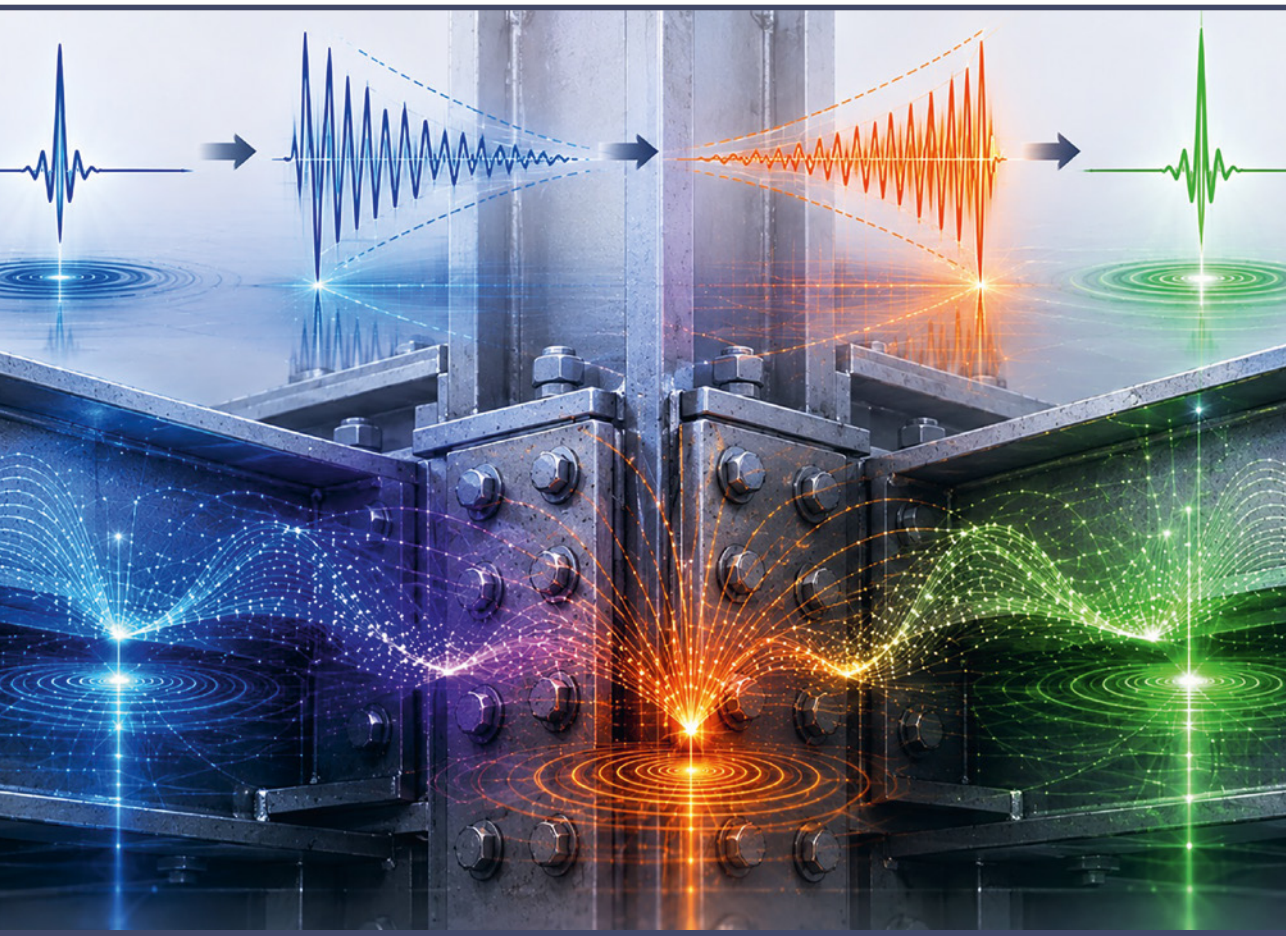
Viktors Kurtenoks

KONSTRUKCIJU SAVIENOJUMU INTEGRITĀTES DAUDZDIMENSIONĀLA NOVĒRTĒŠANA, IZMANTOJOT PA ASĪM SASKAŅOTAS REAKCIJAS KORELĀCIJU, KAS UZLABOTA AR TRIECIENA FOKUSĒŠANU LAIKA REVERSIJAS CEĻĀ

Promocijas darba kopsavilkums



RTU Izdevniecība
Rīga 2026

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Būvniecības un mašīnzinību fakultāte
Augstas veiktspējas materiālu un konstrukciju institūts

Viktors Kurtenoks
Doktora studiju programmas "Būvniecība" doktorants

KONSTRUKCIJU SAVIENOJUMU INTEGRITĀTES DAUDZDIMENSIONĀLA NOVĒRTĒŠANA, IZMANTOJOT PA ASĪM SASKAŅOTAS REAKCIJAS KORELĀCIJU, KAS UZLABOTA AR TRIECIENA FOKUSĒŠANU LAIKA REVERSIJAS CEĻĀ

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

profesors *Dr. sc. ing.*
JEVGENIJS BARKANOVS

Dr. sc. ing.
ALEKSEJS TATARINOVS

RTU Izdevniecība
Rīga 2026

Kurtenoks, V. Konstrukciju savienojumu integritātes daudzdimensionāla novērtēšana, izmantojot pa asīm saskaņotas reakcijas korelāciju, kas uzlabota ar trieciena fokusēšanu laika reversijas ceļā. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. – 46 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-06" 2026. gada 17. augusta lēmumu Nr. 04030-9.6/22.

Vāka attēlu ir veidojis autors, izmantojot ģeneratīvā mākslīgā intelekta rīkus.

https://doi.org/10.7250/9789934373633
ISBN 978-9934-37-363-3 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2026. gada 27. novembrī plkst. 14 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības un mašīnzinību fakultātē, Ķīpsalas ielā 6A, 538. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Aleksandrs Korjakins,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Igors Kabaškins,
Transporta un sakaru institūts, Latvija

Profesors *Dr. Raimondas Pomarnacki*,
Viļņas Ģedimina tehniskā universitāte, Lietuva

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.

Viktors Kurtenoks ……. (paraksts)
Datums: ……

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir anotācija, septiņas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 18 attēli, divas tabulas, deviņi pielikumi, kopā 138 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 33 nosaukumi. Kopsavilkuma attēlos saglabāti apzīmējumi angļu valodā atbilstoši promocijas darba valodai.

ANOTĀCIJA

Uzticama konstrukciju savienojumu integritātes novērtēšana ir būtiska inženierbūvju drošības un ekspluatācijas piemērotības nodrošināšanai, tomēr esošajām diagnostikas pieejām konstrukciju strukturālā stāvokļa monitoringā bieži ir raksturīga virzieniski nepilnīga novērojamība. Lielākajā daļā metožu mērījumi faktiski ir viendimensionāli vai arī, izmantojot daudzasu sensorus, tie joprojām balstās tādā ierosmē, kas nenodrošina kontrolētu daudzdimensionālu reakciju intereses punkta apkārtnē. Tā rezultātā agrīnas stadijas, pa asīm selektīvas degradācijas pazīmes var palikt neatklātas, tādējādi ierobežojot pašreizējās diagnostikas prakses uzticamību.

Šajā promocijas darbā, kas sagatavots kā publikāciju kopa, izstrādāta un eksperimentāli validēta sinhronizēta daudzdimensionāla diagnostikas pieeja, kas paredzēta minēto ierobežojumu pārvarēšanai. Zinātniskā novitāte ir saistīta ar piecu savstarpēji atkarīgu komponentu sistemātisku integrāciju: trīsdimensiju paātrinājuma mērījumu pāriem konstrukciju savienojuma pretējās pusēs kopīgā reakcijas apgabalā, kas fokusēts ar laika reversijas metodi; kontrolētu daudzdimensionālu ierosmi, kas balstīta laika reversijas viļņu fokusēšanas principos; sinhronizētiem ierosmes un mērīšanas kanāliem; katras ass koherences novērtēšanu starp pretējo pušu paātrinājuma reakciju pāriem, kā arī virzienisko indikatoru apvienošanu vienā skalārā savienojuma stāvokļa metrikā.

Promocijas darba pamatā ir trīs savstarpēji papildinošas publikāciju grupas, kas veido vienotu pētījuma trajektoriju. Pirmajā grupā ir izveidots pa asīm saskaņotu daudzasu reakciju mērījumu pamats, kā arī korelācijā balstīti indikatori, skalāru metriku apvienošanas pieeja un degradācijas imitācijas procedūras dažādiem konstrukciju objektiem un materiāliem. Otrā grupa sniedz laika reversijas viļņu fokusēšanas teorētisko bāzi, kas nepieciešama, lai reakciju salīdzināšanu attiecinātu arī uz kontrolētu daudzdimensionālu ierosmi. Trešā grupa aplūko augstas precizitātes laika mērīšanas un daudzkanālu sinhronizācijas metodes, kas nepieciešamas konsekventas laika reversijas fokusēšanas nodrošināšanai sadalītās mērījumu sistēmās ar digitāli savienotiem sensoriem un garām, pret trokšņiem noturīgām pārraides līnijām. Kopā šīs grupas veido piedāvātās pieejas metodoloģisko pamatu, kurā daudzasu reakcijas novērtēšana, ierosmes kontrole un laika ziņā saskaņota izkliedētā mērīšana tiek uzskatītas par vienotas konstrukciju savienojumu diagnostikas metodoloģijas savstarpēji saistītām sastāvdaļām.

Integrētā metodoloģija validēta sinhronizētā daudzdimensionālā konstrukciju savienojuma eksperimentā, kurā pakāpeniska degradācija tiek imitēta, kontrolēti samazinot skrūves pievilkšanas momentu astoņos posmos. Rezultāti demonstrē, ka kontrolēta daudzdimensionāla ierosme uzlabo virzienisko novērojamību, samazina no ass atkarīgu reakciju neviennozīmību un uzlabo reakciju reproducējamību pakāpeniskas degradācijas apstākļos. Apvienotā daudzasu komponentu koherences metrika (*Multiaxial Component Coherence Metric*, *MCCM*) uzrāda monotonu samazināšanos visos degradācijas posmos, nodrošinot tādu diagnostisko jutību, ko atsevišķu asu indikatori nespēj konsekventi sasniegt.

Metodoloģiskās sastāvdaļas dokumentētas astoņās zinātniskajās publikācijās un vienā izsniegtā patentā. Šajā darbā integrēta aparatūras izstrāde, sinhronizācija, viļņu procesos balstīta ierosmes kontrole un konstrukciju daudzasu reakcijas novērtēšana reproducējamā ietvarā konstrukciju savienojumu nesagraujošai novērtēšanai.

SATURS

Saīsinājumu saraksts 7
1. NODAĻA. Pārskats 8
1.1. Ievads 8
1.2. Pētījuma aktualitāte un literatūras apskats 8
1.2.1. Lokalizētas savienojumu diagnostikas pieejas 9
1.2.2. Reakciju salīdzinājums un daudzasu novērojamība 10
1.2.3. Laika reversijas metodes un asij specifiska ierosinājuma kontrole 10
1.2.4. Sadalītā datu ieguve un sinhronizācija 11
1.2.5. Pētījuma problēmlauks 11
1.3. Pētījuma mērķis 12
1.4. Aizstāvamās tēzes 12
1.5. Zinātniskā novitāte 12
1.6. Darba uzdevumi 13
1.7. Promocijas darba struktūra 13
1.8. Promocijas darba publikācijas un aprobācija 14
2. NODAĻA. Metodoloģiskais tvērums un priekšnosacījumi 16
2.1. Mērāmie lielumi un mēroga normalizācija 16
2.2. Eksperimentālie objekti 16
2.3. Sensoru konfigurācija un izvietojuma prasības 16
2.3.1. Virtuālās koaksiālās salāgošanas prasība 17
2.3.2. Ietekme uz viļņformas salīdzināmību (*RCR*) 17
2.3.3. Ietekme uz laika reversijas defokusēšanos 18
2.3.4. Praktiskais joslas platuma kritērijs sensoru attālumam 18
2.4. Aktuatoru konfigurācija un izvietojuma prasības 19
2.5. Degradācijas imitācija 20
2.6. Trieciena fokusēšanas ar laika reversiju principi 20
2.7. Daudzdimensionāla trieciena fokusēšana ar laika reversiju (*MTRIF*) 22
2.8. Laika saskaņotības priekšnosacījums un *CNSS* pamatojums 24
2.9. Reakcijas koherences attiecība (*RCR*) 24
2.10. Daudzasu komponentu koherences metrika (*MCCM*) 25
3. NODAĻA. Aparatūras-programmatūras platforma datu ieguvei 27
3.1. Platformas mērķis un tvērums 27
3.2. Sistēmas pārskats un pamatarhitektūra 27

3.3. Ierosmes apakšsistēma ... 28
3.4. Mērīšana, datu ieguve un pret trokšņiem noturīga datu pārraide ... 28
3.5. Laika atsauces nodrošinājums un *CNSS* novērojamie lielumi ... 28
3.6. Vadības programmatūra un lietotāja saskarne ... 29
3.7. Platformas galvenās specifikācijas ... 29
4. NODAĻA. Datu iegūšana ... 31
4.1. Bāzes objekts un savienojuma konfigurācija ... 31
4.1.1. Sensoru izvietojums ... 32
4.1.2. Aktuatoru izvietojums ... 32
4.1.3. Degradācijas imitācijas metode ... 32
4.2. Mērījumu soļi ... 32
5. NODAĻA. Signālu apstrāde un metriku novērtēšana ... 34
5.1. Signālu apstrāde un *RCR* novērtēšana pa atsevišķām asīm ... 34
5.2. *MCCM* aprēķins ... 35
6. NODAĻA. Metriku novērtēšanas rezultāti ... 36
6.1. *RCR* atkārtojamība pa atsevišķām asīm piecos mērījumu ciklos ... 36
6.2. *MCCM* atkārtojamība un degradācijas tendence ... 37
6.3. *RCR* un *MCCM* izkliedes analīze ... 37
7. NODAĻA. Noslēguma piezīmes ... 40
7.1. Galvenie secinājumi ... 40
7.2. Praktiskie ieteikumi ... 40
7.3. Turpmākā attīstība ... 41
7.4. Pašreizējā pētījuma ierobežojumi ... 41
PATEICĪBA ... 43
LITERATŪRAS SARAKSTS ... 44

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

Saīsinājums	Saīsinājuma skaidrojums
3DOF	trīs brīvības pakāpes
6DOF	sešas brīvības pakāpes (trīs lineārās un trīs rotācijas asis)
AMR	pa asīm saskaņota reakcija
CNSS	starpmezglu paraugu sinhronizācija
FPGA	programmējama loģiskā matrica
I²S	*I²S* digitālā audio kopne
IMU	inerciālā mērījumu vienība
LVDS	zemsprieguma diferenciālā signalizēšana
MCCM	daudzasu komponentu koherences metrika
MTRIF	daudzdimensionāla trieciena fokusēšana ar laika reversiju
POI	intereses punkts
RCM	reakciju salīdzināšanas metrika
RCR	reakcijas koherences attiecība
RMS	vidējā kvadrātiskā vērtība
SHM	konstrukciju strukturālā stāvokļa monitorings
SPI	seriālā perifērijas saskarne
TR	laika reversija
USB	universālā seriālā kopne

1. NODAĻA. PĀRSKATS

1.1. Ievads

Konstrukciju savienojumu diagnostika konstrukciju strukturālā stāvokļa monitoringā (*SHM*) bieži ir ierobežota ar nepilnīgu novērojamību, ja tiek izmantota vienas ass mērīšana un ierosināšana. Savienojuma degradācija var būt pa asīm selektīva, tāpēc tās agrīnas stadijas pazīmes var izpausties noteiktās translācijas komponentēs, savukārt citās tās paliek vāji izteiktas vai netiek konstatētas. Daudzasu mērīšana pati par sevi nav pietiekama, ja ierosinājums joprojām faktiski ir viendimensionāls, jo tas uzticami nestimulē pilnu virzienisko reakcijas lauku savienojuma apgabalā. Vienkārša trieciena enerģijas palielināšana nav praktiski piemērota alternatīva, jo tā var ieviest nelineārus efektus, samazināt atkārtojamību un pārslogot savienojuma saskarni.

Lai pārvarētu šos ierobežojumus, promocijas darbā izstrādāts diagnostikas ietvars, kura uzmanības centrā ir kontrolēta daudzdimensionāla savienojuma novērtēšana. Ietvarā vispirms tiek iegūti trīs pa asīm saskaņotas reakcijas (*Axis-Matched Response*, *AMR*) pāri no *3DOF* sensoriem, kas uzstādīti savienojuma pretējās pusēs. Lai nodrošinātu to, ka šīs *AMR* komponentes tiek iegūtas kontrolēta daudzdimensionāla ierosinājuma apstākļos, izmantota daudzdimensionāla trieciena fokusēšana ar laika reversiju (*Multidimensional Time-Reversal Impact Focusing*, *MTRIF*), kas sintezē virtuālu trieciena punktu tuvējā sensora atrašanās vietā un rada trīsasu lineāru ierosinājumu. Šo daudzdimensionālo mijiedarbību atbalsta starpmezglu paraugu sinhronizācija (*Cross-Node Sample Synchronization*, *CNSS*), kas uztur paraugu līmeņa laika saskaņotību, kas nepieciešama viļņformas līmeņa salīdzinājumam. Pēc tam ietvars izmanto reakcijas koherences attiecību (*Response Coherence Ratio*, *RCR*), lai novērtētu katra *AMR* pāra punktveida koherenci. Visbeidzot trīs *RCR* vērtības tiek apvienotas daudzasu komponentu koherences metrikā (*Multiaxial Component Coherence Metric*, *MCCM*), nodrošinot skalāru indikatoru, kas samazina no ass atkarīgu izkliedi un atbalsta konstrukciju savienojuma stāvokļa interpretāciju.

