

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte  
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts  
Elektrisko mašīnu un aparātu katedra

**Jānis Mārks**

Doktora studiju programmas “Enerģētika un elektrotehnika” doktorants

**VIBRĀCIJU MODELIS MEHĀNISKO DEFEKTU  
NOTEIKŠANAI LIELJAUDAS  
TRANSFORMATORU AKTĪVAJĀ DAĻĀ**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskā vadītāja  
profesore *Dr. sc. ing.*  
SANDRA VĪTOLIŅA

RTU Izdevniecība  
Rīga 2019

Mārks, J. Vibrāciju modelis mehānisko defektu noteikšanai lieljaudas transformatoru aktīvajā daļā. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2019. 37 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-14" 2019. gada 23. oktobra lēmumu, protokols Nr. 2019-2 (70).

**ISBN 978-9934-22-419-5 (print)**

**978-9934-22-420-1 (pdf)**

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2019. gada 19. decembrī, plkst. 11 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12 k-1, 212. auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Jānis Dirba,  
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Vadošā pētniece *Dr. sc. ing.* Svetlana Orlova,  
Fizikālās enerģētikas institūts, Latvija

Asociētais profesors *Dr.-El. Eng. Nick Papanukolaou,*  
*Democritus University of Thrace, Grieķija*

## APSTIPRINĀJUMS

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

Jānis Mārks ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, septiņas nodaļas, secinājumi, literatūras sarakstu, 59 attēli, 33 tabulas, kopā 117 lappušu. Literatūras sarakstā ir 103 nosaukumi.

# SATURS

IEVADS .....	5
Tēmas aktualitāte.....	5
Darba mērķis un uzdevumi .....	5
Darba zinātniskā novitāte .....	6
Darba praktiskā nozīme.....	6
Pētījuma līdzekļi un metodes .....	7
Darba aprobācija .....	7
Autora publikācijas .....	7
1. LIELJAUDAS TRANSFORMATORU MEHĀNISKIE DEFEKTI UN TO NOTEIKŠANAS IESPĒJAS .....	9
1.1. Izklāsts par lieljaudas transformatoru mehāniskajiem defektiem.....	9
1.2. Diagnostikas metožu izvērtējums mehānisko defektu noteikšanai .....	10
1.3. Transformatora radīto vibrāciju mērījumi un rezultātu izvērtēšana .....	10
2. TRANSFORMATORA VIBRĀCIJU MODELIS MEHĀNISKO DEFEKTU NOTEIKŠANAI .....	12
3. VIBRĀCIJU MĒRĪJUMU DATU APROKSIMĀCIJA UN VIZUALIZĀCIJA.....	14
4. TRANSFORMATORA MAGNĒTISKĀ LAUKA RAKSTURLIELUMU UN ELEKTRODINAMISKO SPĒKU APRĒĶINĀŠANA.....	17
4.1. Transformatora magnētiskā lauka modelēšanas nepieciešamība .....	17
4.2. Transformatora magnētiskā lauka modeļa izveide .....	17
5. VIBRĀCIJU SIMULĀCIJA AR MASU UN ATSPERU SISTĒMĀM .....	19
5.1. Tinumu masu un atsperu sistēma.....	19
5.2. Magnētvasda masu un atsperu sistēma.....	20
5.3. Dinamisks ģenētiskais algoritms stinguma koeficientu noteikšanai masu un atsperu sistēmā .....	22
6. FAZILOGIKAS IZMANTOŠANA TRANSFORMATORA VIBRĀCIJU MODEĻA REZULTĀTU ĢENERĒŠANAI.....	23
7. TRANSFORMATORA VIBRĀCIJU MODEĻA REZULTĀTI .....	27
7.1. Aprēķina piemērs vienam transformatoram .....	27
7.2. Izstrādātā vibrāciju modeļa rezultāti.....	32
SECINĀJUMI .....	33
KOPSAVILKUMĀ IZMANTOTĀ LITERATŪRA .....	35

# IEVADS

## Tēmas aktualitāte

Lieljaudas transformatori ir nozīmīgi elektriskās sistēmas elementi. Tiem ir salīdzinoši sarežģīta konstrukcija un attiecīgi var rasties dažāda tipa bojājumi [15], kas var apdraudēt drošu transformatora un energosistēmas darbību, kā arī pats transformators var tikt neatgriezeniski bojāts.

