 4,5 miljoniem ciklu (otrais slodzes režīms).

5. VISPĀRĒJIE SECINĀJUMI

Šajā promocijas darbā ir analizētas un risinātas vairākas būtiskas konstrukciju ultraskaņas veselības monitoringa darbaspējas un uzticamības problēmas, kas galvenokārt saistītas ar iebūvēto pjezokeramisko pārveidotāju, kas darbojas gan aktīvā, gan pasīvā bojājumu noteikšanas režīmā, pašreizējās informācijas izmantošanu.

Lai sasniegtu formulēto vispārīgo mērķi, ir atrisināti vairāki uzdevumi.

1. Ir pabeigta pjezokeramisko pārveidotāju stiprības analīze, izmantojot interneta resursus, eksperimentālos datus un galīgo elementu analīzi (*FEA*) par sprieguma stāvokli tipiskai uzstādīšanai un tipiskai ekspluatācijas slodzei. Tiek sniegti ieteikumi statiskās un cikliskās slodzes bojājumu novēršanai.
2. Veikts *EMI* novērtējums kā galvenā noguruma plaisu noteikšanas metode. Veikts alternatīvu bojājumu indeksu īpašību salīdzinājums. Izstrādāta detalizēta mērījumu datu apstrādes procedūra.
3. Pētīta plaisas atvēršanas/aizvēršanas ietekme uz *EMI* un novērtēta šīs ietekmes piemērotība plaisas tipa bojājumu noteikšanai.
4. Ir izstrādāti divi uzlaboti bojājumu indikatori plaisas tipa bojājumu noteikšanai, izmantojot vadāmo viļņu tehnoloģiju. Abas bojājumu indikācijas (*RMSD* un lidojuma laiks) ir balstītas atbildes signāla konvolūcijā, kurai ierosmes signāls tiek izmantots kā mātes funkcija.
5. Demonstrēts *SHM* bezatsauces virtuālās sistēmas pielietojuma piemērs (pasažieru lidmašīnas hermētiska fizelāžas apvalka gadījumā). Var secināt, ka hermētiskā fizelāžas konstrukcija ir ļoti ērta joma ultraskaņas tehnoloģijas pielietošanai konstrukcijas veselības uzraudzībai, kas izmanto plaisu atvēršanas/aizvēršanas efektu.
6. Analizēts pjezoelektriskā pārveidotāja pielietojums slodzes uzraudzībai. Izstrādāts noguruma bojājumu indekss, izmantojot lietus plūsmas metodi ekspluatācijas slodzes skaitīšanai, noguruma testu datus un simulācijas rezultātus. Indeksa pieļaujamo vērtību galvenokārt nosaka drošības koeficients.
7. Izmantojot slodzes monitoringu, ir sniegts izturības varbūtības modelis kalpošanas laika *SHM*. Izmantojot šo modeli, iespējams atrisināt problēmu, kā pareizi noteikt maksimāli pieļaujamo parametru vai diagnostikas zīmi indikācijai pilotu kabīnē, ja iepriekš ir zināma tās faktiskās vērtības iepriekš noteiktā robeža.
8. Akustiskās emisijas (*AE*) kā pasīvās ultraskaņas metodes lietojums ir analizēts, ņemot vērā tās izmantošanu gaisa kuģu pilna izmēra sastāvdaļu laboratorijas testos. Formulētas stenda testa pamattehniskās prasības helikopteru pilna mēroga testēšanai reālajā laikā. Stenda testu rezultātus var izmantot helikopteru elementu resursu aprēķinos saskaņā ar īstermiņa stiprības un izturības kritērijiem.