1.2. Pētījuma aktualitāte un literatūras apskats

Šajā apakšnodaļā kritiski aplūkotas konstrukciju savienojumu *SHM* metodes lokalizētai, viļņos un vibrācijās balstītai diagnostikai. Apskats koncentrējas uz aktīvām diagnostikas pieejām, kurās konstrukcijā tiek ievadīts ierosinājums, un izmērītā reakcija tiek izmantota, lai novērtētu ar degradāciju saistītas izmaiņas monitorētajā savienojumā. Globālās modālās monitorēšanas metodes un vispārīgas stāvokļa monitorēšanas sistēmas tiek aplūkotas tikai tiktāl, ciktāl tās palīdz izskaidrot lokalizētas savienojumu diagnostikas ierobežojumus. Literatūras meklēšana tika veikta *Scopus* un *Web of Science* datubāzēs, izmantojot meklēšanas terminus, kas ietvēra kombinācijas "*structural joint*", "*bolted joint monitoring*", "*time reversal*", "*structural health monitoring*", "*multiaxial sensing*", "*waveform comparison*" un "*vibration-based diagnostics*". Meklēšana tika papildināta ar galveno avotu citējumu izsekošanu abos virzienos.

Aplūkotā literatūra tika atlasīta saskaņā ar trim iekļaušanas kritērijiem. Pirmkārt, pētījumam bija jāattiecas uz konstrukciju savienojumiem, tostarp skrūvsavienojumiem, līmētiem, kniedētiem, kompozītmateriālu savienojumiem, pārlaiduma savienojumiem vai līdzīgiem savienojumu apgabaliem. Otrkārt, metodei bija jāietver aktīva viļņos vai vibrācijās balstīta

diagnostikas shēma, kurā konstrukcijā tiek ievadīts ierosinājums, un reakcija tika analizēta pēc mijiedarbības ar monitorēto savienojumu. Treškārt, diagnostiskajai informācijai bija jābūt saistītai ar degradācijas izraisītām izmaiņām monitorētā savienojuma lokālajā dinamiskajā uzvedībā, tostarp stingumā, saistē, viļņu izplatībā vai reakcijas pārneses raksturlielumos.

Laika reversijas (*Time Reversal*, *TR*) pētījumi aplūkoti kā atsevišķa grupa, jo *TR* fokusēšana ir viens no piedāvātā ietvara pamatprincipiem; tādēļ atsevišķi darbi ārpus konstrukciju savienojumu *SHM* jomas ir iekļauti gadījumos, kad tie sniedz metodoloģisku pamatojumu kontrolētai atkārtotai atskaņošanai, fokusēšanai vai vairāku izstarotāju ierosināšanai.

Atlasītie pētījumi tika analizēti saskaņā ar vairākiem metodoloģiskiem kritērijiem.

- Reakciju iegūšana abās savienojuma pusēs – vai reakcijas tiek mērītas abās konstrukciju savienojuma pusēs, ļaujot degradāciju novērtēt pēc izmaiņām dinamiskajā saistē starp savienotajiem konstrukcijas elementiem.
- Ierosinājuma virzieniskā daudzveidība – vai ierosinājums aktivizē tikai vienu dominējošu virzienu vai izplatīšanās ceļu, vai arī nodrošina kontrolētu ierosinājuma daudzveidību, kas spēj stimulēt vairākas virzieniskās reakcijas komponentes savienojuma tuvumā.
- Mērīšanas dimensiju skaits un daudzkanālu interpretācija – vai reakcija tiek mērīta, izmantojot vienas ass vai daudzasu mērīšanu, vai vairākas reakcijas komponentes tiek interpretētas neatkarīgi vai apvienotas kombinētā diagnostiskā indikatorā.
- Viļņformu salīdzinājums starp savienojuma pretējām pusēm – vai metode salīdzina pilnas viļņformas reakcijas, kas mērītas savienojuma pretējās pusēs, nevis balstās tikai skalāros enerģijas, modālos, impedances vai spektrālos indikatoros.
- Laika reversijas asij specifisks ierosinājums – vai TR atkārtotā atskaņošana tiek izmantota kā vispārīga fokusēšanas procedūra, vai arī tiek veidoti atsevišķi asij specifiski atkārtotās atskaņošanas apstākļi, lai kontrolētu uztverošā punkta ierosināšanu pa izmērītajām reakcijas asīm.
- Sadalītā datu ieguve un sinhronizācija – vai mērījumu arhitektūra izmanto centralizētu datu ieguvi, īsas analogās sensoru līnijas vai sadalītus digitālus mezglus, vai sinhronizācija tiek tieši uzturēta paraugu līmenī.

Šie kritēriji netiek izmantoti aplūkoto pētījumu ranžēšanai pēc vispārīgas *SHM* veiktspējas. Tie tiek izmantoti, lai identificētu, kuras metodoloģiskās prasības literatūrā jau ir aplūkotas un kuras joprojām nav pietiekami integrētas lokalizētai daudzdimensionālai konstrukciju savienojumu diagnostikai. Nākamajās apakšnodaļās aplūkotie darbi tiek analizēti atbilstoši šiem kritērijiem.

1.2.1. Lokalizētas savienojumu diagnostikas pieejas

Frekvenču reakcijas, vadīto viļņu un impedances pieejas veido būtisku lokalizētas konstrukciju savienojumu diagnostikas daļu. Frekvenču reakcijas un pārneses metodes novērtē savienojuma degradāciju pēc dinamisko raksturlielumu izmaiņām starp ierosinājuma un reakcijas vietām. *Tol* un *Özgüven* [1] parādīja, ka skrūvsavienojuma atslābināšanās maina lokālos pārneses raksturlielumus un vibrācijas reakcijas uzvedību, savukārt saistītās frekvenču reakcijas salīdzinājuma un tā sauktās *cross-signature* pieejas tika pētītas darbā [2]. Vadīto viļņu un Lamba viļņu metodes nodrošina spēcīgāku lokalizācijas spēju, jo tās ir jutīgas pret viļņu mijiedarbību ar savienojuma degradāciju. Šādas pieejas ir piemērotas kompozītmateriālu skrūvsavienojumiem, skrūvsavienojumu degradācijai, aktīvai pjezoelektriskai diagnostikai, kā arī difūzo vai vadīto viļņu monitoringam atslābuma un degradācijas noteikšanai [3–7].

Elektromehāniskās impedances metodes novērtē savienojuma stāvokli pēc izmaiņām lokālajā elektromehāniskajā saistē starp pjezoelektriskajiem devējiem un monitorēto konstrukciju [8–11]. Šīs pieejas nodrošina augstu lokālo jutību pret stinguma un saistes izmaiņām savienojuma tuvumā. Tomēr, analizējot tās atbilstoši iepriekš definētajiem kritērijiem, šīs metodes parasti balstās skalāros indikatoros, ierobežotos izplatīšanās ceļos vai virzieniski ierobežotās aktuatora–uztvērēja konfigurācijās. Tādēļ to galvenais ierobežojums nav nepietiekama bojājumu jutība pati par sevi; drīzāk tā ir nepilnīga daudzsasu datu ieguves abās savienojuma pusēs, kontrolētas ierosinājuma daudzveidības un viļņformas līmeņa reakciju salīdzinājuma starp tuvējo un attālo sensoru integrācija. Piemēram, lai gan vadīto viļņu metodes [3, 4] var noteikt skrūvju atslābumu pēc izmaiņām viļņu izplatībā, tās parasti novērtē vienu izplatīšanās ceļu un neaptver savienojuma apgabala pilnu trīsdimensionālu reakciju. Līdzīgi impedances metodes [8–10] nodrošina augstu lokālo jutību, bet mēra izmaiņas elektromehāniskajā saistē vienā devēja vietā bez reakciju salīdzinājuma pāri savienojumam.

1.2.2. Reakciju salīdzinājums un daudzasu novērojamība

Vairāki pētījumi parāda, ka pret degradāciju jutīgu informāciju var iegūt, salīdzinot dinamiskās reakcijas, kas mērītas dažādās konstrukcijas vietās [1, 2, 6]. Šādas pieejas samazina atkarību no detalizētiem analītiskiem modeļiem, tā vietā balstoties eksperimentāli novērotās reakcijas izmaiņās, ko izraisa degradācija. Iepriekšējos ar šo promocijas darbu saistītajos pētījumos [12–15] tika analizētas lokalizētas reakciju salīdzināšanas stratēģijas, izmantojot pārotu daudzasu reakciju iegūšanu konstrukciju savienojumu tuvumā. Šie pētījumi parādīja, ka pret degradāciju jutīga uzvedība var atšķirīgi izpausties dažādos mērījumu virzienos atkarībā no savienojuma ģeometrijas, viļņu izplatīšanās ceļiem un ierosinājuma apstākļiem.

Daudzasu mērīšana palielina no konstrukcijas iegūstamās virzieniskās informācijas apjomu, un sešu brīvības pakāpju, kā arī daudzkanālu mērīšanas koncepcijas ir pētītas konstrukciju monitoringa lietojumiem [16, 17]. Tomēr daudzasu mērīšana pati par sevi negarantē pilnīgu degradācijas stāvokļa novērojamību. Ja ierosinājums paliek faktiski virzieniski ierobežots, dažas reakcijas komponentes var tikt aktivizētas vāji un pret degradāciju jutīgas izmaiņas atsevišķos kanālos var palikt slēptas vai nestabilas. Tādēļ galvenais metodoloģiskais jautājums nav tikai tas, vai tiek mērītas vairākas reakcijas komponentes, bet gan tas, vai tās tiek mērītas abās savienojuma pusēs ierosinājuma apstākļos, kas aktivizē attiecīgo virzienisko reakcijas lauku.

1.2.3. Laika reversijas metodes un asij specifiska ierosinājuma kontrole

Laika reversijas (*TR*) metodes nodrošina mehānismu viļņu lauka refokusēšanai, kas balstās reciprocitātē [18]. Atkārtoti atskaņojot laikā reversētas reakcijas caur sākotnējiem izplatīšanās ceļiem, viļņu enerģiju var koncentrēt izvēlēta intereses punkta tuvumā. Šī darba kontekstā būtiski ir ne tikai tas, vai tiek izmantota *TR* fokusēšana, bet arī tas, vai atkārtotās atskaņošanas apstākļi tiek veidoti asij specifiskā veidā, lai uztverošais punkts tiktu ierosināts pa izmērītajām reakcijas asīm.

TR metodes ir izmantotas konstrukciju stāvokļa novērtēšanai un savienojumu diagnostikai vairākos pētījumos [19–25]. Šie pētījumi parāda, ka *TR* atkārtotā atskaņošana var uzlabot lokalizāciju un jutību pret ar savienojumu saistītām izmaiņām. Tomēr vairums publicēto realizāciju joprojām ir ierobežotas ar ierosinājuma virzieniem, ierobežotiem izplatīšanās ceļiem vai vienas komponentes reakcijas novērtējumu. Tās parasti neizmanto *TR* atkārtoto atskaņošanu, lai veidotu asij specifiskus ierosinājuma apstākļus kombinācijā ar sinhronizētu daudzasu viļņformas salīdzinājumu starp tuvējo un attālo sensoru pāri savienojumam.

Piemēram, *Du et al.* [20,23] demonstrēja skrūves priekšspriegojuma monitoringu, izmantojot virtuālu laika reversijas fokusēšanu, tomēr gan ierosinājums, gan mērīšana joprojām bija ierobežoti ar vienu izplatīšanās virzienu. *Wang* un *Song* [24] apvienoja vibroakustisko modulāciju ar laika reversiju skrūves agrīna atslābuma noteikšanai, taču metode novērtēja tikai vienu modulācijas indeksu, nevis daudzasu viļņformas koherenci.

Iepriekšējos autora un līdzautoru pētījumos [26–29] tika analizēta vairāku izstarotāju *TR* fokusēšana akustiskās sistēmās, kas darbojās slāpējošās izplatīšanās vidēs. Šie pētījumi šeit netiek traktēti kā konstrukciju savienojumu diagnostikas darbi; tie kalpo kā metodoloģiski priekšteči, kas demonstrē, ka koordinēta atkārtota atskaņošana no vairākiem izstarotājiem var koncentrēt viļņu enerģiju izvēlētā telpiskā vietā. Šis princips atbalsta pāreju uz kontrolētu asij specifisku un daudzvirzienu ierosinājumu lokalizētā konstrukciju savienojumu diagnostikā.

1.2.4. Sadalītā datu ieguve un sinhronizācija

Sadalītās datu ieguves arhitektūras kļūst arvien nozīmīgākas praktiskām *SHM* sistēmām [16, 30]. Tomēr daudzas pret viļņformas izmaiņām jutīgas metodes, tostarp *TR* atkārtotā atskaņošana un tiešs viļņformu salīdzinājums, ir demonstrētas centralizētās laboratorijas konfigurācijās, kurās ierosinājums un datu ieguve darbojas kopīgā laika domēnā. Šādās konfigurācijās sinhronizācija netieši tiek nodrošināta ar kopīgu datu ieguves aparatūru vai ar īsām analogām sensoru līnijām.

Šis pieņēmums kļūst problemātisks, kad mērījumu mezgli ir telpiski izkliedēti un digitalizē signālus neatkarīgi. Neatkarīgi diskretizācijas takts avoti ievieš sistemātisku nobīdi un temperatūras izraisītu dreifu. Skalāriem vai lēni mainīgiem indikatoriem šādas laika kļūdas var būt mazāk kritiskas. Tomēr viļņformas līmeņa salīdzinājumam, *TR* atkārtotajai atskaņošanai un punktveida koherences novērtēšanai laika nesaskaņotība tieši ietekmē viļņformas formu, fāžu attiecības, atkārtotās atskaņošanas konsekvenci un starpkanālu salīdzināmību. Sinhronizācijas prasības kļūst īpaši stingras, ja *TR* fokusēšana tiek izmantota kontrolētam asij specifiskam ierosinājumam, jo laika kļūdas samazina fokusētās reakcijas kvalitāti un atkārtojamību. Lielākā daļa esošo *TR* balstīto *SHM* pētījumu vai nu pieņem ideālu sinhronizāciju, vai darbojas centralizētās konfigurācijās, kurās šis pieņēmums tiek netieši izpildīts.

Sinhronizācijas pētījumos [31–33], kas iekļauti šī promocijas darba publikāciju kopā, tika analizēta laika stabilitāte, laika rekonstrukcija un paraugu saskaņotības uzturēšana sadalītās daudzkanālu datu ieguves sistēmās. Šie pētījumi nodrošina tehnisko pamatu viļņformas līmeņa konsekvences uzturēšanai gadījumos, kad ierosināšanas un mērījumu mezgli ir atdalīti.

1.2.5. Pētījuma problēmlauks

Literatūras apskats rāda būtisku progresu lokalizētā konstrukciju savienojumu diagnostikā. Esošie pētījumi piedāvā pret degradāciju jutīgas metodes, kas balstās frekvenču reakcijas izmaiņās, vadītajos viļņos, impedances izmaiņās, reakciju salīdzinājumā, *TR* fokusēšanā, daudzasu mērīšanā un sadalīto datu ieguvē.

Tomēr šie metodoloģiskie elementi pārsvarā ir pētīti izolēti. Aplūkotie darbi nepietiekami integrē kontrolētu asij specifisku daudzvirzienu ierosinājumu, pārotu daudzasu reakciju iegūšanu abās savienojuma pusēs, viļņformas līmeņa tuvējā un attālā sensora reakciju salīdzinājumu, paraugu līmeņa sinhronizāciju un apvienotu daudzkanālu interpretāciju vienā diagnostikas ķēdē.

Šis ierobežojums nosaka pētījuma problēmlauku, ko risina šis promocijas darbs. Šī problēmlauka pārvarēšanai piedāvātais ietvars integrē daudzvirzienu laika reversijas ierosinājuma fokusēšanu, pārotu tuvējā un attālā sensora *3DOF* mērīšanu, sinhronizētu

viļņformas līmeņa reakciju salīdzinājumu, katras ass koherences novērtēšanu un apvienotu daudzkanālu interpretāciju vienotā metodoloģijā lokalizētai konstrukciju savienojumu novērtēšanai.

1.3. Pētījuma mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt un eksperimentāli validēt daudzdimensionālu metodoloģiju konstrukciju savienojuma integritātes novērtēšanai, kas integrē kontrolētu asij specifisku ierosinājumu, sinhronizētu daudzasu mērīšanu abās savienojuma pusēs un viļņformas līmeņa koherences novērtēšanu.

Piedāvātā pieeja izmanto daudzdimensionālu trieciena fokusēšanu ar laika reversiju (*MTRIF*), lai sintezētu asij specifisku virtuālu triecienu tuvējā sensora atrašanās vietā, izmantojot telpiski izvietotus aktuatorus. Savienojuma stāvoklis tiek novērtēts, izmantojot trīs pa asīm saskaņotas reakcijas (*AMR*) pārus, kas iegūti ar tuvējo un attālo *3DOF* sensoru, kas uzstādīti savienojuma pretējās pusēs. Katras ass koherence tiek kvantitatīvi noteikta ar reakcijas koherences attiecību (*RCR*), un iegūtās vērtības tiek apvienotas daudzasu komponentu koherences metrikā (*MCCM*).

1.4. Aizstāvamās tēzes

Šī promocijas darba pētniecības hipotēzes formulētas šādi:

1) konstrukciju savienojuma degradāciju var pilnīgāk raksturot, analizējot pa asīm saskaņotas reakcijas (*AMR*) pārus, kas mērīti savienojuma pretējās pusēs, nekā izmantojot viena punkta un viena virziena reakcijas novērtēšanu;
2) fizikāli pamatotai *AMR* pāru analīzei nepieciešams kontrolēts daudzdimensionāls reakcijas lauks analizējamā savienojuma apgabalā, ko var sintezēt, izmantojot daudzdimensionālu trieciena fokusēšanu ar laika reversiju (*MTRIF*);
3) uzticama *AMR-MTRIF* konstrukciju savienojuma novērtēšanas metodoloģijas īstenošana nav iespējama bez precīzas sinhronizācijas starp ierosinājuma un mērījumu mezgliem, kas šajā darbā tiek nodrošināta ar starpmezglu paraugu sinhronizāciju (*CNSS*).