Šo bojājumu cēloņi un atrašanās vietas ir atšķirīgas. Viens no iespējamo defektu veidiem ir mehāniskie defekti, kas izveidojas transformatora aktīvajā daļā. Brazīlijā veiktā pētījumā aktīvās daļas defekti bija cēlonis 30 % transformatoru atteicē [23]. *CIGRE* veiktā pētījumā pierādīts, ka no apskatītajām atteicēm 19 % gadījumos iemesls bija tinumi, 3 % – magnētvaids [21]. Savukārt Taizemē veiktā pārbaudē šie defekti bija 2,03 % no visām atteicēm [2]. Veiktā pētījuma [24] rezultējošā statistika par transformatoru defektu klasifikāciju norāda, ka Latvijas energosistēmā 1 % defektu cēloņu ir transformatora aktīvā daļa. Līdz ar to lieljaudas transformatoru aktīvās daļas defekti veido nozīmīgu daļu no kopējā atteicē skaita. To atklāšana ir svarīga, lai uzlabotu transformatoru drošumu.

Transformatora aktīvajā daļā mehāniskie defekti galvenokārt rodas elektrodinamisko spēku rezultātā tinumos un magnētiskajā serdē. Tos ir sarežģīti diagnosticēt, jo tie atrodas transformatora tvertnes iekšienē. Piekļuve tai ir apgrūtināta, jo ir nepieciešams transformatoru nogādāt remontā un izjaukt tā konstrukciju. Šis process ir sarežģīts, laukietilpīgs un traucē elektriskās sistēmas darbībai.

Viena no precīzākajām mehānisko defektu diagnostikas metodēm ir vibrodiagnostika, kas paredz vibrāciju raksturlielumu vērtību reģistrēšanu uz transformatora tvertnes virsmas un tālāku šīs informācijas apstrādi.

Pašlaik esošo metožu lietošana ir apgrūtināta, jo ar tām nav iespējams noteikt transformatora aktīvās daļas bojājuma atrašanās vietu, turklāt tās nesniedz rekomendācijas par turpmākām nepieciešamām darbībām ar pārbaudīto transformatoru. *SFRA* (*Sweep Frequency Response Analysis*) metode var noteikt transformatora struktūras un aktīvās daļas mehāniskās izmaiņas, bet tās tiek aprēķinātas, salīdzinot ar situāciju, kad defekts vēl nebija izveidojies [22]. Turklāt nav iespējams noteikt defekta atrašanās vietu precīzāk par atsevišķu transformatora fāzi [1]. Vibrodiagnostika ļauj uzzināt informāciju par transformatora radītajām vibrācijām uz tā tvertnes virsmas, kas ietver vibrāciju harmonikas, to individuālās amplitūdas un kopējo spektru un iegūst norādi par iespējamu mehānisko defektu [10]. Savukārt nav iespējams uzzināt informāciju par radītajām vibrācijām aktīvajā daļā, jo tai transformatora darbības laikā ar nepieciešamo vibrāciju sensoru nav iespējams piekļūt [18].

## Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir izveidot jaunu vibrāciju modeli lieljaudas transformatora tinumu un magnētvaids mehānisko defektu esamības un atrašanās vietas identificēšanai transformatora aktīvās daļas konstrukcijā un rekomendācijas formulēšanai par turpmāko diagnostiku.

Lai sasniegtu definēto mērķi, ir izpildīti vairāki uzdevumi.