BIBLIOGRĀFIJA

1. Alfredo Guemes, "SHM tehnoloģijas un pielietojumi gaisa kuģu konstrukcijās", 5. starptautiskais simpozijš par NDT kosmosa nozarē, 2013. gada 13.–15. novembris, Singapūra, https://www.ndt.net/article/aero2013/content/papers/61_Guemes
2. Tanimoto, T., Yamamoto, K. & Morii, T, "Pjezoelektriskās keramikas nelineārā izturība pret spriegumu un deformāciju stiepes slodzes apstākļos", .9. IEEE starptautiskā simpozija par feroelektriķu lietojumiem materiāli, IEEE (1994): 394–397, IEEE Xplore Full-Text PDF.
3. Bin Lin, Victor Giurgiutiu, Patrick Pollock, Buli Xu and James Doane, "Pjezoelektrisko plākšņu aktīvo sensoru ilgmūžība un dzīvotspēja uz metāla konstrukcijas", AIAA Journal 201048:3, 635.–643.lpp, <https://doi.org/10.2514/1.44776>
4. C. Meisner, C. Stolz, F. Hofmann, "PZT pārveidotāju ilgmūžības novērtēšana vadīto viļņu shm sistēmām, izmantojot stiepes statiskos un noguruma testus", Publikācija: 7. starptautiskais simpozijš par nesagraujošo materiālu pārbaudi kosmosā, 2015. gada 16.–18. novembris, Brēmene, Vācija (AeroNDT 2015), www.ndt.net/search/docs.php3?id=18940
5. I. Pavelko, "Pētījumi par pjezokeramikas pārveidotāju aizsardzību pret iznīcināšanu mehāniskas slodzes rezultātā", Starptautiskais virtuālais zinātnes, tehnikas un inovāciju žurnāls rūpniecībai, 7. numurs (2010), 17–21.
6. I. Pavelko, V. Pavelko, S. Kuznetsov, E. Ozolinsh, I. Ozolinsh, H. Pfeiffer, M. Wevers, "Gaisa kuģa sastāvdaļas strukturālās veselības uzraudzības problēmas", Starptautiskās Aeronavigācijas zinātņu padomes 27. kongresa materiāli, Nica, Francija, 2010. gada 19.–24. septembris., (Section 10, ICAS 2010-10.6.1).
7. C. T. Sun, "Pjezokeramikas plaisāšana un nogurums mehāniskās un elektriskās slodzes apstākļos", Izturība 2000, Izturības seminārs, Bērklīja, Kalifornija, 2000. gada 26.–27. oktobris. 2001, 231–244. lpp.
8. Liang, C., Sun, F.P. and Rogers, C.A. Adaptīvas materiālu sistēmas saistītā elektromehāniskā analīze - izpildmehānisma enerģijas patēriņa un sistēmas enerģijas pārneses noteikšana. Intelīgento materiālu sistēmu un struktūru žurnāls, 5, 12.–20. lpp, 1994.
9. Sun, F. P., Liang, C. and Rogers, C. A. Eksperimentālā modālā testēšana, izmantojot pjezokeramikas plāksterus kā izvietotus sensorus-aktuatorus. 1994. gada SEM pavasara konferences un izstādes materiāli, Baltimora, MI, 1994. gada 6.–8. jūnijs.
10. Sun, F. P., Chaudhry, Z., Rogers, C. A. and Majmundar, M. Automatizēta reāllaika struktūras stāvokļa uzraudzība, izmantojot paraksta rakstu atpazīšanu. Materiāli, SPIE Ziemeļamerikas konference par viedajām konstrukcijām un materiāliem, 2443. sējums Sandjego, Kalifornija, 1995. gada 26. februāris–3. marts, 236.–247. lpp.
11. Chaudhry, Z., Sun, F. P. and Rogers, C. A. Kosmosa struktūru veselības uzraudzība, izmantojot pretestības mērījumus. Piektā starptautiskā adaptīvo konstrukciju konference, Sendai, Japāna, 5.–7. decembris. 584.–591. lpp, 1994
12. Chaudhry, Z., Joseph, T., Sun, F. and Rogers, C. Gaisa kuģu vietēja mēroga veselības stāvokļa uzraudzība, izmantojot pjezoelektrisko izpildmehānismu/sensoru plāksterus. Materiāli, SPIE Ziemeļamerikas konference par viedajām konstrukcijām un materiāliem, 2443. sējums Sandjego, CA, 26. februāris-3. marts, 268.-276. lpp, 1995.
13. Ayres, T., Chaudhry, Z. and Rogers, C. Lokalizēta civilās infrastruktūras veselības stāvokļa uzraudzība, izmantojot pjezoelektrisko aktuatoru/sensoru plāksterus. Materiāli, SPIE 1996. gada simpozijš par viedām konstrukcijām un integrētām sistēmām, SPIE, 2719. sējums, 123.–131. lpp, 1996.