1.5. Zinātniskā novitāte

Promocijas darba zinātniskā novitāte ir šāda:

1) zinātniskā novitāte ir kontrolēta daudzasu reakcijas lauka izveide analizējamā savienojuma apgabalā, izmantojot daudzdimensionālu trieciena fokusēšanu ar laika reversiju (*MTRIF*);
2) izstrādāta un validēta jauna pieeja trīs virzieniski specifisku pa asīm saskaņotas reakcijas (*AMR*) pāru novērtēšanai pa atsevišķām asīm kopīgā *MTRIF* fokusētā reakcijas apgabalā;
3) formulēts, izstrādāts un validēts jauns integrēts metodoloģiskais ietvars daudzdimensionālai konstrukciju savienojumu diagnostikai, apvienojot *MTRIF*, *AMR* un starpmezglu paraugu sinhronizāciju (*CNSS*), kur *CNSS* tiek traktēta kā galvenā nodrošinošā sastāvdaļa, kas nepieciešama uzticamai ietvara darbībai.

1.6. Darba uzdevumi

Lai sasniegtu promocijas darba mērķi, tiek definēti vairāki uzdevumi.

1. Izstrādāt sinhronizētu aparatūras-programmatūras platformu, kas īsteno starpmezglu paraugu sinhronizāciju (*CNSS*), lai nodrošinātu nepārtrauktu paraugu līmeņa saskaņotību starp ierosinājuma un mērījumu mezgliem laika un temperatūras izmaiņu apstākļos.
2. Īstenot daudzdimensionālu trieciena fokusēšanu ar laika reversiju (*MTRIF*), izmantojot vairāku aktuatoru konfigurāciju, lai sintezētu asij specifisku virtuālu triecienu tuvējā sensora atrašanās vietā.
3. Izveidot pārotu *3DOF* mērīšanas shēmu, izmantojot tuvējo un attālo sensoru, kas uzstādīti savienojuma pretējās pusēs, un izveidot trīs pa asīm saskaņotas reakcijas (*AMR*) pārus no saskaņotām lineārā paātrinājuma komponentēm.
4. Izstrādāt katras ass viļņformas līmeņa koherences novērtēšanas procedūru trīs *AMR* pāriem pakāpeniskas degradācijas apstākļos, balstoties reakcijas koherences attiecībā (*RCR*).
5. Formulēt daudzasu komponentu koherences metriku (*MCCM*) kā apvienotu skalāru indikatoru, kas apvieno trīs pa atsevišķām asīm iegūtās *RCR* vērtības, lai samazinātu no ass atkarīgu izkliedi un uzlabotu diagnostisko interpretējamību.
6. Eksperimentāli validēt integrēto ietvaru bāzes konstrukciju savienojumā pakāpeniskas degradācijas apstākļos un sasaistīt galīgo metodoloģiju ar eksperimentālajiem pierādījumiem, kas sniegti šī promocijas darba publikāciju kopā.

1.7. Promocijas darba struktūra

Promocijas darbā ir septiņas nodaļas.

1. nodaļā izklāstīta konstrukciju savienojumu diagnostikas problēma, aplūkota pētījuma aktualitāte un literatūra, kā arī definēts promocijas darba mērķis, zinātniskā novitāte un uzdevumi.

2. nodaļā definēts metodoloģiskais tvērums, tostarp *3DOF* mērīšanas prasības, *MTRIF* koncepcija, *CNSS* pamatojums un *AMR*, *RCR* un *MCCM* formālās definīcijas.

3. nodaļā aprakstīta aparatūras-programmatūras platforma, detalizējot sistēmas arhitektūru, ierosmes apakšsistēmu, mērījumu ķēdi un sinhronizācijas realizāciju.

4. nodaļā aplūkota eksperimentālā iekārta un datu iegūšanas darba plūsma, tostarp *3DOF* sensoru un aktuatoru izvietojums, degradācijas posmi un datu kopas sastāvs.

5. nodaļā detalizēti aprakstīta signālu apstrāde un metriku aprēķins, koncentrējoties uz trīsasu *RCR* un *MCCM* apvienošanas algoritmiem.

6. nodaļā sniegti metriku novērtēšanas rezultāti, tostarp katras ass *RCR* atkārtojamība piecos mērījumu ciklos, apvienotās *MCCM* atkārtojamība un degradācijas tendence, kā arī *RCR* un *MCCM* izkliedes analīze.

7. nodaļā apkopoti galvenie secinājumi, sniegti praktiskie ieteikumi un iezīmēti turpmākās attīstības virzieni.

Publikācijas, kas veido promocijas darba pamatu, ir uzskaitītas 1.8. apakšnodaļā, savukārt galvenajās nodaļās sintezēts to metodoloģiskais ieguldījums vienotā diagnostikas ietvarā.

1.8. Promocijas darba publikācijas un aprobācija

Šis promocijas darbs balstās astoņās zinātniskajā publikācijā [12–15, 27, 31–33] un vienā piešķirtā patentā. Promocijas darbu veidojošās publikācijas nav neatkarīgi vai savstarpēji nesaistīti pētījumi; tās dokumentē metodoloģisko un inženiertehnisko komponentu pakāpenisku attīstību, kas šajā darbā sintezētas vienotā ietvarā lokalizētai konstrukciju savienojumu diagnostikai.

Pētījuma trajektorija sākās ar reakciju salīdzināšanas metodēm konstrukciju savienojumiem. Publikācijā par koaksiālo paātrinājumu korelāciju konstrukciju savienojumu kvalitātes novērtēšanai [12] tika ieviests princips salīdzināt vibrācijas reakcijas, kas mērītas trīs telpiskos virzienos, izmantojot koaksiāli orientētus 3D akselerometrus, kas izvietoti dažādās konstrukciju savienojuma daļās. Saistītais nemodeļa vibrācijas analīzes pētījums [13] pamatoja eksperimentāli novērotu reakcijas izmaiņu izmantošanu konstrukciju savienojumu novērtēšanā, nebalstoties detalizētos analītiskos modeļos. Šīs publikācijas izveidoja sākotnējo metodoloģisko virzienu, kas tālāk attīstīts 2. nodaļā kā pārotu tuvējā un attālā sensora reakciju iegūšana un 5. nodaļā kā viļņformas līmeņa metriku novērtēšana.

Nākamajā posmā šī koncepcija tika paplašināta uz daudzasu konstrukciju savienojumu diagnostiku degradācijas apstākļos. Publikācijā par nesagraujošu bojājumu noteikšanu konstrukciju savienojumā, izmantojot koaksiālās korelācijas metodi 6D telpā [14], tika prezentēta pārotu daudzasu mērījumu shēma savienojuma pretējās pusēs, sinhronizēta ierosinājuma un reakcijas datu ieguve, atkārtoti mērījumu cikli, vidējošana un līdzībā balstīta degradācijas novērtēšana. Koka konstrukciju savienojuma pētījums [15] papildus demonstrēja, ka reakciju salīdzinājumu starp sensoriem, kas izvietoti dažādās savienojuma pusēs, var izmantot degradācijas novērtēšanai koka konstrukciju savienojumos. Kopā šīs publikācijas parādīja, ka pret degradāciju jutīga reakcijas uzvedība var atšķirties starp mērījumu virzieniem, tādējādi pamatojot nepieciešamību pēc katras ass novērtēšanas un apvienotas daudzkanālu interpretācijas. Šajā darbā agrākās koncepcijas tiek formalizētas kā pa asīm saskaņotas reakcijas (*AMR*) pāri, reakcijas koherences attiecība (*RCR*) un daudzasu komponentu koherences metrika (*MCCM*), kas aprakstītas 2. un 5. nodaļā un novērtētas 6. nodaļā.

Tas pats publikāciju kopā dokumentētais eksperimentālais virziens atklāja arī inženiertehniskās prasības uzticamam salīdzinājumam abās savienojuma pusēs. Agrīnie reakciju salīdzināšanas pētījumi parādīja, ka korelācijā balstīta interpretācija ir atkarīga no atkārtojama ierosinājuma, salīdzināma sensoru izvietojuma, stabila datu ieguves laika režīma un atkārtotu mērījumu ar vidējošanu izmantošanas. Publikācijās [14] un [15] tas rezultējās praktiskā ierosinājuma sākuma sinhronizācijā ar datu ieguves kadru un atkārtotu mērījumu darba plūsmu. Tomēr šie risinājumi joprojām bija piesaistīti konkrētām eksperimentālām konfigurācijām un vēl nenodrošināja vispārinātu sinhronizācijas koncepciju sadalītiem digitāliem mērījumu mezgliem, garām kabeļu līnijām, laika dreifam vai temperatūras izraisītai datu ieguves nestabilitātei.

Sinhronizācijas publikācijas [31–33] šo inženiertehnisko prasību attīstīja tālāk. Pētījumā par daudzkanālu precīzas laika marķēšanas sistēmas termisko stabilitāti [31], pētījumā par daudzkanālu sinhronizāciju pikosekunžu laika marķēšanai [32] un darbā par laika intervāla precizitātes kļūdas kompensāciju [33] tika analizēta laika stabilitāte, kanālu sinhronizācija un ar takts kļūdām saistītu noviržu kompensācija. Promocijas darbā šie rezultāti tiek izmantoti, lai pamatotu starpmezglu paraugu sinhronizācijas (*CNSS*) koncepciju, kas aprakstīta 2. un 3. nodaļā. *CNSS* vispārina sinhronizācijas prasību no datu ieguves kadra sākuma salāgošanas

uz nepārtrauktu paraugu līmeņa saskaņotību, kas nepieciešama viļņformas līmeņa reakciju salīdzināšanai starp tuvējo un attālo sensoru, laika reversijas atkārtotajai atskaņošanai un punktveida *RCR* novērtēšanai 5. nodaļā.

Laika reversijas komponents piedāvātajā ietvarā attīstījās no promocijas darba publikāciju kopā ietvertā darba par kontrolētu atkārtotu atskaņošanu un fokusēšanu. Pētījums par nelineāru mīnu noteikšanu, izmantojot platjoslas laika reversijas metodes [27], šajā promocijas darbā netiek traktēts kā konstrukciju savienojumu diagnostikas validācijas gadījums. Tā vietā tas sniedz metodoloģisku pamatu kontrolētai laikā reversētu signālu atkārtotai atskaņošanai, fokusēšanai un vairāku izstarotāju ierosināšanai. Šī pieredze, kas aprakstīta 2. nodaļā, tiek adaptēta daudzdimensionālas trieciena fokusēšanas ar laika reversiju (*MTRIF*) formulēšanai, kur telpiski izvietoti aktuatori tiek izmantoti asij specifiska virtuāla trieciena sintēzei tuvējā sensora vietā.

Piešķirtais patents par būvkonstrukciju nesagraujošo testēšanu papildina zinātniskās publikācijas, dokumentējot integrētas konstrukciju novērtēšanas sistēmas līmeņa koncepciju. Šī promocijas darba kontekstā patents atbalsta 3. nodaļā aprakstītā aparatūras-programmatūras ietvara praktiskās īstenošanas perspektīvu un 1. nodaļā aplūkoto kopējo integrācijas loģiku.

Kopumā promocijas darbu veidojošās publikācijas dokumentē pāreju no lokalizēta reakciju salīdzinājuma uz sinhronizētu daudzdimensionālu diagnostikas metodoloģiju, kurā *MTRIF*, *AMR*, *CNSS* un daudzasu koherences novērtēšana integrētas vienotā konstrukciju savienojumu novērtēšanas ietvarā.

2. NODAĻA. METODOLOĢISKAIS TVĒRUMS UN PRIEKŠNOSACĪJUMI

2.1. Mērāmie lielumi un mēroga normalizācija

Mērāmie lielumi ir lineārie paātrinājumi, kas izteikti m/s². Šajā metodoloģijā trīs lineārā paātrinājuma komponentes tiek reģistrētas tuvējā sensora pusē un saskaņotas ar trim atbilstošajām komponentēm attālā sensora pusē, lai izveidotu trīs *AMR* pārus.

Sensoru izejas dati tiek iegūti kā 16 bitu digitālas vērtības. Piedāvāto diagnostikas metriku aprēķinam konvertēšana SI vienībās nav nepieciešama, jo novērtēšana balstās normalizētu viļņformu salīdzinājumā. Tuvējā un attālā sensora signāli, kas veido katru *AMR* pāri, pirms *RCR* aprēķina tiek sinhronizēti un normalizēti. Tādēļ *RCR* un *MCCM* šajā darbā tiek traktētas kā no mēroga neatkarīgas koherences metrikas, kas iegūtas, izmantojot normalizētus paātrinājuma datus, nevis kā absolūtās amplitūdas mērījumi.

Laika ass visos grafikos ir attēlota milisekundēs, savukārt sinhronizācija un signālu salīdzināšana tiek veikta pēc rekonstrukcijas kopīgajā galvenajā laika bāzē.

2.2. Eksperimentālie objekti

Metodoloģiskā validācija tika veikta konstrukciju savienojumiem, kas ietvēra dažādus materiālus, savienojumu tipus un degradācijas scenārijus. Pētījumu programmā tika iekļauti gan koka, gan tērauda konstrukciju savienojumi.

Eksperimentālie objekti pildīja divas funkcijas:

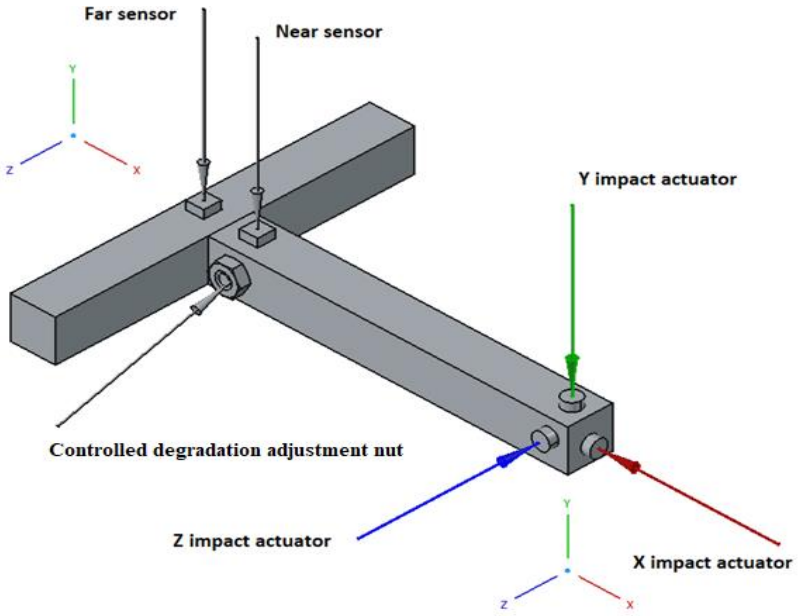
- atbalstīja atsevišķu metodoloģisko komponentu izstrādi, kas aprakstīta pievienotajās publikācijās [12–15];
- nodrošināja bāzes gadījumu integrētā ietvara galīgajai validācijai.

Atbilstoši promocijas darba formātam galīgā metodoloģija tika validēta bāzes konstrukciju savienojumā, savukārt pārējie eksperimentālie objekti sniedza papildinošus pierādījumus par atsevišķu metodoloģisko komponentu darbību. Starpposmu validācijas gadījumos ne vienmēr tika izmantota pilna integrētā konfigurācija, tomēr tie bija būtiski piedāvātā ietvara izstrādei.

2.3. Sensoru konfigurācija un izvietojuma prasības

Mērījumu konfigurācijā izmantoti *3DOF* akselerometri, kas uzstādīti konstrukciju savienojuma pretējās pusēs (2.1. att.). Katrs sensors iegūst trīs ortogonālas lineārā paātrinājuma komponentes X, Y un Z. Saskaņojot tuvējās puses komponentes $\mathrm{X_{Near}}, \mathrm{Y_{Near}}, \mathrm{Z_{Near}}$ ar atbilstošajām attālās puses asīm $\mathrm{X_{Far}}, \mathrm{Y_{Far}}, \mathrm{Z_{Far}}$, tiek izveidoti trīs *AMR* pāri.

Šī konfigurācija ļauj īstenot *MTRIF*, definējot tuvējā sensora atrašanās vietu kā virtuālo trieciena punktu. Iegūtie sinhronizētie dati nodrošina pamatu *RCR* novērtēšanai pa atsevišķām asīm un galīgajai *MCCM* apvienošanai. Tuvējais sensors reģistrē atsauces ierosinājuma stāvokli, savukārt attālais sensors reģistrē caur savienojuma saskarni pārnesto reakciju.



2.1. att. Minimālā sensoru konfigurācija un mērījumu ģeometrija.

2.3.1. Virtuālās koaksiālās salāgošanas prasība

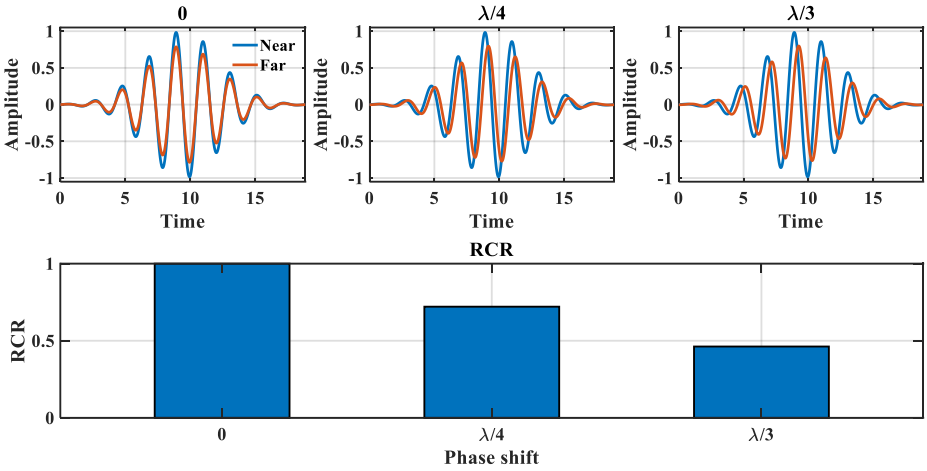
Šī prasība, kas šajā darbā tiek apzīmēta kā virtuālā koaksiālā salāgošana, nodrošina to, ka tuvējā un attālā sensora atbilstošās asis ir ģeometriski kolineāras un virzieniski saskaņotas (2.1. att.). Derīgai *AMR* pāru veidošanai ir jānodrošina abu sensoru atbilstošo lineārā paātrinājuma asu salāgošana.