1. Veikta zinātniskās literatūras analīze, lai pārliecinātos par izstrādātā vibrāciju modeļa novitāti un autentiskumu.
2. Izstrādāts telpisks ērti modificējams lieljaudas transformatora vibrāciju modelis mehānisko defektu noteikšanai.
3. Izstrādāts algoritms, kurā vibrāciju mērījumu rezultātu uz transformatora tvertnes aproksimācijai un vizualizācijai izmantoti Ņūtona polinomi.
4. Veikta transformatora trīsdimensionāla magnētiskā lauka modelēšana *COMSOL* vidē, lai noteiktu magnētiskā lauka indukciju un tangenciālo strāvas blīvumu dažādos režīmos tālākam elektrodinamisko spēku aprēķinam.
5. Izveidots masu un atsperu sistēmas matemātiskais modelis, aizstājot transformatora aktīvo daļu ar masu un atsperu sistēmu, lai simulētu magnetostrikcijas mehānisko spēku un elektrodinamisko spēku radītās vibrācijas.
6. Izveidots dinamisks ģenētisks algoritms, kas ir spējīgs veikt operācijas ar liela indivīdu skaita populācijām *Matlab* un *Matlab Simulink* vidēs, kas ir balstītas uz izveidoto masu un atsperu sistēmas matemātisko modeli, lietojot mutācijas un izmantojot melnās kastes principu, simulēts evolūcijas process un veikta modelēto rezultātu salīdzināšana ar mērījumiem realitātē.
7. Formulēti slēdzieni par transformatora aktīvās daļas mehāniskiem defektiem un dotas rekomendācijas par diagnostiku, izmantojot faziloģiku, lai būtu iespējams nonākt pie slēdziena pretrunīgu rezultātu gadījumos.

## **Darba zinātniskā novitāte**

Promocijas darbā izstrādātie inovatīvie risinājumi:

- transformatora vibrāciju modelis mehānisko defektu noteikšanai, kas ir balstīts uz melnās kastes paņēmiena un dinamiska ģenētiskā algoritma lietošanu,
- masu un atsperu sistēma, ar kuru ir iespējams modelēt elektrodinamisko spēku izraisītās vibrācijas transformatora tinumos un magnetostrikcijas efekta radītās vibrācijas transformatora magnētvdā,
- modificēta Ņūtona polinomu interpolācijas metode, kas paredzēta vibrāciju aproksimācijai, kurā novērsti vērtību lūzuma punkti.

## **Darba praktiskā nozīme**

Izstrādāto vibrāciju modeli var izmantot kā nākamo soli uzņemto vibrāciju mērījumu uz transformatora tvertnes rezultātu apstrādei un analīzei, kas ļauj:

- noteikt lieljaudas transformatoru aktīvās daļas iespējamus mehāniskos defektus, piemēram, lokālu tinumu deformāciju, lokālus īsslēgumus, tinumu deformācijas un magnētveda presējuma līmeņa samazināšanos u. c.;
- atrast mehānisko defektu novietojumu transformatora aktīvās daļas robežās;
- sniegt slēdzienu par turpmāku transformatora diagnostikas pārbaužu veikšanu.

## Pētījuma līdzekļi un metodes

Promocijas darba izstrādē ir izmantotas Ņūtona polinomu un spline datu aproksimācijas metodes. Transformatora magnētiskā lauka modeļa radīšanai ir izmantota galīgo elementu metode. Masu un atsperu sistēmas matemātiskā modeļa vajadzīgās konfigurācijas atrašanai ir izmantots dinamisks ģenētiskais algoritms. Matemātiskās operācijās ar liela skaita vienādojumu sistēmām ir izmantota matricu teorija. Datu vērtību aproksimācijai lielās daudzdimensiju matricās ir lietots tuvākā kaimiņa meklēšanas algoritms. Diferenciālvienādojumu atrisināšanai ir izmantota iterāciju metode ar konstantu soli.