14. Giurgiutiu, V. and Rogers, C. A. Elektromehāniskā (E/M) pretestības metode konstrukciju veselības uzraudzībai un nesagraujošai novērtēšanai. Starptautiskais seminārs par konstrukciju veselības monitoringu Stenfordas Universitāte, CA, 18.–20., 433.–444. lpp, 1997. gada septembris
15. Giurgiutiu, V. and Zagrai, A. Pjezoelektrisko plākšņu aktīvo sensoru raksturojums. Inteliģento materiālu sistēmu un struktūru žurnāls, 11(12), 959.–976. lpp, 2000.
16. Giurgiutiu, V., Zagrai, A. and Bao, J. (2002). Pjezoelektrisko plākšņu aktīvie sensori (PWAS), USC IPMO izgudrojuma izpauzums #00330/2002.
17. Victor Giurgiutiu, Andrei Zagrai and Jing Jing Bao. Pjezoelektriskās plāksnītes iegultie aktīvie sensori novecojošo gaisa kuģu konstrukciju veselības uzraudzībai. SHM, 2002, 1(1) sējums: 0041–61
18. V. Pavelko. Jauni elektromehāniskās pretestības modeļa lietojumi SHM. Publicēts: Strukturālo un bioloģisko sistēmu veselības uzraudzības 2014, Amerikas Savienotās Valstis, Sandjego, 2014. gada 9.–13. marts. Bellingham: SPIE, 2014, pp.90640Y-1-90640Y-15. ISBN 978-0-8194-9990-5. Pieejams: doi:10.1117/12.2044260
19. W. Thomson, "Par metālu elektrodinamiskajām īpašībām: Magnetizācijas ietekme uz niķeļa un dzelzs elektrovadītspēju," Londonas Karaliskās biedrības materiāli, 8. sējums, 1856, 546.–550. lpp. <http://dx.doi.org/10.1098/rspl.1856.0144>
20. H. Tomlinson. Spriedzes un deformācijas ietekme uz fizikālo spēku iedarbību. Phil. Trans. 174. sējums, 1.–172. lpp 1883 <https://doi.org/10.1098/rstl.1883.0001>
21. H. Rolnick. Metālu stiepes pretestības koeficients. Phys. Rev. 36(3), 506–512 (1930) DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.36.506>
22. J. W. Cookson. Pjezoizturības efekta teorija. Phys. Rev. 47(2) 194-195 (1935) DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.194.2>
23. M. A. Radhika, V. G. M. Annamdas, "Eksperimentāli pētījumi par konstrukciju slodzes uzraudzību, izmantojot uz elektromehāniskās pretestības metodi balstītu pjezoelektrisko sensoru", Pārskata zinātniskais žurnāls (2013) 2(1) ISSN 2322-2433.
24. M. Urbaha, K. Carjova, P. Nagaraj, V. Turko, "Prasības helikoptera mehānisma konstrukcijas noguruma testēšanai", 22. starptautiskās zinātniskās konferences materiāli. Transport Means 2018,
25. J. W. Cookson, "Pjezoizturības efekta teorija", Phys. Rev. 47(2) 194–195 (1935), <https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.194.2>.
26. H. Rolnick, "Metālu stiepes pretestības koeficients", Phys. Rev. 36(3), 506–512 (1930), <https://doi.org/10.1103/PhysRev.36.506>
27. C. S. Smith, "Pjezoizturības efekts germānijā un silīcijā", Phys. Rev. 94(1), 42–49 (1954), <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.94.42>
28. Joseph C. Doll, Beth L. Pruitt, "Pjezorezistoru projektēšana un lietojumi (Mikrosistēmas un nanosistēmas)" Springer, 2013. 245 pages, DOI: 10.1007/78-1-4614-8517-9.
29. Gaisa kuģu lidojumderīgums. Konvencijas par starptautisko civilo aviāciju 8. pielikums. ICAO. ISBN 978-92-9231-518-4.
30. M. Miner. Kumulatīvie bojājumi noguruma gadījumā. J. Appl. Mech. Sep 1945, 12(3): A159–A164 (6 lapas) <https://doi.org/10.1115/1.4009458>
31. Jaap Schijve. Konstrukciju un materiālu nogurums. Springer, 2010. 621 lapas.
32. Schütz, D. and Lowak, H., Standartizētas testa programmas piemērošana transporta gaisa kuģu spārnu komponentu noguruma ilguma novērtēšanai. Proc. ICAF Symp., Lozanna, Materiāls 3.64 (1975).
33. Schütz, W., Standartizēta sprieguma laika vēsture: Pārskats. Noguruma slodzes spektru izveide, STP 1006, ASTM (1989), 3.–16. lpp