Šajā ietvarā tuvējais sensors tiek novietots virtuālā trieciena pusē, ko nosaka *MTRIF*, savukārt attālais sensors reģistrē caur savienojumu pārnesto reakciju. Bāzes īstenojumā salāgošana tika panākta ar precīzu sensoru fizisko uzstādīšanu, kas detalizēti aprakstīta 4. nodaļā. Lai gan atlikušās nesalāgotības varētu koriģēt, izmantojot koordinātu sistēmas transformāciju, šāda pieeja šajā darbā tiek aplūkota kā metodoloģijas paplašinājums un apspriesta tikai 7. nodaļā.

2.3.2. Ietekme uz viļņformas salīdzināmību (*RCR*)

Viļņformas salīdzināmībai *AMR* pārī ir nepieciešams, lai attālums starp tuvējā un attālā sensora mērījumu punktiem pa saskaņoto asi būtu mazāks par vienu ceturtdaļu no īsākā nozīmīgā viļņa garuma. Šī nosacījuma neievērošana palielina fāzes nesakritību, tādējādi samazinot punktveida koherences novērtēšanas uzticamību un *RCR* novērtējuma robustumu (2.9. apakšnodaļa).

2.2. attēlā ilustrēta šī ietekme trīs normalizētiem attāluma gadījumiem – 0, λ/4 un λ/3. Palielinoties attālumam, viļņformu pārklāšanās samazinās, izraisot atbilstošu *RCR* samazinājumu. Ilustrētajā gadījumā λ/4 nosacījums saglabā vairāk nekā 50 % no atsauces metrikas līmeņa, savukārt λ/3 nosacījums samazina to vairāk nekā divas reizes, salīdzinot ar nulles nobīdes bāzes gadījumu. Šis samazinājums nozīmē būtisku diagnostiskās jutības zudumu *RCR* metodoloģijā.

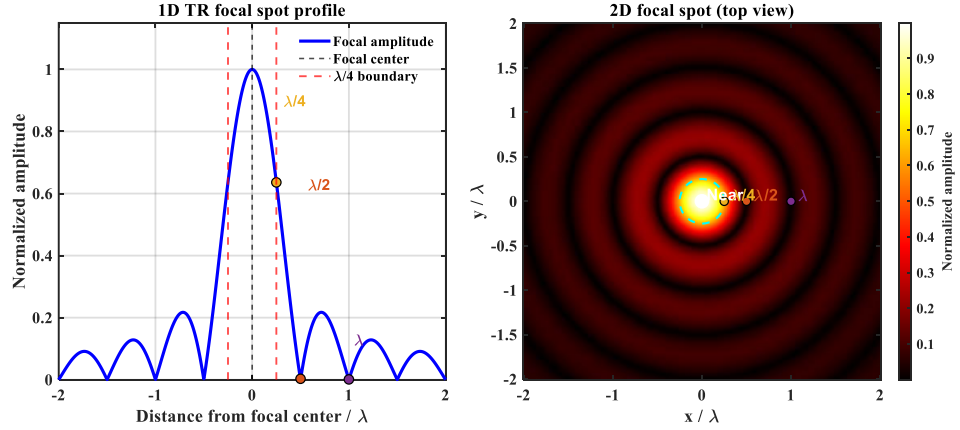


2.2. att. Fāzes nobīdes ietekme uz *RCR*.

2.3.3. Ietekme uz laika reversijas defokusēšanos

Šis kritērijs nosaka arī *MTRIF* radītās fokusa zonas telpisko apmēru. Fokusētā enerģija saglabājas koncentrēta aptuveni λ/4 lielā apgabalā tuvējā sensora atrašanās vietas apkārtnē. Ja attālais sensors tiek novietots ārpus šīs fokusa zonas, tas reģistrē defokusētu, zemākas amplitūdas signālu, kas neatspoguļo paredzēto virtuālā trieciena reakciju.

Tādēļ λ/4 nosacījums ir būtisks tuvējā un attālā sensora reakciju salīdzinājuma fizikālās pamatotības saglabāšanai (2.3. att.). Tuvējais sensors reģistrē atsauces fokusēto stāvokli, savukārt attālajam sensoram jāatrodas fokusa zonā, lai reģistrētu atbilstošo pārnesto reakciju. Šī attāluma sliekšņa pārsniegšana izraisa gan *RCR* robustuma, gan *AMR* pāru fizikālās reprezentativitātes zudumu.



2.3. att. *TR* fokusa zona un defokusēšanās, palielinoties attālumam no fokusa.

2.3.4. Praktiskais joslas platuma kritērijs sensoru attālumam

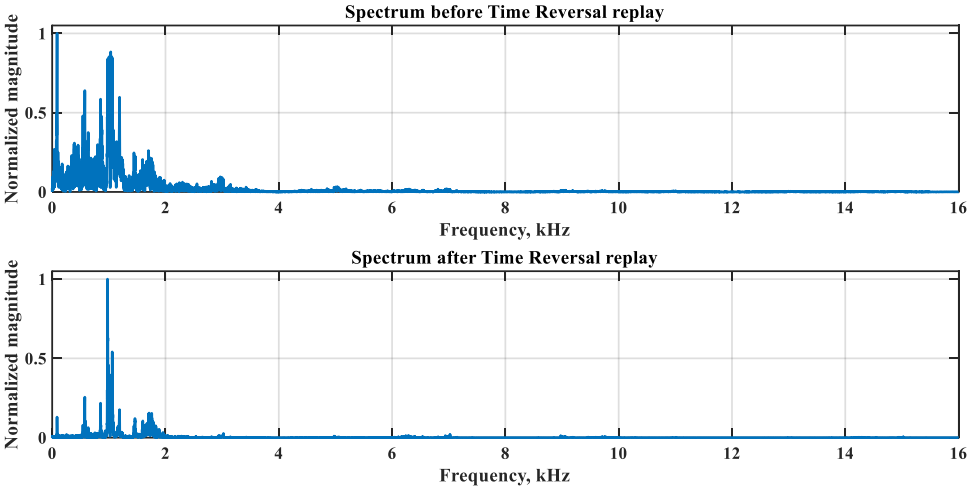
Maksimāli pieļaujamo attālumu starp tuvējā un attālā sensora mērījumu punktiem ierobežo augstākā izmantojamā frekvence signālā. Šo frekvenci nosaka Naikvista robeža, aktuatoru joslas platums, konstrukcijas dinamika un sistēmas trokšņa līmenis.

Šajā pētījumā signāla komponentes saglabājas novērojamas līdz 9 kHz frekvencei (2.4. att.). Maksimāli pieļaujamais attālums tiek noteikts pēc ceturtdaļviļņa garuma kritērija:

$$d_{\max} \approx \frac{\lambda_{\min}}{4} = \frac{c_p(f_{\max})}{4 f_{\max}}. \tag{2.1}$$

2.1. vienādojumā izmantotie lielumi ir šādi: $\lambda_{\min}$ ir minimālais viļņa garums pie $f_{\max}$; $c_p(f_{\max})$ ir lieces viļņa fāzes ātrums; $f_{\max}$ ir augšējā frekvences robeža.

HEA 100 tērauda sijai fāzes ātrums, ja frekvence ir 9 kHz, ir 2,7–3,4 km/s, kas dod 75–96 mm robežvērtību. Eksperimentālais attālums starp tuvējā un attālā sensora mērījumu punktiem bija aptuveni 30 mm (4.2. a att.), tādēļ kritērijs tiek izpildīts bez papildu joslas platuma ierobežojumiem. Ja nepieciešams lielāks sensoru attālums, $f_{\max}$ jāsamazina ar nulles fāzes filtrēšanu, lai saglabātu viļņa garuma saderību ar sensoru izvietojumu.



2.4. att. Mērīto reakcijas spektru piemērs pirms un pēc laika reversijas atkārtotas atskaņošanas.

2.4. Aktuatoru konfigurācija un izvietojuma prasības

Aktuatoru konfigurācijai jānodrošina daudzveidīgi ierosinājuma ceļi, lai veicinātu daudzasu aktivizāciju mērķa apgabalā. Ideālā gadījumā aktuatori tiek izvietoti tā, lai neatkarīgi ierosinātu galvenos konstrukcijas reakcijas virzienus. Šo neatkarību var uzlabot, palielinot aktuatoru skaitu vai ieviešot kontrolētu asimetriju ar ārpus centra izvietotiem aktuatoriem, lai stimulētu sarežģītākus viļņu laukus.

MTRIF ietvars neprasa tīru vienas ass ierosinājumu atsevišķās aktuatoru vietās. Tā vietā tas balstās atšķirīgos pārneses ceļos, lai nodrošinātu to, ka laikā reversētie viļņu lauki konverģē tuvējā sensora atrašanās vietā un rada fokusētu daudzasu reakciju. Šis daudzdimensionālais fokuss ir būtisks visu trīs ortogonālo asu stimulēšanai, kas pārstāvētas *AMR* pāros.

Šajā pētījumā kā bāzes risinājums tika īstenota trīs aktuatoru konfigurācija. Šāds izvietojums nodrošina gan asij selektīvu secīgu atkārtotu atskaņošanu, gan daudzkomponentu reakcijas aktivizāciju. Aktuatoru konfigurācijas uzdevums ir nodrošināt pietiekamu pamatu

daudzdimensionālai fokusēšanai tuvējā sensora atrašanās vietā, tādējādi ļaujot veikt noturīgu *RCR* novērtēšanu un *MCCM* apvienošanu. Trīs aktuatoru konfigurācijas praktiskā īstenošana detalizēti parādīta 4.2. b attēlā.

2.5. Degradācijas imitācija

Pakāpeniska savienojuma degradācija šajā darbā tiek definēta kā kontrolēta pētāmā savienojuma mehāniskās saistes un stinguma samazināšana vai modificēšana. Pievienotajās publikācijās pret degradāciju jutīga uzvedība tika pētīta dažādos konstrukciju un materiālu scenārijos, tostarp virzienatkarīgās reakcijas izmaiņās, selektīvā stiprinājumu noņemšanā, skrūves pievilkšanas momenta izmaiņās un mērījumos dažādos statiskās slodzes apstākļos. Šie pētījumi sniedza papildinošus pierādījumus, ka savienojuma stāvokļa izmaiņas var atšķirīgi ietekmēt dažādas reakcijas asis.

Šajā promocijas darbā izstrādātajam integrētajam ietvaram degradācijas imitācija tiek izmantota, lai izveidotu atkārtojamus strukturālos stāvokļus ar pakāpeniski mainītām pārneses īpašībām caur savienojumu. Šīs secības mērķis nav reproducēt visus iespējamos reālos bojājumu mehānismus, bet gan nodrošināt kontrolētus savienojuma integritātes stāvokļus, lai novērtētu, vai *MTRIF-AMR* diagnostikas cikls un daudzasu tuvējā un attālā sensora reakciju salīdzinājums saglabā jutību pret pakāpeniskām savienojuma stāvokļa izmaiņām.

Bāzes validācijas eksperimentā šī koncepcija tika īstenota, kontrolēti samazinot skrūves pievilkšanas momentu (4.2. c att.). Konkrētā degradācijas secība ir aprakstīta 4.1.3. apakšnodaļā un 4. nodaļā.

2.6. Trieciena fokusēšanas ar laika reversiju principi

Laika reversija (*Time Reversal*, *TR*) ir viļņu lauka refokusēšanas metode, kas balstās reciprocitātes principā. Saskaņā ar [18] laika reversija frekvenču domēnā ir ekvivalenta fāzes konjugācijai. Izplatītam signālam

$$Y(\omega) = H(\omega)S(\omega) \tag{2.2}$$

laika reversija dod

$$Y_{TR}(\omega) = Y^{*}(\omega), \tag{2.3}$$

un refokusētais lauks kļūst šāds:

$$Z(\omega) = H(\omega)\, Y^{*}(\omega) = H(\omega)\, H^{*}(\omega)\, S^{*}(\omega) = |H(\omega)|^{2}\, S^{*}(\omega), \tag{2.4}$$

kur $Y(\omega)$ – uztvertā signāla spektrs; $S(\omega)$ – ierosinājuma spektrs; $H(\omega)$ – konstrukcijas pārneses funkcija; $Z(\omega)$ – refokusētais lauks; augšraksts (*) apzīmē komplekso konjugāciju; ω apzīmē leņķisko frekvenci.

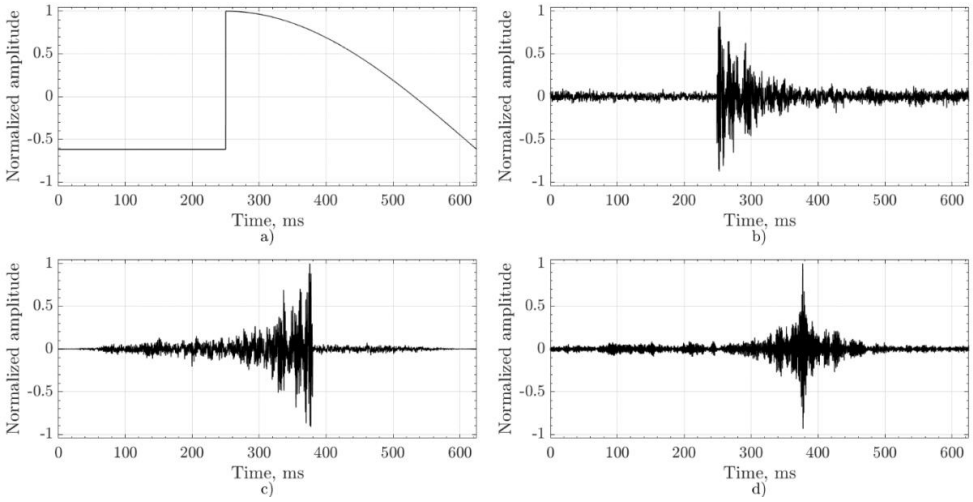
Šajā ietvarā *TR* kalpo kā mehānisms, kas ļauj virtuāli pārnest ierosinājumu no fiziska aktuatora uz attālu mērķa pozīciju. Atkārtoti atskaņojot laikā reversētas reakcijas, ievadītā enerģija tiek telpiski lokalizēta un fokusēta mērķa vietā.

Platjoslas mehānisku triecienu gadījumā konstrukcija selektīvi pārnes tās frekvenču komponentes, kas ir saderīgas ar tās dinamiskajām īpašībām. Laikā reversētās reakcijas atkārtota izvadīšana no aktuatora atrašanās vietas liek viļņu frontēm konverģēt sākotnējā

reģistrācijas punktā, atjaunojot fokusētu ierosinājumu. Tādēļ *TR* darbojas gan kā virtuālās pārvietošanas mehānisms, gan kā fizikāli selektīvs fokusēšanas process.

Pamata *TR* procedūra ietver četrus soļus.

1. Platjoslas impulsa izvadīšana konstrukcijā ar aktuatoru (2.5. a att.).
2. Reakcijas iegūšana mērķa sensora pozīcijā (2.5. b att.).
3. Laikā reversētā iegūtā signāla atkārtota izvadīšana (2.5. c att.).
4. Reakcijas iegūšana mērķa sensora pozīcijā (2.5. d att.).



2.5. att. Četru soļu laika reversijas procedūra vienā dimensijā.

Reprezentatīvs praktisks lietojums, kas saistīts ar šo principu, tika īstenots autora agrākajā darbā par ieraktu mīnu detektēšanu, izmantojot laika reversijas fokusēšanu ar vairākiem izstarotājiem un vienu uztvērēju (2.6. att.). Šajā lietojumā koordinēta atkārtota atskaņošana no vairākiem aktuatoriem palielināja fokusēto enerģiju mērķa apgabalā un parādīja, ka laika reversijas fokusēšana var saglabāt efektivitāti arī stipri slāpējošās vidēs. Šī promocijas darba kontekstā šis agrākais rezultāts ir nozīmīgs nevis kā tiešs konstrukciju savienojuma eksperiments, bet kā metodoloģisks precedents, kas parāda, ka koordinētu vairāku aktuatoru atkārtotu atskaņošanu var izmantot enerģijas koncentrēšanai izvēlētā attālā mērķa vietā. Šis princips veido konceptuālo pamatu daudzdimensionālajam paplašinājumam, kas aprakstīts nākamajā apakšnodaļā.



2.6. att. Eksperimentālā laika reversijas mīnu detektēšanas iekārta ar vairākiem izstarotājiem un vienu uztvērēju. Foto publicēts ar *Artann Laboratories* atļauju; atbilstošais lietojums aprakstīts [27].

2.7. Daudzdimensionāla trieciena fokusēšana ar laika reversiju (*MTRIF*)

MTRIF ietvars paplašina *TR* principu no vienkomponentes fokusēšanas uz vienlaikus daudzasu ierosinājumu intereses punktā. Procedūra tiek veikta šādi:

1) platjoslas impulss tiek izvadīts ar aktuatoru, kas orientēts X virzienā (2.7. a att.), un kolineārā X reakcijas komponente tiek reģistrēta tuvējā sensorā (2.7. b att.);
2) platjoslas impulss tiek izvadīts ar aktuatoru, kas orientēts Y virzienā (2.7. e att.), un kolineārā Y reakcijas komponente tiek reģistrēta tuvējā sensorā (2.7. g att.);
3) platjoslas impulss tiek izvadīts ar aktuatoru, kas orientēts Z virzienā (2.7. i att.), un kolineārā Z reakcijas komponente tiek reģistrēta tuvējā sensorā (2.7. l att.);
4) *MTRIF* atkārtotās atskaņošanas sagatavošana: iegūtās kolineārās X, Y un Z komponentes tiek normalizētas un laikā reversētas; šīs viļņformas tiek piešķirtas kā atkārtotās atskaņošanas signāli atbilstošajiem aktuatoriem;
5) vienlaikus atkārtota atskaņošana – trīs laikā reversētie signāli tiek izvadīti vienlaikus, katrs caur to pašu aktuatoru, kas tika izmantots raksturošanas solī; šī sinhronizētā izvadīšana tuvējā sensora atrašanās vietā rada vienlaikus trīsasu fokusētu reakciju (2.8. e, 2.8. k un 2.8. q att.).