Promocijas darbā ir izmantota *COMSOL* programmatūra, lai veiktu transformatora magnētiskā lauka indukcijas un strāvas blīvuma aprēķinus, *Matlab* programmatūra, lai konstruētu dinamisku ģenētisko algoritmu un lietotu aproksimācijas metodes, un *Matlab Simulink* programmatūra, lai veiktu diferenciālvienādojumu sistēmu aprēķinus.

## Darba aprobācija

1. Dynamic Genetic Algorithm in Model for Vibrations of Power Transformer Windings. *EPE 2018 10th International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*, Romania, Iasi, October 18–19, 2018.
2. Modelling of Vibrations Caused by Magnetostriction in Magnetic Core of Large Power Transformers. *The 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*, Latvia, Riga, October 12–13, 2017.
3. Magnetostriction Model of Large Power Transformer Magnetic Core. *The 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering*, Poland, Lodz, September 14–16, 2017.
4. Application of Vibration Measurements for Detection of Mechanical Faults in Power Transformers. *The 5th International Doctoral School of Energy Conversion and Saving Technologies*, Latvia, Ronisi, May 28–29, 2016.
5. Study of power transformer mechanical faults detection by using vibrodiagnostics. *The 13<sup>th</sup> International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI)*, Lithuanian Energy Institute, Lithuania, Kaunas, May 26–27, 2016.

## Autora publikācijas

1. **Marks J.**, Vitolina S., Dirba J. Magnetostrictive Vibration Model for Evaluation of Mechanical Integrity of Power Transformer Magnetic Core. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. Latvia, 2019, No. 3, ISSN 0868-8257, pp. 13–25. DOI: 10.2478/lpts-2019-0016 (iekļauts Scopus).
2. **Marks J.**, Vitolina S. Dynamic Genetic Algorithm in Model for Vibrations of Power Transformer Windings, *10th International Conference of Exposition on Electrical and Power Engineering*, Romania, 2018, ISBN 978-1-5386-5061-5, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICEPE.2018.8559932 (iekļauts IEEEExplore, Scopus).

3. Poiss G., Vitolina S., **Marks J.** Development of Indicators for Technical Condition Indexing of Power Transformers. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. United States, ISSN 2415-6698, No. 1, pp. 148–154. DOI: 10.25046/aj030118 (iekļauts Scopus).
4. **Marks J.**, Vitolina S. Modelling of Magnetostriction of Transformer Magnetic Core for Vibration Analysis. *Open Physics*. Germany, 2017, No. 1, ISSN 2391-5471, pp. 803–808. DOI: 10.1515/phys-2017-0094 (iekļauts Scopus).
5. **Marks J.**, Vitolina S., Liepniece R. Modelling of Vibrations Caused by Magnetostriction in Magnetic Core of Large Power Transformers. *Proceedings of 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*, Latvia, ISBN 978-1-386-3847-7, pp. 1–5. DOI: 10.1109/RTUCON.2017.8124760 (iekļauts IEEEXplore, Scopus).
6. **Marks J.**, Vitolina S. Magnetostriction Model of Large Power Transformer Magnetic Core. *Proceedings of 2017 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering*, Poland, 2017, ISBN 97-1-5386-1662-8, pp. 1–2. DOI: 10.1109/ISEF.2017.8090673 (iekļauts IEEEXplore, Scopus).
7. Liepniece R., Vitolina S., **Marks J.** Study of Approaches to Incipient Fault Detection in Power Transformer by Using Dissolved Gas Analysis. *Energetika*. Lithuania, 2017, No.2, ISSN 0235-7208, pp. 66–74. DOI: 10.6001/energetika.v63i2.3521 (iekļauts Scopus).
8. Poiss G., Vitolina S., **Marks J.** Development of Indicator Based on Oil Analysis for Estimating Risk Level of Power Transformers. *Proceedings of 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*, Latvia, 2016, ISBN 978-1-5090-3732-2, pp. 273–276. DOI: 10.1109/RTUCON.2016.7763130 (iekļauts IEEEXplore, Scopus).
9. **Marks J.** Study of power transformer mechanical faults detection by using vibrodiagnostics. *Proceedings of 13th International Conference of Young Scientists on Energy Issues*, Lithuania, 2016, ISSN 1822-7554, pp. 135–144.