34. Matsuishi, M. and Endo, T., Metālu nogurums, kas pakļauti mainīgam spriegumam – nogurums nejaušas slodzes apstākļos. Japānas Mašīnbūves inženieru biedrības Kjušu apgabala sanāksmes provizoriskie materiāli (1968), 37.–40. lpp [japāņu valodā].
35. Burns, A., Noguruma slodzes lidojuma laikā: Slodzes lidmašīnas *Varsity* astes plaknē un spuras daļā. A.R.C. Technical Report C.P.256. Londona (1956).
36. Mil, M. L. et al. (1967) “Vertoleti. Raschet I projektirovanie (Helikopteri. Aprēķini un inženierija)”. 2. grāmata. Kolebanija i dinamicheskaja prochnostj (Svārstības un dinamiskā izturība). Makava: Machinostroenie, 424.
37. Dimitrios G. Aggelis, Markus G. R. Sause, Pawel Packo, Rhys Pullin, Steve Grigg, Tomaž Kek, and Yu-Kun Lai, “Akustiskā emisija”, (2021) Strukturālās veselības uzraudzības bojājumu atklāšanas sistēmas kosmiskajai aviācijai, Springer Aerospace Technology, https://www.ndt.net/article/ndtreview/papers/Aggelis2021_Chapter_AcousticEmission.pdf



Pavithra Nagaraj dzimusi 1985. gadā Bangalūru pilsētā, Indijā. Ieguvisi bakalaura grādu aeronautikā *VSM aerospace Bangalore* Indijā (2009), gaisakuģu tehniskās apkopes inženiera kvalifikāciju (licencēta aviācijas elektronika) *DGCA India* (2008) un profesionālo maģistra grādu aviācijas transportā Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU; 2017). Kopš 2017. gada ir RTU Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātes Aeronautikas institūta zinātniskā asistente un Aeronautikas sistēmu un lidaparātu ekspluatācijas katedras asistente. Piedalījies divos Eiropas projektos. No 2010. līdz 2015. gadam bijusi licencēta aviācijas elektronikas tehniskās apkopes inženiere *Zephyr aerospace Bangalore*, *ADE* (aizsardzības laboratorijas) *DRDO*. Piedalījies sešos aizsardzības projektos Indijā. No 2007. līdz 2008. gadam strādājusi par tehniķa praktikanti *Deccan chartered* Helikopteru nodaļā. Pētniecības intereses saistītas ar *NDT*, akustisko emisiju, gaisakuģu konstrukcijām, vibroakustiku, helikopteru konstrukcijām, skaitlisko analīzi, kompozītiem un bezpilota lidaparātiem.