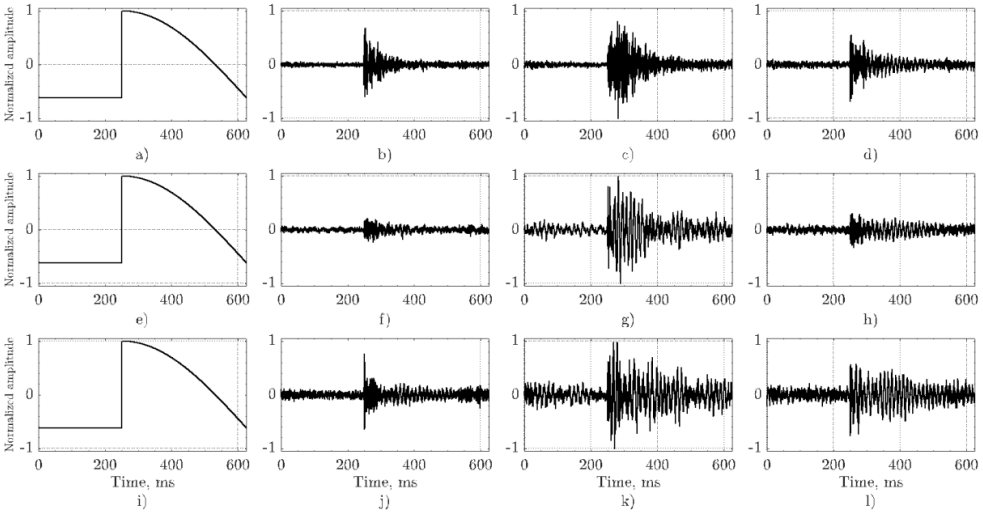
Lai uzlabotu atkārtojamību un apspiestu nekorelētu troksni, katrs ierosinājuma signāls *MTRIF* darbplūsmā tika izvadīts vairākas reizes. Atbilstošās reakcijas, kas reģistrētas uztverošā sensora pusē, pirms to izmantošanas atkārtotās atskaņošanas sagatavošanai vai turpmākai metriku novērtēšanai tika vidējotas.

Lai gan *MTRIF* atkārtotās atskaņošanas signālu sintēzei tiek izmantotas tikai kolineārās komponentes, katrā raksturošanas solī tiek reģistrēta pilna trīsasu reakcija, lai uzraudzītu sistēmas uzvedību. Kā redzams 2.7. attēlā, konstrukcijas saiste un modālā sajaukšanās nozīmē, ka maksimālā reakcija ne vienmēr parādās asī, kas nomināli ir kolineāra ar aktuatoru. To var novērot X, Y un Z virziena ierosinājuma gadījumos attiecīgi 2.7. b–d, 2.7. f–h un 2.7. j–l attēlā.

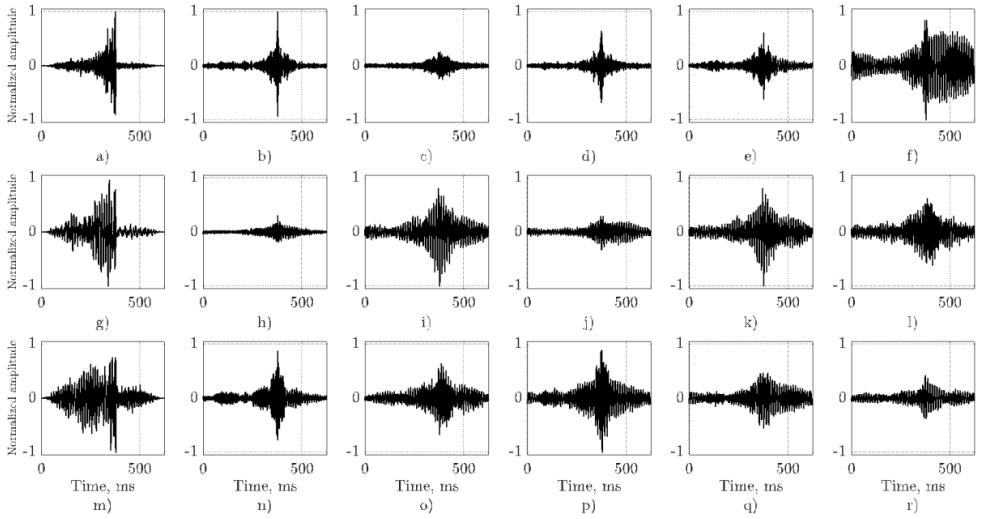
Tikai verifikācijas nolūkos sagatavotie laikā reversētie signāli tika atskaņoti arī secīgi (2.8. a–d, 2.8. g–j un 2.8. m–p att.). Šis solis nav daļa no galīgās *MTRIF* ierosinājuma

procedūras; tas tiek izmantots, lai apstiprinātu, ka laikā reversēta atkārtota atskaņošana palielina paredzēto mērķa komponentu kontrastu intereses punktā (*POI*).

Vienlaikus atkārtotas atskaņošanas laikā pārnestā reakcija tiek reģistrēta arī attālajā sensorā (2.8. f, 2.8. l un 2.8. r att.). Šī reakcija netiek izmantota paša *MTRIF* ierosinājuma veidošanai, bet vēlāk tiek izmantota *AMR*, *RCR* un *MCCM* novērtēšanā. Tādējādi procedūra izveido atkārtojamu un sinhronizētu trīsasu ierosinājuma nosacījumu, kas nepieciešams piedāvātajam diagnostikas ietvaram.



2.7. att. Sākotnēji izvadītie signāli un izvēlētie virzieniskās reakcijas signāli atkārtotās atskaņošanas sagatavošanai.



2.8. att. Daudzasu reakcija uz laikā reversētu atkārtotu atskaņošanu.

2.8. Laika saskaņotības priekšnosacījums un *CNSS* pamatojums

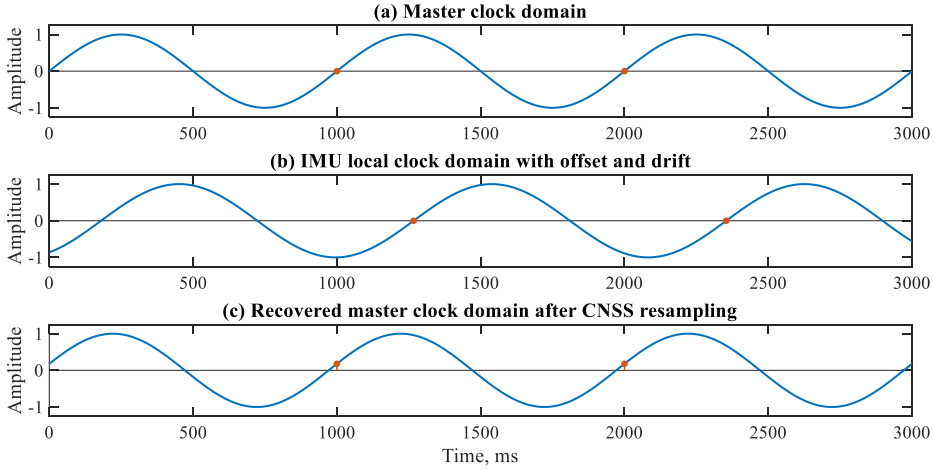
Gan laika reversijas fokusēšanai, gan *RCR* balstītam salīdzinājumam ir nepieciešama nepārtraukta paraugu līmeņa salāgošana visos kanālos. Sākuma brīža sinhronizācija vien nav pietiekama, jo neatkarīgi takts domēni laika gaitā atšķiras statiskās nobīdes un temperatūras izraisīta dreifa dēļ. Šī novirze pasliktina laika saskaņotību, kas nepieciešama *MTRIF* atkārtotajai atskaņošanai un punktveida salīdzināšanai.

Lai saglabātu signālu salīdzināmību, uzkrātajai laika nesaskaņotībai jāatbilst ceturtdaļperioda kritērijam attiecībā pret augstāko saglabāto frekvenci:

$$\Delta t_{\max} < \frac{1}{4 f_{\max}}. \tag{2.5}$$

2.5. vienādojumā izmantotie lielumi ir maksimāli pieļaujamā uzkrātā laika kļūda $\Delta t_{\max}$ un augstākā izmantojamā frekvence $f_{\max}$. Ja diskretizācijas frekvence ir 32 kHz, Naikvista frekvence ir 16 kHz, bet tai atbilstošais periods ir 62,5 µs, tādējādi pieļaujamā robeža ir 15,6 µs. Tipiska 30 ppm oscilatora neatbilstība 10 s laikā rada 300 µs kļūdu, kas pārsniedz pieļaujamo robežu [31, 33].

CNSS saglabā kopīgu laika atsauci starp neatkarīgi taktētiem mērījumu mezgliem. 2.9. attēlā parādīts: a) signāls galvenās takts domēnā; b) signāls lokālā sensora takts domēnā dreifa apstākļos; c) signāls, kas rekonstruēts, izmantojot marķieros balstītu pārparaugošanu. Reģistrētie marķieri kalpo kā laika novērojamie lielumi, kas ļauj novērtēt neatbilstību un atjaunot paraugu līmeņa salāgošanu [32, 33]. Lai gan 2.9. attēlā novirzes skaidrības labad ir pārspīlētas, nekoriģēts reāls dreifs ir pietiekams, lai pasliktinātu fāžu saskaņotību un *RCR* novērtējuma robustumu.



2.9. att. Takts nobīdes, dreifa un marķieros balstītas atjaunošanas ilustrācija, izmantojot *CNSS*.

2.9. Reakcijas koherences attiecība (*RCR*)

Piedāvātā metodoloģija novērtē trīs *AMR* pārus, ko veido atbilstošās lineārā paātrinājuma komponentes, kas mērītas gar saskaņotām asīm savienojuma tuvējā un attālā pusēs, tāpēc

galvenais uzdevums bija izvēlēties piemērotu katras ass koherences metriku [12–14]. Izvēlētajai metrikai jābūt:

- invariantai pret absolūto amplitūdu;
- jutīgai pret viļņformas formu un relatīvo amplitūdu atbilstošajā *AMR* pārī;
- robustai pret zemas enerģijas vai trokšņainiem *AMR* pāriem;

Metodoloģijas izstrādes laikā tika izvērtēti vairāki kandidāti:

- normalizētās krusteniskās korelācijas *RMS* (*NCCR*);
- Pīrsona korelācijas koeficients;
- kosinusa līdzība;
- reakcijas koherences attiecība (*RCR*).

2.1. tabula

Kvalitatīvs kandidātu metriku salīdzinājums, kas izmantots katras ass līdzības metrikas izvēles procesā

Metrika	**Amplitūdas invariance**	**Formas jutība**	**Noturība pret troksni**	**Piezīmes**
NCCR	✓	✓	✗ Vāja trokšņainām asīm	Nestabila zema signāla kanālos
Pīrsona korelācija	✓	✓	✗ Vāja trokšņainām asīm	Klasiska metrika, bet nestabila zema *SNR* gadījumā
kosinusa līdzība	✓	✗ Slikta	✗ Vāja trokšņainām asīm	Nestabila daļējas sakritības apstākļos
RCR	✓	✓	✓ Augsta	Vispiemērotākā *3DOF MCCM* aprēķinam

Kandidātu metriku kvalitatīvais salīdzinājums pa atsevišķām asīm dots 2.1. tabulā. Balstoties šajā novērtējumā, *RCR* tika izvēlēta kā galīgā katras ass metrika, jo tā nodrošina labāko līdzsvaru starp formas jutību, amplitūdas invarianci, robustumu pret troksni un praktisku atkārtojamību *AMR* novērtēšanas ietvarā abās savienojuma pusēs [12–14]. Konkrēti, *RCR* maksimuma un *RMS* attiecības formulējums, kas detalizēti aprakstīts 5.1. apakšnodaļā, dabiski samazina trokšņainu vai vāji aktivētu kanālu ietekmi, jo nejaušs troksnis rada zemu maksimuma un *RMS* attiecību, savukārt koherenta viļņformas sakritība rada izteiktu maksimumu punktveida reizinājuma signālā. Šī pašsvēršanas īpašība padara *RCR* piemērotāku nekā Pīrsona korelācija vai kosinusa līdzība lietojumiem, kuros atsevišķiem *AMR* pāriem var būt būtiski atšķirīgas signāla un trokšņa attiecības. Kvantitatīvs visu četru kandidātu metriku salīdzinājums uz tās pašas bāzes datu kopas ir dokumentēts pievienotajās publikācijās [12, 14].

2.10. Daudzasu komponentu koherences metrika (*MCCM*)

MCCM ir apvienots skalārs savienojuma stāvokļa indikators piedāvātajā ietvarā [12, 14, 15]. Tā apvieno trīs *RCR* vērtības, kas iegūtas pa atsevišķām asīm no lineārā paātrinājuma *AMR* pāriem, vienā skalārā metrikā. Šī apvienošana samazina no ass atkarīgu

izkliedi un uzlabo savienojuma stāvokļa novērtējuma interpretējamību. Eiklīda normas formulējums tika izvēlēts salīdzinājumā ar alternatīvām apvienošanas stratēģijām – svērto summu, ģeometrisko vidējo vai minimālās vērtības pieejām, jo tas saglabā visu trīs asu ieguldījumu, neprasot iepriekšēju informāciju par pa asīm specifisku jutību vai svēruma koeficientiem. *MCCM* aprēķina matemātiskā procedūra detalizēti aprakstīta 5.2. apakšnodaļā.

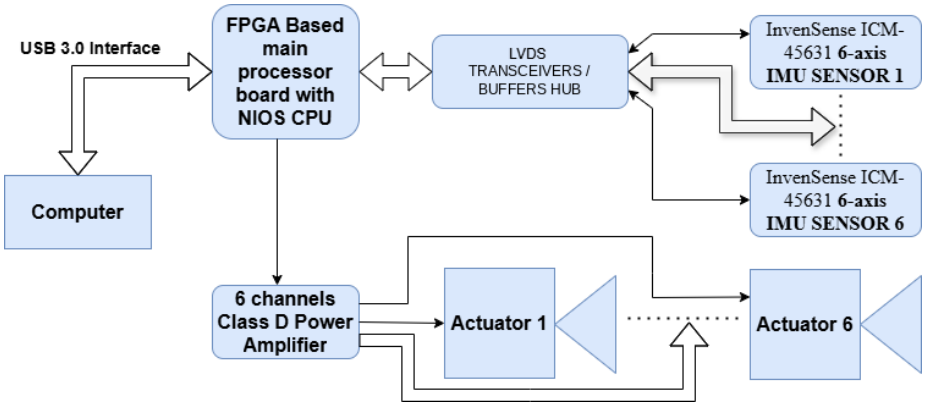
3. NODAĻA. APARATŪRAS-PROGRAMMATŪRAS PLATFORMA DATU IEGUVEI

3.1. Platformas mērķis un tvērums

Piedāvātajai metodoloģijai ir nepieciešama specializēta aparatūras-programmatūras platforma, kas nodrošina šādas iespējas:

- sinhronizētu daudzaktuatoru ierosinājumu;
- daudzkanālu *6DOF* mērījumus;
- augstu noturību pret trokšņiem attālināti izvietotiem sensoriem;
- ātrdarbīgu divvirzienu datu pārraidi starp datu ieguves aparatūru un resursdatoru;
- precīzu ilgtermiņa laika domēna sinhronizāciju starp aktuatoriem un sensoriem.

Kopā šīs prasības nosaka minimālo funkcionālo platformas struktūru, kas parādīta 3.1. attēlā [14, 27, 31–33]. Tās detalizētā arhitektūra un apakšsistēmu organizācija ir aprakstīta nākamajās apakšnodaļās.



3.1. att. Aparatūras un programmatūras platformas blokshēma.

3.2. Sistēmas pārskats un pamatarhitektūra

Pamatarhitektūras centrā ir *FPGA* balstīta galvenā procesora plate (*Intel Cyclone IV EP4CE22*), kas nodrošina platformai nepieciešamās datu ieguves un vadības funkcijas (3.1. att.), tostarp:

- laika vadību platformas galvenās takts domēnā;
- ierosinājuma viļņformu ģenerēšanu un vadību;
- *SPI* datu plūsmu ieguvi un apstrādi no telpiski izkliedētiem *IMU* sensoriem;
- kadru sinhronizācijas marķieru ģenerēšanu, ievietošanu un uztveršanu;
- datu kadrēšanu un iepakošanu ierakstīšanai un pārraidei.

Sensoru dati tiek pārraidīti, izmantojot *LVDS* uztvērējraidītāju un buferu mezglu, kas pagarina digitālo *SPI* sensora saskarni pa gariem kabeļu posmiem līdz *FPGA*, nodrošinot augstu noturību pret trokšņiem un ļaujot izvietot sensorus attālināti. Aktuatorus darbina pielāgots seškanālu D klases jaudas pastiprinātājs, ko kontrolē *FPGA* bloks. Saziņa ar resursdatoru tiek

nodrošināta, izmantojot *USB 3.0* saskarni platformas konfigurēšanai, mērījumu vadībai un ātrdarbīgai divvirzienu datu kopu pārraidei.

3.3. Ierosmes apakšsistēma

Ierosinājuma apakšsistēma nodrošina kontrolētu mehānisko ievadi konstrukcijā. Tā sastāv no pielāgota seškanālu D klases jaudas posma, kas darbina līdz sešiem vibrācijas aktuatoriem. Pastiprinātājs tiek vadīts, izmantojot *I²S* digitālo audio kopni, kas ļauj reāllaikā straumēt viļņformas no *FPGA* bez nepieciešamības pēc liela apjoma mikroshēmas iekšējās atmiņas. D klases topoloģija nodrošina augstu efektivitāti un zemu siltuma izkliedi daudzkanālu darbības laikā.

Aktuatori ir rezonansē balstīti vibrācijas skaļruņi, kas piestiprināti tieši pie konstrukcijas elementa (3.2. att.). Šīs ierīces ievada vibrācijas virsmā, izmantojot pašu konstrukciju kā izstarojošo vidi. Šāda konfigurācija nodrošina efektīvu mehānisko saisti un kompaktu montāžu, kas piemērota *MTRIF* ierosinājumam.