# 1. LIELJAUDAS TRANSFORMATORU MEHĀNISKIE DEFEKTI UN TO NOTEIKŠANAS IESPĒJAS

## 1.1. Izklāsts par lieljaudas transformatoru mehāniskajiem defektiem

Pastāv vairāki atšķirīgu veidu defekti, kas var rasties lieljaudas transformatoros to darbības laikā. Šos defektus var kategorizēt šādos tipos: termiskie; elektriskie; mehāniskie un ārējie.

*CIGRE* veiktajā pētījumā pierādīts, ka no apskatītajām atteicēm 19 % gadījumos iemesls bija tinumi, 3 % – magnētvals [21]. Šie abi elementi veido transformatora aktīvo daļu. Savukārt Taizemē veiktajā pārbaudē šie defekti bija 2,03 % no visām atteicēm [2]. Brazīlijā veiktajā pētījumā aktīvās daļas defekti radīja 30 % transformatoru atteižu [23]. Veiktā pētījuma [24] rezultējošā statistika par transformatoru defektu klasifikāciju norāda, ka Latvijas energosistēmā 1 % defektu cēloņu ir transformatora aktīvā daļa. Līdz ar to lieljaudas transformatoru aktīvās daļas defekti rada nozīmīgu kopējā atteižu skaita daļu.

Šis darbs ir fokusēts uz transformatora mehāniskajiem defektiem tā aktīvā daļā. Lieljaudas transformatoru darbības laikā tinumos plūst maiņstrāva, un to ģeometriju šķeļ transformatora radītā magnētiskā lauka izkliedes plūsma. Šī procesa dēļ transformatora tinumi ir pakļauti elektrodinamiskiem spēkiem.

Elektrodinamisko spēku radītās vibrācijas rodas tikai tinumos, tiek pārvadītas caur transformatora konstrukciju, sākot no transformatora cietās izolācijas un beidzot ar tā tvertnes virsmu. Šo vibrāciju mehānisko raksturu ietekmē transformatora konstrukcija, t. i., konstrukcijas izmēri, tinumu un magnētvalda konfigurācijas un transformatora darba režīms [3], [8], [9].

Lieljaudas transformatoru magnētvals tiek veidots no materiāla, kuram ir salīdzinoši lielāka magnētiskā vadītspēja attiecībā pret citiem transformatora aktīvās daļas elementiem. Līdz ar to kā transformatora magnētvalda materiāls tiek lietots elektrotehniskais tērauds [17].