Pašreizējā īstenojumā efektīvo joslas platumu ierobežo sensoru diskretizācijas frekvences. Akselerometra kanāliem izmantojamā augšējā frekvences robeža ir aptuveni 16 kHz.



3.2. att. Rezonanses skaļrunis, kas izmantots kā aktuators.

3.4. Mērīšana, datu ieguve un pret trokšņiem noturīga datu pārraide

Platforma atbalsta līdz sešiem *6DOF IMU* mērījumu mezgliem, kā primāro sensoru izmantojot *ICM-45631*. Lai gan aparatūra nodrošina pilnu *6DOF* datu ieguvi (trīs translācijas un trīs rotācijas kanālus), šajā darbā uzmanība tiek pievērsta tikai trim lineārā paātrinājuma kanāliem, lai izpildītu *3DOF* metodoloģijas prasības. Īstenojumā akselerometra datiem tiek izmantota 32 kHz diskretizācijas frekvence, žiroskopa datiem – 8 kHz.

Datu ieguve tiek veikta ar *SPI* un pārraidīta uz *FPGA*, izmantojot *LVDS* paplašinātājus, atbalstot līdz 100 m garus kabeļus. Šāda konfigurācija nodrošina augstu noturību pret trokšņiem attālinātai sensoru izvietošanai. *FPGA* veic daudzkanālu datu plūsmas kadrēšanu, buferēšanu un iepakošanu pārraidei uz resursdatoru. Sensoru puses arhitektūra redzama 3.1. attēlā.

3.5. Laika atsauces nodrošinājums un *CNSS* novērojamie lielumi

Sadalīto mērījumu mezglu un galvenā ierosinājuma kontroliera neatkarīgās laika bāzes rada nepieciešamību pēc aktīvas laika kompensācijas. Pat kopīga sākuma notikuma gadījumā lokālās sensoru laika bāzes novirzās no galvenās laika bāzes statiskās nobīdes un temperatūras izraisīta dreifa dēļ, pārkāpjot *MTRIF* un *RCR* analīzes prasības [31–33].

Lai kvantificētu šo novirzi, platforma katrā datu ieguves plūsmā ievieto periodiskus sinhronizācijas marķierus. Šie marķieri darbojas kā laika novērojamie lielumi, kas tiek uztverti sinhroni ar sensoru datiem, lai novērtētu uzkrāto neatbilstību, nemainot attālo mezglu lokālo takts ģenerēšanu. Signālu apstrādes laikā šie novērojamie lielumi tiek izmantoti visu kanālu rekonstrukcijai kopīgā galvenās takts domēnā, nodrošinot fāzes saskaņotību, kas nepieciešama *AMR* pāru derīgam punktveida viļņformu salīdzinājumam.

Pētījumos [31–33] tika demonstrētas pikosekunžu līmeņa sinhronizācijas un laika intervālu kompensācijas iespējas. Šajā platformā šie rezultāti tiek izmantoti kā *CNSS* metodoloģiskais un inženiertehniskais pamats; tomēr šāda precizitāte šeit aplūkotajam paātrinājuma mērījumu kanālam nav nepieciešama. Akselerometra dati tiek iegūti ar 32 kHz diskretizācijas frekvenci, kas atbilst 31,25 µs diskretizācijas intervālam. Saglabātajai augšējai frekvencei 16 kHz ceturtdaļperioda laika kritērijs atbilst maksimāli pieļaujamai laika novirzei 15,6 µs, kas vienmērīga kļūdas sadalījuma gadījumā ir ekvivalenta aptuveni 9,0 µs *RMS*. Tādēļ viens rekonstruēts mērījums paliek tuvu pieļaujamajai laika robežai. Lai iegūtu stabilu laika rezervi, atkārtoti, pēc marķieriem salāgoti mērījumi tiek vidējoti, samazinot nejaušo laika komponenti kā $1/\sqrt{N}$. Pie četriem atkārtotiem mērījumiem efektīvā nenoteiktība tiek samazināta līdz aptuveni 4,5 µs *RMS*, savukārt šajā darbā izmantotie astoņi atkārtotie mērījumi to samazina vēl vairāk – līdz aptuveni 3,2 µs *RMS*. Tādējādi pēc marķieros balstītas rekonstrukcijas un vidējošanas šī paātrinājuma mērījumu kanāla laika prasība tiek izpildīta ar skaidru rezervi.

3.6. Vadības programmatūra un lietotāja saskarne

Promocijas darba ietvaros tika izstrādāts specializēts resursdatora programmatūras komplekts, kas kalpo kā platformas vadības priekšsaskarne. Programmatūra apvieno eksperimenta vadību, tiešsaistes uzraudzību un datu kopu pārvaldību vienotā vidē, nodrošinot netraucētu mijiedarbību starp lietotāju un aparatūru. Izstrādātās programmatūras galvenās funkcijas ietver:

- ierosinājuma pārvaldību – viļņformu sagatavošana un daudzkanālu piešķiršanu;
- aparatūras vadību – datu ieguves ciklu konfigurēšanu un izpildi;
- datu apstrādi –marķieros balstītu resinhronizāciju, kadru salāgošanu un reāllaika vizualizāciju;
- iteratīva darba plūsmu – atkārtotās atskaņošanas signālu sagatavošanu *MTRIF* darbībai;
- datu glabāšanu – daudzkanālu datu ierakstīšanu un eksportēšanu pēcapstrādei.

Šī integrētā pieeja nodrošina precīzu eksperimentālo vadību un efektīvu datu apstrādi, tieši atbalstot šajā promocijas darba kopsavilkumā aprakstīto metodoloģiju.

3.7. Platformas galvenās specifikācijas

Platformas tehniskie raksturlielumi apkopoti 3.1. tabulā. Šie parametri definē mērījumu, ierosinājuma, sinhronizācijas un datu pārraides darbības robežas. *CNSS* pieejas laika principi un precizitātes rezerve aplūkoti 3.5. apakšnodaļā, un tos pamato pētījumi, kas aprakstīti [31–33].

3.1. tabula

Platformas galvenās specifikācijas

Parametrs	Specifikācija
Sensoru mezgli	Līdz 6 × *6DOF IMU* (*ICM-45631*)
Lineārā paātrinājuma *ODR*	32 kHz (izmantots *3DOF* metodoloģijai)
Leņķiskā ātruma *ODR*	8 kHz (atbalstīts aparatūrā)
Efektīvais joslas platums	Sensoru ierobežots: ~ 16 kHz (paātrinājums)
Akselerometra diapazons	Programmējams ±2 g līdz ±16 g
Akselerometra trokšņa blīvums	90 µg/√Hz
Ierosinājuma kanāli	6 × D klases kanāli (līdz 100 W maksimālā jauda katrā kanālā)
Vibrācijas aktuatori	6 × rezonanses vibratori (25 W nominālā jauda)
Attālo sensoru saite	*SPI* caur *LVDS* (līdz 100 m)
Resursdatora saskarne	*USB 3.0*

4. NODAĻA. DATU IEGŪŠANA

4.1. Bāzes objekts un savienojuma konfigurācija

Bāzes validācijā tika izmantots tērauda konstrukciju stends, kas ietvēra divas *S355* (*HEA 100*) sijas, kas savienotas ar daļēji stingru skrūvsavienojumu. Savienojums tika nostiprināts ar vienu *M16* skrūvi (stiprības klase 8.8). Šī konfigurācija tika izvēlēta, lai nodrošinātu atkārtojamu savienojuma stāvokli pakāpenisku stinguma izmaiņu un daudzasu mērījumu apstākļos. Eksperimentālā iekārta redzama 4.1. attēlā.



4.1. att. Bāzes tērauda siju stends.



4.2. att. Bāzes eksperimentālais izvietojums.

4.1.1. Sensoru izvietojums

Divi *3DOF* sensori tika uzstādīti pretējās savienojuma pusēs 30 mm attālumā no centra līnijas uz atsevišķiem sijas elementiem (4.2. a att.). Tuvējais sensors definē virtuālā trieciena atrašanās vietu *MTRIF* procedūrā, savukārt attālais sensors reģistrē caur savienojumu pārnesto viļņu lauku.

Sensoru X, Y un Z asis tika fiziski salāgotas uzstādīšanas laikā, lai izveidotu trīs analīzei nepieciešamos *AMR* pārus. Šāds izvietojums nodrošina virtuālo koaksiālo salāgošanu, kas nepieciešama punktveida signālu salīdzināšanai bez papildu koordinātu sistēmas transformācijām.

4.1.2. Aktuatoru izvietojums

Trīs rezonanses aktuatori tika uzstādīti uz tuvējās puses sijas, lai ierosinātu atbilstošās X, Y un Z asis (4.2. b att.). Aktuatori tika izvietoti telpiski izkliedētā konfigurācijā, nodrošinot *MTRIF* vajadzīgos pārneses ceļus. Šī konfigurācija nodrošina daudzdimensionālu ierosināšanu tuvējā sensora atrašanās vietā (virtuālajā trieciena punktā), neizvietojot fiziskus aktuatorus tieši intereses punktā (*POI*).

4.1.3. Degradācijas imitācijas metode

Bāzes validācijas eksperimentā pakāpeniska savienojuma degradācija tika imitēta, kontrolēti samazinot skrūves pievilkšanas momentu ar dinamometrisko atslēgu (4.2. c att.). Šī procedūra tika izvēlēta kā atkārtojams un atgriezenisks veids, kā mainīt skrūvsavienojuma mehānisko saisti un stingumu, nemainot sensoru vai aktuatoru konfigurāciju.

Pievilkšanas moments tika samazināts no 175 N·m līdz 0 N·m astoņos iepriekš definētos degradācijas posmos. Šajā eksperimentā pievilkšanas momenta secība tiek aplūkota kā kontrolēta savienojuma integritātes stāvokļu kopa, nevis kā visaptverošs visu iespējamo reālo bojājumu mehānismu attēlojums. Tās mērķis ir nodrošināt konsekventu pārneses īpašību izmaiņu secību, lai demonstrētu *MTRIF-AMR* diagnostikas ciklu un novērtētu *AMR* pāru jutību pret pakāpeniskām savienojuma stāvokļa izmaiņām.

4.2. Mērījumu soļi

Eksperimentālais process tika strukturēts kā atkārtots mērījumu un degradācijas cikls. Lai nodrošinātu konsekvenci starp degradācijas stāvokļiem, katrā pievilkšanas momenta līmenī tika izmantota viena un tā pati *MTRIF* procedūra, nemainot sensoru vai aktuatoru izvietojumu.

Darba plūsma tika īstenota šādi:

1) *START* – savienojums tika iestatīts bāzes stāvoklī, kas atbilda pilnībā pievilktam stāvoklim pie 175 N·m;
2) *MEASURE* – pašreizējam savienojuma stāvoklim tika veikta pilna *MTRIF* procedūra, kas aprakstīta 2.7. apakšnodaļā;
3) *RECORD* – trīsasu tuvējā un attālā sensora reakcijas, kas iegūtas vienlaikus atkārtotās atskaņošanas fāzē, tika saglabātas pašreizējam stāvoklim;
4) *DEGRADE* – savienojuma stingums tika samazināts, samazinot *M16* skrūves pievilkšanas momentu līdz nākamajam iepriekš noteiktajam līmenim;
5) *GOTO MEASURE* – mērījumu un degradācijas cikls tika atkārtots, līdz tika reģistrēts pilnībā atslābināts stāvoklis.

Degradācijas secība ietvēra astoņus pievilkšanas momenta līmeņus.

1. posms – 175 N·m, bāzes pievilktais stāvoklis;

2.–8. posms – 150 N·m, 125 N·m, 100 N·m, 75 N·m, 50 N·m, 25 N·m, 0 N·m (pilnībā atslābināts stāvoklis).

Šī cikla izpilde visos astoņos posmos veidoja vienu pilnu reakciju datu kopu. Katrā posmā vienlaikus *MTRIF* atkārtotās atskaņošanas laikā tika reģistrētas trīs lineārā paātrinājuma komponentes gan tuvējā, gan attālajā sensorā.

Pilna mērījumu un degradācijas secība tika atkārtota piecas reizes, nemainot sensoru un aktuatoru konfigurāciju. Katrā atkārtojumā tika ietverti tie paši astoņi pievilkšanas momenta līmeņi no 175 N·m līdz 0 N·m. Tādējādi atkārtotā datu kopa ietvēra:

3 kanāli × 2 sensori × 8 posmi × 5 atkārtojumi = 240 reakcijas signāli,

kas atbilst:

3 *AMR* pāri × 8 posmi × 5 atkārtojumi = 120 *AMR* pāri.

Šī atkārtotā datu kopa ļauj novērtēt gan degradācijas tendenci, gan mērījumu atkārtojamību, izmantojot katras ass *RCR* vērtību un apvienotās *MCCM* standartnovirzes.

5. NODAĻA. SIGNĀLU APSTRĀDE UN METRIKU NOVĒRTĒŠANA

Šajā nodaļā detalizēti aprakstītas skaitļošanas procedūras, ar kurām sinhronizētās tuvējā un attālā sensora reakcijas tiek pārveidotas diagnostiskajos indikatoros. Lai gan 2. nodaļā tika noteiktas *AMR*, *RCR* un *MCCM* komponentu konceptuālās definīcijas un metodoloģiskais pamatojums, šajā nodaļā ir precizēti pilni apstrādes algoritmi, kas piemēroti eksperimentālajai datu kopai. Darba plūsma tiek neatkarīgi piemērota katram no trim lineārā paātrinājuma *AMR* pāriem: $AMR_x; AMR_y; AMR_z$.

RCR un *MCCM* nodrošina diagnostikas darba plūsmas novērtēšanu pa atsevišķām asīm un daudzasu apvienošanas līmeni. To funkcionālās lomas piedāvātajā ietvarā paliek nemainīgas, savukārt konkrēto skaitļošanas īstenojumu var pielāgot atkarībā no mērījumu konfigurācijas, signālu raksturlielumiem un lietojuma ierobežojumiem. Tālāk aprakstītās skaitļošanas procedūras tiek izmantotas, lai kvantificētu *MTRIF-AMR* ietvara degradācijas jutīgo reakciju; galvenā zinātniskā novitāte ir integrētajā diagnostikas metodoloģijā, nevis konkrētajās skaitļošanas formulācijās.

5.1. Signālu apstrāde un *RCR* novērtēšana pa atsevišķām asīm

- Pastāvīgās komponentes noņemšana. Konstantās komponentes tiek nomāktas, lai novērstu ar gravitāciju saistītas nobīdes:

$$\mathrm{s_{dc}} = \mathrm{s} - \bar{\mathrm{s}}. \tag{5.1}$$

- Normalizācija. *AMR* pāra signāli tiek mērogoti ar to kopīgo maksimālo absolūto amplitūdu:

$$\mathrm{s_n} = \mathrm{s_{dc}}/\mathrm{A}. \tag{5.2}$$

- Joslas caurlaides filtrēšana. Signāli tiek ierobežoti mērķa frekvenču diapazonā:

$$\mathrm{s_{bpf}} = \mathrm{B}(\mathrm{s_n}). \tag{5.3}$$

- Punktveida reizināšana. Tiek ģenerēts punktveida reizinājuma signāls p:

$$\mathrm{p} = \mathrm{s}_{\mathrm{Near}}^{\mathrm{bpf}} \cdot \mathrm{s}_{\mathrm{Far}}^{\mathrm{bpf}}. \tag{5.4}$$

- *RCR* iegūšana. Ass galīgais skalārais indikators ir produkta signāla maksimuma un *RMS* attiecība:

$$\mathrm{RCR} = \max|\mathrm{p}|\,/\mathrm{RMS}(\mathrm{p}). \tag{5.5}$$

Mainīgie, kas izmantoti 5.1.–5.5. vienādojumos, ir šādi: s – ierakstītais signāls; $\bar{\mathrm{s}}$ – signāla vidējā vērtība; $\mathrm{s_{dc}}$ – signāls pēc nobīdes korekcijas; A – normalizācijas koeficients; $\mathrm{s_n}$ – normalizēts signāls; B – joslas caurlaides filtrēšanas operators; $\mathrm{s_{bpf}}$ – filtrēts signāls; p – punktveida reizinājuma signāls; *RMS* – vidējās kvadrātiskās vērtības operators.

Visi signāli tiek apstrādāti rekonstruētajā kopīgajā galvenajā laika bāzē.

5.2. *MCCM* aprēķins

Pēc *RCR* vērtību aprēķināšanas X, Y un Z AMR pāriem tās tiek apvienotas daudzasu komponentu koherences metrikā (*MCCM*). Šajā īstenojumā *MCCM* tiek aprēķināta kā trīs pa atsevišķām asīm iegūto *RCR* komponentu Eiklīda norma:

$$MCCM = \sqrt{RCR_x^2 + RCR_y^2 + RCR_z^2}, \tag{5.6}$$

kur RCR_x, RCR_y un RCR_z – reakcijas koherences attiecības vērtības, kas iegūtas no atbilstošajiem X, Y un Z *AMR* pāriem.

Šī apvienošana samazina no ass atkarīgu izkliedi un nodrošina stabilu konstrukciju savienojuma integritātes mēru, kas balstīts trīsasu dinamikā. Eiklīda normas izmantošana ļauj saglabāt visu trīs asu ieguldījumu, neieviešot iepriekš noteiktus svēruma koeficientus vai pieņēmumus par atsevišķu asu relatīvo jutību.

Aprēķins tiek veikts neatkarīgi katram degradācijas posmam un atkārtoto mērījumu datu kopā – katram mērījumu ciklam. Tādējādi katru pievilkšanas momenta līmeni raksturo viena *MCCM* vērtība katrā atkārtojumā. Šāda aprēķina struktūra ļauj novērtēt gan apvienotās metrikas degradācijas tendenci, gan tās atkārtojamību starp mērījumu cikliem.

6. NODAĻA. METRIKU NOVĒRTĒŠANAS REZULTĀTI

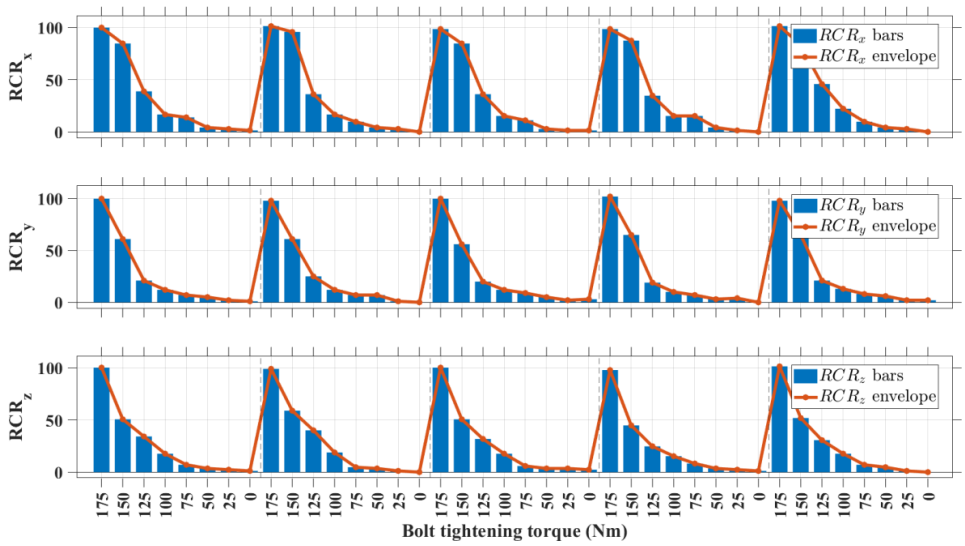
Šajā nodaļā sniegti kvantitatīvie rezultāti, kas iegūti piecos atkārtotos mērījumu un degradācijas ciklos astoņos pievilkšanas momenta līmeņos. Savienojuma degradācija tika imitēta, samazinot pievilkšanas momentu no 175 N·m līdz 0 N·m. Atkārtotā datu kopa ietvēra 240 reakcijas signālus, kas atbilda 120 *AMR* pāriem. *RCR* tika aprēķināta neatkarīgi katrai asij, katram pievilkšanas momenta līmenim un katram atkārtojumam, bet iegūtās vērtības tika apvienotas *MCCM* vērtībā katram degradācijas stāvoklim.

Atkārtotie cikli ļauj novērtēt monotonu degradācijas tendenci, metriku atkārtojamību un izkliedi. Rezultāti ir izklāstīti kā *RCR* tendences pa atsevišķām asīm, apvienotās *MCCM* izmaiņas un standartnovirzē balstīta stabilitātes analīze.

6.1. *RCR* atkārtojamība pa atsevišķām asīm piecos mērījumu ciklos

Katras ass *RCR* rezultāti redzami 6.1. attēlā. Visas vērtības ir normalizētas pret katra atkārtojuma bāzes stāvokli, kas atbilst 175 N·m pievilkšanas momentam. Visos ciklos augstākās *RCR* vērtības iegūtas bāzes stāvoklī, savukārt pakāpeniska pievilkšanas momenta samazināšana izraisa skaidru koherences kritumu visos trīs *AMR* pāros.

Atkārtotie cikli rāda reproducējamu degradācijas tendenci, tomēr X, Y un Z komponentes atšķiras pēc krituma rakstura un izkliedes. Tas atspoguļo anizotropu viļņu pārnesi caur savienojumu un no virziena atkarīgu jutību pret skrūves atslābumu. Tādēļ vienas ass interpretācija ir jutīga pret asij specifisku mainīgumu, savukārt visu trīs *RCR* komponentu saglabāšana nodrošina pilnīgāku savienojuma stāvokļa raksturojumu.

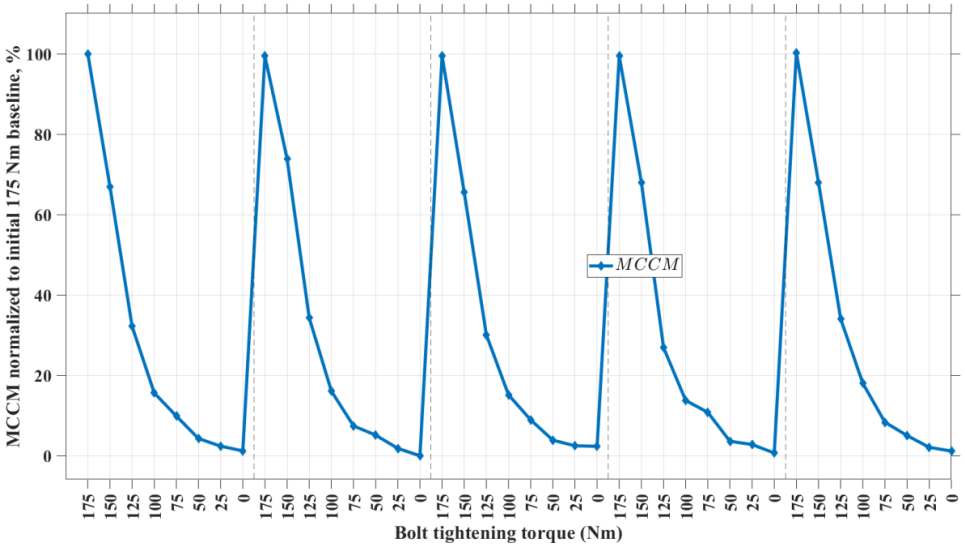


6.1. att. Katras ass *RCR* vērtības.

6.2. *MCCM* atkārtojamība un degradācijas tendence

Apvienotie *MCCM* rezultāti redzami 6.2. attēlā. Visas vērtības ir normalizētas pret katra atkārtojuma sākotnējo bāzes stāvokli, kas atbilst 175 N·m pievilkšanas momentam. Salīdzinot ar atsevišķām *RCR* komponentēm, *MCCM* nodrošina kompaktāku un vieglāk interpretējamu degradācijas profilu. Visos piecos atkārtotajos mērījumu ciklos *MCCM* konsekventi samazinās no bāzes stāvokļa līdz pilnībā atslābinātam stāvoklim pie 0 N·m.

Atkārtotā *MCCM* tendence apstiprina, ka apvienotā metrika saglabā pret degradāciju jutīgo informāciju, kas ietverta trīs *AMR* pāros, vienlaikus samazinot no ass atkarīgu mainīgumu. Monotons vai gandrīz monotons samazinājums katrā atkārtojumā pamato *MCCM* izmantošanu kā primāro skalāro indikatoru savienojuma stāvokļa izsekošanai. Vienlaikus atsevišķās *RCR* komponentes saglabā nozīmi virzieniskai interpretācijai un palīdz noteikt, kuras reakcijas asis visvairāk ietekmē savienojuma stinguma izmaiņas.



6.2. att. *MCCM* vērtības.

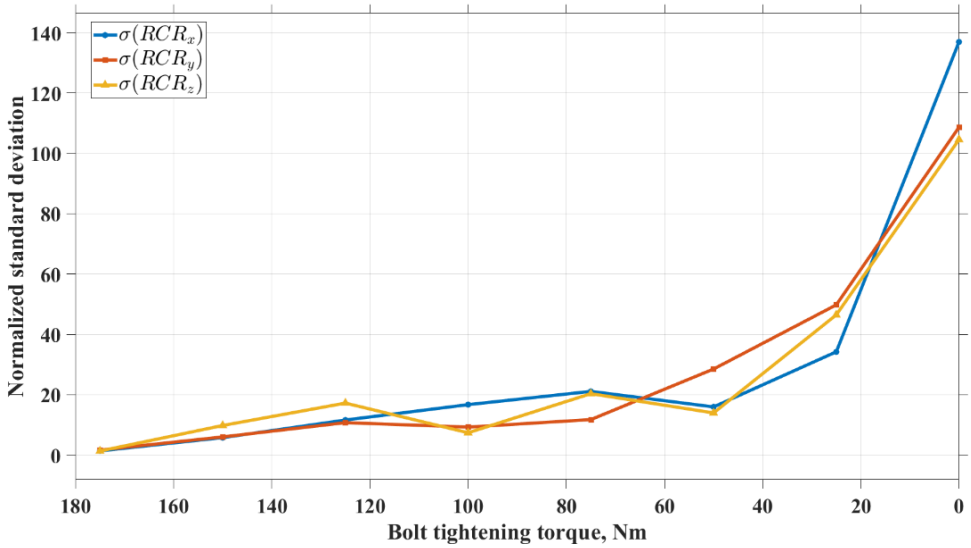
6.3. *RCR* un *MCCM* izkliedes analīze

Katras ass *RCR* vērtību standartnovirzes piecos atkārtojumos redzamas 6.3. attēlā. Izkliede ir neliela pie pilnībā pievilkta bāzes stāvokļa un palielinās, samazinoties skrūves pievilkšanas momentam. Šis pieaugums ir īpaši izteikts pie zemiem pievilkšanas momenta līmeņiem, kur savienojuma saskarne kļūst mehāniski mazāk ierobežota un jutīgāka pret nelielām kontakta stāvokļa, berzes un lokālo robežnosacījumu izmaiņām.

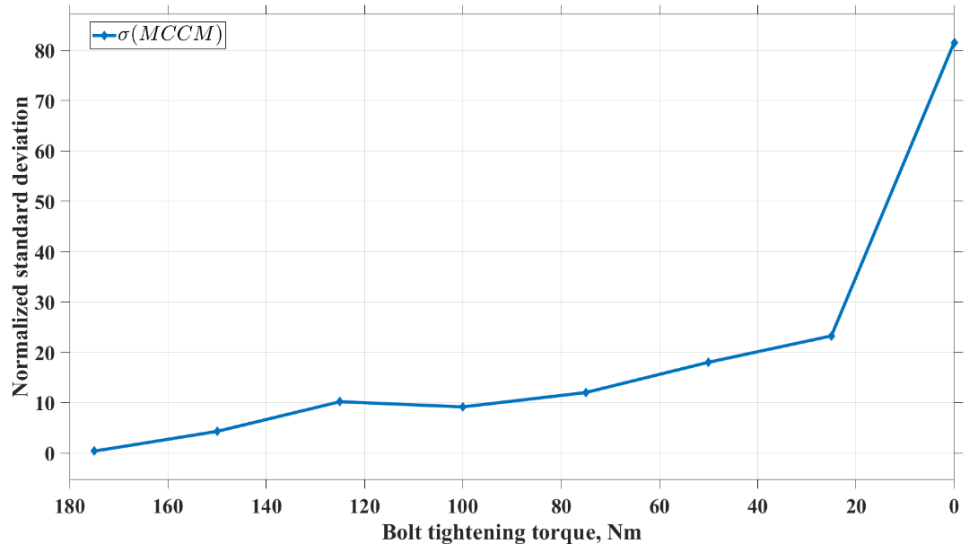
MCCM standartnovirze redzama 6.4. attēlā. Lai gan arī apvienotās metrikas izkliede palielinās, tuvojoties atslābinātam stāvoklim, tās mainīgums saglabājas zemāks un kompaktāks nekā maksimālā izkliede, kas novērota atsevišķām *RCR* asīm. Tas apstiprina, ka *MCCM* apvienošanas procedūra samazina daļu no ass atkarīgā mainīguma, vienlaikus saglabājot kopējo degradācijas tendenci.

Tiešs vidējās *RCR* izkliedes pa atsevišķām asīm, maksimālās *RCR* izkliedes pa atsevišķām asīm un *MCCM* izkliedes salīdzinājums redzams 6.5. attēlā. Apvienotās *MCCM* standartnovirze degradācijas secībā saglabājas zemāka par maksimālo atsevišķas ass standartnovirzi, parādot,

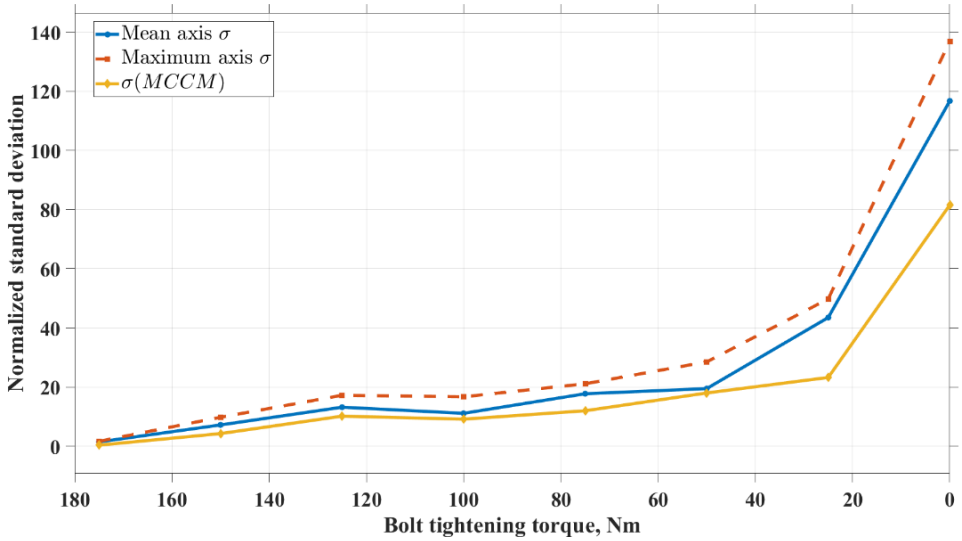
ka daudzasu apvienošana uzlabo diagnostiskā indikatora stabilitāti. Izkliedes pieaugums pie zemiem pievilkšanas momenta līmeņiem nav interpretējams kā metodes kļūme; tas drīzāk atspoguļo fiziski nestabilu atslābināta skrūvsavienojuma kontakta stāvokli, kur nelielas saskarnes stāvokļa izmaiņas var izraisīt lielākas izmērītās dinamiskās reakcijas izmaiņas.



6.3. att. Katras ass *RCR* standartnovirze.



6.4. att. *MCCM* standartnovirze.



6.5. att. *RCR* un *MCCM* izkliedes salīdzinājums.

7. NODAĻA. NOSLĒGUMA PIEZĪMES

Šajā nodaļā apkopoti galvenie darba rezultāti, sniegtas praktiskas ieviešanas vadlīnijas un iezīmēti turpmākie diagnostikas ietvara attīstības virzieni.

7.1. Galvenie secinājumi

Šajā promocijas darbā izstrādāts un eksperimentāli validēts daudzdimensionāls ietvars konstrukciju savienojumu nesagraujošai novērtēšanai. Rezultāti apstiprina pamatnostādni, ka uzticama savienojumu diagnostika būtiski iegūst no daudzdimensionālas pieejas, kas ietver gan kontrolētu ierosinājumu, gan daudzasu reakcijas novērtēšanu.

1. *3DOF* mērīšana un *AMR*. Rezultāti apstiprina, ka trīs lineārā paātrinājuma *AMR* pāri ietver diagnostiski nozīmīgu koherences informāciju. Bāzes datu kopā ar degradāciju saistītas izmaiņas bija novērojamas visos trīs pāros, nodrošinot visaptverošu priekšstatu par savienojuma integritāti.
2. *MTRIF* īstenošana. Galvenais ieguldījums ir *MTRIF* formulēšana, kas sintezē daudzasu ierosinājuma nosacījumu tuvējā sensora atrašanās vietā. Tas uzlabo ar degradāciju saistīto izmaiņu novērojamību vairākās reakcijas komponentēs salīdzinājumā ar tradicionālu vienas ass ierosinājumu.
3. Metriku veiktspēja. Pa atsevišķām asīm *RCR* efektīvi kvantitatīvi raksturo viļņformas līdzību starp tuvējā un attālā sensora reakcijām. Apvienotajā līmenī *MCCM* nodrošina stabilu un interpretējamu indikatoru, samazinot no ass atkarīgu izkliedi un uzrādot monotonu degradācijas tendenci. Piecos atkārtotos mērījumu ciklos *MCCM* saglabāja konsekventu degradācijas tendenci un uzrādīja zemāku izkliedi nekā mainīgākā atsevišķā *RCR* komponente, tādējādi pamatojot tās izmantošanu kā primāro skalāro indikatoru savienojuma stāvokļa izsekošanai.
4. Sinhronizācijas pamatojums. Pētījums parāda, ka laika sinhronizācija ir metodoloģisks priekšnoteikums. Gan *MTRIF*, gan punktveida *RCR* salīdzinājumi ir atkarīgi no nepārtrauktas paraugu līmeņa salāgošanas, tāpēc *CNSS* princips ir obligāts, lai neatkarīgos mezglos uzturētu kopīgu galveno laika bāzi.
5. Integrētais ietvars. Promocijas darbs sniedz eksperimentāli pamatotu metodoloģiju, kas apvieno daudzdimensionālu ierosinājumu, pārotu *3DOF* mērīšanu, katras ass koherences novērtēšanu un metriku apvienošanu. Šī pieeja attīsta konstrukciju strukturālā stāvokļa monitoringu lokalizētas, atkārtojamas un daudzasu konstrukciju savienojumu integritātes novērtēšanas virzienā. Pašreizējās eksperimentālās validācijas ierobežojumi un to ietekme uz vispārināmību aplūkoti 7.4. apakšnodaļā.

7.2. Praktiskie ieteikumi

- Sensoru salāgošana. Tuvējais un attālais sensors ir fiziski jāsalāgo gar to atbilstošajām asīm, nodrošinot drošu mehānisko stiprinājumu. Tas ir nepieciešams, lai saglabātu trīs lineārā paātrinājuma *AMR* pāru derīgumu punktveida salīdzinājumam [14].
- Ierosinājuma konfigurācija. Aktuatoru izvietojums jānosaka atbilstoši nepieciešamajam diagnostikas pārklājumam. Lai gan trīs aktuatoru konfigurācija

gar X, Y un Z asīm ir pietiekama trīsasu lineārai jutībai, sarežģītas rotācijas saistes gadījumā var būt nepieciešamas alternatīvas konfigurācijas vai papildu aktuatori.