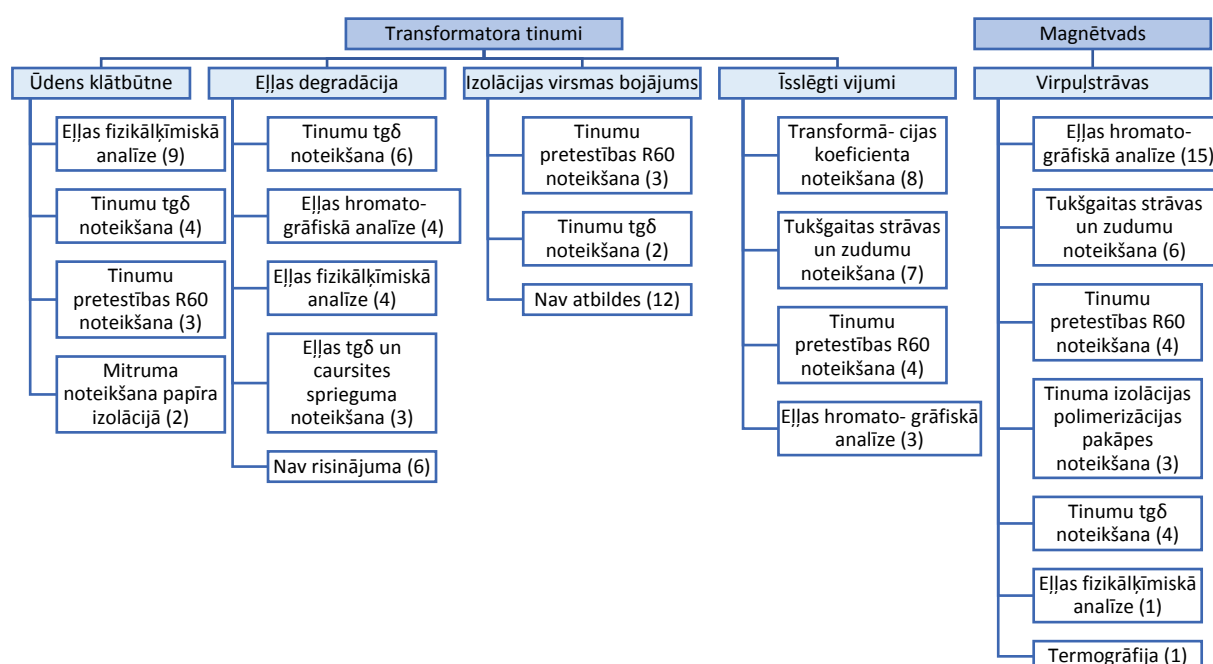
Elektrotehniskam tēraudam mikroskopiskā struktūra sastāv no domēniem, kuriem katram ir izteikta magnētiskā polarizācija. Savukārt katra elektrotehniskā tērauda domēna ietvaros esošo molekulu magnētiskām polarizācijām ir viens virziens [7]. Pakļaujot elektrotehnisko tēraudu ārēji radītam magnētiskam laukam, tajā esošie domēni reaģē uz magnētiskās plūsmas klātbūtni materiālā. Tie domēni, kuru magnētiskās polarizācijas virziens sakrīt ar ārējā magnētiskā lauka plūsmas virzienu, paliek fizikāli lielāki, savukārt domēni, kuru magnētiskā polarizācijas virziens ir atšķirīgs, paliek mazāki. Molekulu izmēri magnētiskās polarizācijas garenvirzienā un šķērsvirzienā atšķiras, tāpēc domēnu izmaiņas gadījumā mainās materiāla ģeometriskā forma. Šis ir magnetostrikcijas process [25]. Transformatora darbības laikā tā radītais magnētiskais lauks periodiski mainās. Līdz ar to magnetostrikcijas procesa dēļ transformatora magnētvals tiek pakļauts periodiskām tā ģeometrijas formas izmaiņām, kas rada tā vibrācijas [11], [26].

Magnetostrikcijas procesa radītās vibrācijas ilgā laika posmā var samazināt magnētvalda mehānisko stiprinājumu izturību. Tā rezultātā vibrāciju amplitūda var pieaugt, jo magnētvals

joprojām maina savas ģeometriskos izmērus atkarībā no magnētiskās indukcijas, bet mehāniskā stiprība tā saturošām konstrukcijām ir samazinājusies.

## 1.2. Diagnostikas metožu izvērtējums mehānisko defektu noteikšanai

Ir apzinātas diagnostikas metodes, lai noteiktu mehāniskus defektus tinumos un magnētavadā. *CIGRE* pētījuma [20] rezultāti ir apkopoti 1.1. attēlā. Iekavās norādīts aptaujāto ekspertu skaits, kuri noteiktam transformatora defektam izmanto attiecīgo diagnostikas metodi. Lai izvērtētu, vai ar ekspertu izmantotajām metodēm [20] ir iespējams noteikt tieši transformatoru mehāniskus defektus, ir papildus veikta literatūras izpēte, kurā ir apskatītas alternatīvas diagnostikas metodes mehānisko defektu noteikšanai.