- Sinhronizācijas nepārtrauktība. Nepārtraukta paraugu līmeņa salāgošana starp ierosinājuma un mērījumu apakšsistēmām ir obligāta. Bez galvenās laika bāzes konsekvences *MTRIF* fokusēšana un *RCR* novērtēšana zaudē diagnostisko uzticamību [31–33].
- Signālu vidējošana. Atkārtota ierosināšana un vidējošana ir ieteicama, lai nomāktu nekorelētu troksni un stabilizētu *RCR* un *MCCM* vērtības [14, 15, 27]. Augstas frekvences daudzasu datu ieguve ģenerē ievērojamas datu plūsmas, tādēļ ir nepieciešama robusta datu apstrāde un marķēšana.
- Diagnostiskie indikatori. *MCCM* jāizmanto kā primārais skalārais indikators savienojuma stāvokļa izsekošanai. Individuālās *RCR* vērtības jāsaglabā virzieniskai diagnostiskai interpretācijai, ja nepieciešama detalizēta pa asīm specifiskas degradācijas analīze [12, 14, 15].

7.3. Turpmākā attīstība

Balstoties iegūtajos rezultātos un ņemot vērā 7.4. apakšnodaļā apspriestos ierobežojumus, turpmākajā darbā jāattīsta vairāki tehniskie virzieni.

- Automatizēta asu salāgošana. Orientācijā balstītu koordinātu sistēmas transformāciju ieviešana, lai matemātiski kompensētu fizisku sensoru nesalāgojumu.
- Adaptīvs *MTRIF*. Reāllaika pārneses funkcijas novērtēšanas izstrāde, lai optimizētu virtuālā trieciena fokusu mainīgos vides apstākļos.
- Decentralizēta sinhronizācija. *CNSS* protokola paplašināšana liela mēroga sensoru tīkliem, izmantojot bezvadu laika sinhronizāciju vai precīzā laika protokolā (*Precision Time Protocol*, *PTP*) balstītu laika sadali.
- Nelineāru pazīmju izvilkšana. Augstāku kārtu statistisko raksturlielumu integrēšana *MCCM* apvienošanas procedūrā, lai uzlabotu jutību pret mikroplaisu iniciāciju.
- Skaitļošana mērījumu mezglā. *RCR* un *MCCM* algoritmu pārnešana tieši uz *FPGA*, lai nodrošinātu savienojuma integritātes monitoringu reāllaikā mērījumu mezgla līmenī.

7.4. Pašreizējā pētījuma ierobežojumi

Lai sniegtu precīzu pašreizējā ietvara stāvokļa novērtējumu un vadītu turpmāko attīstību, jāņem vērā vairāki šī darba ierobežojumi.

Viena bāzes savienojuma konfigurācija. Integrētais ietvars ir validēts vienā tērauda konstrukciju savienojumā (*HEA 100* sijas ar vienu *M16* skrūvi). Lai gan agrākie eksperimentālie objekti no pievienotajām publikācijām, tostarp koka konstrukciju savienojumi [15] un alternatīvas tērauda konfigurācijas [12–14], sniedz papildu pierādījumus atsevišķām metodoloģiskajām komponentēm, pilna *MTRIF*-*AMR*-*CNSS* ķēde ir demonstrēta vienai savienojuma ģeometrijai, materiālam un savienojuma tipam. Tas, cik lielā mērā novērotās *MCCM* tendences ir vispārināmas uz citiem savienojumu tipiem (kniedētiem, līmētiem, kompozītmateriālu savienojumiem), materiāliem, stiprinājumu skaitu vai reāliem

robežnosacījumiem, vēl jānosaka sistemātiskā validācijas kampaņā, kas aptver vairākas savienojumu konfigurācijas.

Degradācijas imitācijas tvērums. Degradācijas secība ietver kontrolētu skrūves pievilkšanas momenta samazināšanu, kas imitē stinguma zudumu atslābinātu stiprinājumu dēļ. Lai gan tā ir plaši izmantota un atkārtojama pieeja *SHM* pētījumos, tā pārstāv tikai vienu degradācijas veidu. Reāla konstrukciju savienojumu degradācija ietver noguruma plaisas, koroziju, atslāņošanos un plastisku deformāciju, no kurām katra atšķirīgi maina savienojuma dinamisko uzvedību. Tas, cik lielā mērā *MCCM* reaģē uz šiem alternatīvajiem bojājumu mehānismiem un vai pievilkšanas momenta samazināšanas gadījumā novērotā monotonā tendence saglabājas arī citos degradācijas režīmos, prasa mērķtiecīgu eksperimentālu izpēti.

Statistiskā raksturojuma tvērums. Pašreizējā validācija ietver piecus atkārtotus mērījumu ciklus tai pašai bāzes savienojuma konfigurācijai, kas ļauj sākotnēji novērtēt *RCR* un *MCCM* atkārtojamību, izmantojot standartnovirzes. Tomēr šie atkārtojumi tika veikti vienam paraugam un kontrolētos laboratorijas apstākļos. Tādēļ statistiskais raksturojums joprojām ir ierobežots attiecībā uz paraugu savstarpējo mainīgumu, alternatīvām savienojumu ģeometrijām, atšķirīgiem stiprinājumu izvietojumiem un dažādiem degradācijas mehānismiem. Turpmākajos pētījumos atkārtoto ciklu analīze jāpaplašina, izmantojot vairākus paraugus un dažādus ekspluatācijas apstākļus, kā arī jāiekļauj ticamības intervāli un formāla monotonitātes pārbaude.

Jutība pret neideāliem apstākļiem. Pašreizējā validācija tika veikta kontrolētos laboratorijas apstākļos ar rūpīgu sensoru salāgošanu, stabilu temperatūru un bez ārējas slodzes. Ietvara jutība pret praktiskām novirzēm, piemēram, sensoru nesalāgotību par vairākiem grādiem, daļēju aktuatora atteici, vides temperatūras izmaiņām mērījuma laikā vai ārēju ekspluatācijas slodžu klātbūtni, vēl nav sistemātiski raksturota. Lai gan $\lambda/4$ kritērijs (2.3. apakšnodaļa) sniedz teorētiskas robežas, eksperimentāls parametriskais robustuma pētījums neideālos apstākļos būtiski palielinātu pārliecību par ietvara piemērojamību lauka apstākļos.

Šie ierobežojumi nemazina promocijas darba metodoloģisko ieguldījumu, kas saistīts ar integrētā *MTRIF-AMR-CNSS* ietvara formalizēšanu un sākotnējo eksperimentālo validāciju. Tomēr tie nosaka skaidru virzienu sistemātiskai validācijai un robustuma raksturošanai, kas nepieciešama, pirms metodoloģiju var uzskatīt par gatavu praktiskai ieviešanai.

PATEICĪBA

Sirsnīgs paldies visiem, kuri sniedza ieguldījumu šī pētījuma sekmīgā īstenošanā!

Vispirms vēlos pateikties saviem studentiem Aleksandram Mjakiševam, Aleksim Kurajevam un Andrejam Macevičam, kuri aktīvi piedalījās eksperimentālajā darbā un sekmīgi aizstāvēja savus maģistra darbus. Viņu iesaiste, precizitāte un tehniskais ieguldījums bija būtiski šajā darbā aprakstīto galveno mērījumu veikšanai.

Īpaša pateicība Dmitrijam Serdjukam, Latvijas Zinātnes padomes projekta "Koaksiālo paātrinājumu korelācijas metode konstrukciju savienojumu kvalitātes novērtēšanai 6D telpā" ("*COACCEL*", Nr. lzp-2020/1-0240) vadītājam, par pastāvīgu atbalstu un iedrošinājumu visā projekta gaitā.

Vēlos izteikt sirsnīgu pateicību arī profesoram Aleksandram Sutinam un profesoram Armenam Sarvazjanam par iepazīstināšanu ar aizraujošo laika reversijas akustikas pasauli mana darba laikā *Artann Laboratories* Amerikas Savienotajās Valstīs. Viņu idejas, iedvesma un zinātniskais piemērs ilgstoši ietekmēja manu pētniecības virzienu un paplašināja izpratni par šīs jomas iespējām.

Esmu īpaši pateicīgs saviem promocijas darba vadītājiem Jevgenijam Barkanovam, ERAF projekta "Konvencionālo pultrūzijas procesu efektivitātes uzlabošana" (projekta ID Nr. 1.1.1.1/18/A/053) vadošajam pētniekam; šajā projektā piedalījos doktorantūras studiju laikā, un Aleksejam Tatarinovam, kuru iedrošinājums un vadība bija izšķiroši manā lēmumā atsākt un pabeigt doktorantūras studijas. Viņu atbalsts pavēra iespējas pētniecībai, kas vienlaikus bija gan izaicinoša, gan iedvesmojoša.

Vislielāko pateicību vēlos izteikt savai ģimenei par nelokāmo atbalstu visa šī ceļa laikā – sievai Karinai par iedrošinājumu un sapratni, kas palīdzēja turpināt darbu brīžos, kad biju gatavs apstāties, un dēliem Nikitam un Matvejam, kuri piedzima šī pētījuma laikā un kuri, iespējams, paši to neapzinoties, deva man laiku un telpu, lai šo darbu īstenotu.

Noslēgumā – paldies visiem cilvēkiem, kuri piedalījās eksperimentos un sniedza ieguldījumu šī darba attīstībā!

LITERATŪRAS SARAKSTS

[1] Tol S, Özgüven HN. Dynamic characterization of bolted joints using FRF decoupling and optimization. Mech Syst Signal Process. 2015; 54–55:124–138. doi:10.1016/j.ymssp.2014.08.005.

[2] Zhan J, Zhang F, Siahkouhi M. A step-by-step damage identification method based on frequency response function and cross signature assurance criterion. Sensors. 2021; 21 (4):1029. doi:10.3390/s21041029.

[3] Yang B, Xuan FZ, Xiang Y, Li D, Zhu W, Tang X, et al. Lamb wave-based structural health monitoring on composite bolted joints under tensile load. Materials. 2017; 10 (6):652. doi:10.3390/ma10060652.

[4] Rucka M. Monitoring steel bolted joints during a monotonic tensile test using linear and nonlinear Lamb wave methods: a feasibility study. Metals. 2018; 8 (9):683. doi:10.3390/met8090683.

[5] Xu J, Wang C, Li H, Zhang C, Hao J, Fan S. Health monitoring of bolted spherical joint connection based on active sensing technique using piezoceramic transducers. Sensors. 2018; 18 (6):1727. doi:10.3390/s18061727.

[6] Zhang M, Tang Z, Yun CB, Sui X, Chen J, Duan Y. Bolt looseness detection using SH guided wave and wave energy transmission. Smart Mater Struct. 2021; 30 (10):105015. doi:10.1088/1361-665X/ac1d90.

[7] Stolze FHG, Worden K, Manson G, Staszewski WJ. Fatigue-crack detection in a multi-riveted strap-joint aluminium aircraft panel using amplitude characteristics of diffuse Lamb wave field. Materials. 2023; 16 (4):1619. doi:10.3390/ma16041619.

[8] Liang Y, Feng Q, Li D, Cai S. Loosening monitoring of a threaded pipe connection using the electromechanical impedance technique – experimental and numerical studies. Sensors. 2018; 18(11):3699. doi:10.3390/s18113699.

[9] Zhu J, Qing X, Liu Q, Liu X, Wang Y. Monitoring of fiber-reinforced composite single-lap joint with electromechanical impedance of piezoelectric transducer. Materials. 2019; 12 (19):3241. doi:10.3390/ma12193241.

[10] Caldwell SP, Radford DW. Composite single lap shear joint integrity monitoring via embedded electromechanical impedance sensors. J Compos Sci. 2023; 7 (2):53. doi:10.3390/jcs7020053.

[11] Caldwell SP, Radford DW. The health monitoring of bonded composite joints using both thickness and radial impedance resonance responses. Sensors. 2024; 24 (8):2508. doi:10.3390/s24082508.

[12] Serdjuks D, Kurtenoks V, Tatarinovs A, Mironovs V, Lapkovskis V, Buka-Vaivade K, Macevics A, Topcijs K, Vilnitis M. Method of coaxial accelerations correlation for quality assessment of structural joints. Procedia Struct. Integr. 2022; 37:547–554. doi:10.1016/j.prostr.2022.01.121.

[13] Serdjuks D, Kurtenoks V, Tatarinovs A, Buka-Vaivade K, Lapkovskis V, Mironovs V, Podkoritovs A, Topcijs K. Non-model vibration analysis method for health monitoring of structural joints. Procedia Struct. Integr. 2022; 37:555–562. doi:10.1016/j.prostr.2022.01.122.

[14] Buka-Vaivade K, Kurtenoks V, Serdjuks D. Non-destructive damage detection of structural joint by coaxial correlation method in 6D space. Buildings. 2023; 13 (5):1151. doi:10.3390/buildings13051151.

[15] Kurtenoks V, Kurajevs A, Buka-Vaivade K, Serdjuks D, Lapkovskis V, Mironovs V, Podkoritovs A, Vilnitis M. The quality assessment of timber structural joints using the coaxial correlation method. Buildings. 2023; 13 (8):1929. doi:10.3390/buildings13081929.

[16] Muttillo M, Stornelli V, Alaggio R, Paolucci R, Di Battista L, de Rubeis T, et al. Structural health monitoring: an IoT sensor system for structural damage indicator evaluation. Sensors. 2020; 20 (17):4908. doi:10.3390/s20174908.

[17] Murray-Bergquist L, Bernauer F, Igel H. Characterization of six-degree-of-freedom sensors for building health monitoring. Sensors. 2021; 21 (11):3732. doi:10.3390/s21113732.

[18] Fink M. Time reversal of ultrasonic fields. I. Basic principles. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control. 1992; 39 (5):555–566. doi:10.1109/58.156174.

[19] Zeng L, Lin J, Huang L. A modified Lamb wave time-reversal method for health monitoring of composite structures. Sensors. 2017; 17 (5):955. doi:10.3390/s17050955.

[20] Du F, Xu C, Wu G, Zhang J. Preload monitoring of bolted L-shaped lap joints using virtual time reversal method. Sensors. 2018; 18 (6):1928. doi:10.3390/s18061928.

[21] Liang Y, Feng Q, Li D. Loosening monitoring of the threaded pipe connection using time reversal technique and piezoceramic transducers. Sensors. 2018; 18 (7):2280. doi:10.3390/s18072280.

[22] Xu C, Wu G, Du F, Zhu W, Mahdavi SH. A modified time reversal method for guided wave-based bolt loosening monitoring in a lap joint. J Nondestruct Eval. 2019; 38:85. doi:10.1007/s10921-019-0626-1.

[23] Du F, Xu C, Zhang J. A bolt preload monitoring method based on the refocusing capability of virtual time reversal. Struct Control Health Monit. 2019; 26 (8):e2370. doi:10.1002/stc.2370.

[24] Wang F, Song G. Bolt early looseness monitoring using modified vibro-acoustic modulation by time-reversal. Mech Syst Signal Process. 2019; 130:349–360. doi:10.1016/j.ymssp.2019.04.036.

[25] Panagiotopoulos CG, Stavroulakis GE. A numerical study on computational time reversal for structural health monitoring. Signals. 2021; 2 (2):225–244. doi:10.3390/signals2020017.

[26] Sutin A, Kurtenoks V, Sabatier J, Burgett R, O'Neil M, Aranchuk S, et al. Time-reversal acoustic focusing of waves produced by seismic vibrators. J Acoust Soc Am. 2006; 120 (5 Suppl):3369.

[27] Sutin A, Libbey B, Kurtenoks V, Fenneman D, Sarvazyan A. Nonlinear detection of land mines using wide bandwidth time-reversal techniques. Proc. SPIE 6217, 62171B (2006). doi:10.1117/12.673714.

[28] Fillinger L, Kurtenoks V, Rosenblum S, Sutin A, Sarvazyan A. Flexible tools for time reversal acoustics focusing applications. J Acoust Soc Am. 2007; 122 (5 Suppl):3009. doi:10.1121/1.2942748.

[29] Fillinger L, Kurtenoks V, Lewis G Jr, Sutin A, Sarvazyan A. Time-reversal ultrasound system for enhanced drug delivery in the rat brain. In: Abstracts of the 9th International Symposium on Therapeutic Ultrasound; 2009 Sep; Aix-en-Provence, France. p. 105.

[30] Fu H, Sharif Khodaei Z, Aliabadi MHF. An event-triggered energy-efficient wireless structural health monitoring system for impact detection in composite airframes. IEEE Internet Things J. 2019; 6 (1):1183–1192. doi:10.1109/JIOT.2018.2867722.

[31] Smetskaja V, Litvinenko A, Kurtenoks V, Stepanovs V, Lapkovskis V, Bespal'ko V. Study on thermal stability of multi-channel picosecond precise time-tagging system. In: 2023 IEEE 10th Jubilee Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE). 2023; 87–90. doi:10.1109/AIEEE58915.2023.10134855.

[32] Lapkovskis V, Litvinenko A, Kurtenoks V, Stepanovs V, Smetska V, Bespal'ko V. Multi-channel synchronization for picosecond time-tagging system. In: 2023 IEEE 10th Jubilee Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE). 2023; 81–86. doi:10.1109/AIEEE58915.2023.10134773.

[33] Bespal'ko V, Litvinenko A, Stepanovs V, Kurtenoks V, Smetska V, Lapkovskis V. Compensation of Accuracy Error for Time Interval Measurements. Latvian J Phys Tech Sci. 2024; 61 (1):43–51. doi:10.2478/lpts-2024-0005.



Viktors Kurtenoks dzimis 1969. gadā Tukumā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis bakalaura (1991) un maģistra grādu (1992) datortehnikā. No 2001. līdz 2008. gadam strādājis par vecāko programmatūras, aparatūras un iegultās programmatūras izstrādātāju uzņēmumā *"Artann Laboratories"* (Trentona, ASV). Patlaban ir SIA *"Eventech"* – vienas no vadošajām notikumu taimeru un laika marķētāju izstrādes kompānijām – tehniskais direktors, kā arī savu uzņēmumu – SIA *"Digits"* un SIA *"Juvitek"* – tehniskais direktors un pilna izstrādes cikla vadītājs; strādā arī RTU.
Kompetence – pilna produktu izstrāde no idejas līdz funkcionējošai iekārtai, ātrdarbīga ciparu, analogā un jauktu signālu elektronika, ātrdarbīgas integrālās shēmas (*ADC*, *DAC*, atmiņa), *DSP*, mikrokontrolieri, *FPGA/CPLD* projektēšana *VHDL* valodā.