1.1. att. Diagnostikas metodes transformatora tinumu un magnētvasda defektu noteikšanai.

Veiktais diagnostikas metožu izvērtējums liecina, ka netiešā veidā vairākas metodes norāda uz iespējamiem mehāniskiem defektiem transformatora aktīvajā daļā. Informāciju par aptuvenu defekta atrašanās vietu un veidu var iegūt, veicot vibrāciju mērījumus uz tvertnes virsmas. Šī metode sīkāk apskatīta 1.3. nodaļā.

## 1.3. Transformatora radīto vibrāciju mērījumi un rezultātu izvērtēšana

Transformatora radīto vibrāciju diagnostikā ir iespējami vairāki veidi, kā izmantot vibrāciju sensorus, lai iegūtu informāciju par radītajām vibrācijām:

- vibrāciju sensoru novietošana uz transformatora tvertnes virsmas;
- vibrāciju sensoru iebūvēšana transformatora aktīvās daļas konstrukcijā;
- vibrāciju sensoru novietošana noteiktā attālumā no transformatora tvertnes virsmas.

Plaši izmantota pieeja ir vibrāciju sensoru novietošana uz transformatora tvertnes virsmas. Šādā veidā ir viegli novietot sensorus vietās, kas atbilst atšķirīgiem transformatora aktīvās daļas fragmentiem, un tos ir viegli pārvietot. Šai pieejai ir trūkums, jo aktīvās daļas radītās vibrācijas vispirms tiek pārvadītas caur transformatora iekšējo struktūru, kas var izmainīt informāciju [19].

Vibrācijas ir iespējams raksturot ar jebkuru no to trim galvenajiem raksturlielumiem – vibropārvietojumu  $l$ , m, vibroātrumu  $v$ , m/s un vibropaātrinājumu  $a$ ,  $m/s^2$ . Zinot vienu vibrāciju raksturlielumu, ar matemātiskām izteiksmēm ir iespējams iegūt pārējos.

Šīs mehāniskās vibrācijas vispirms tiek pārvadītas caur transformatora mehānisko struktūru, līdz tās sasniedz tā tvertnes virsmu, tāpēc informācija par mehānisko stāvokli transformatora aktīvā daļā var tikt izmainīta. Tāpēc, izmantojot informāciju par visiem trim vibrāciju raksturlielumiem, var iegūt datus par mehānisko defektu esamību ar lielāku precizitāti. Katram no vibrāciju raksturlielumiem var tikt uzstādīta noteikta vērtība, kuru pārsniegšana var liecināt par iespējamu mehānisku bojājumu konkrētā transformatorā [29]:

- vibropaātrinājumam  $a > 10 \text{ m/s}^2$ ;
- vibroātrumam  $v > 20 \text{ mm/s}$ ;
- vibropārvietojumam  $l > 100 \text{ } \mu\text{m}$ .

Tomēr nepastāv universāli vibrāciju limiti, kuru pārsniegšana ļauj viennozīmīgi secināt, ka attiecīgam transformatoram eksistē mehānisks defekts tā aktīvā daļā.

Pēc izpētītās literatūras un daudzu transformatoru diagnostikas metožu izpētes var secināt, ka nepastāv diagnostikas metode, ar kuru var viennozīmīgi noteikt transformatora aktīvās daļas mehānisku defektu esamību un atrašanās vietu.

## 2. TRANSFORMATORA VIBRĀCIJU MODELIS MEHĀNISKO DEFEKTU NOTEIKŠANAI

Izstrādātais vibrāciju modelis ir paredzēts, lai, izvērtējot mērījumu rezultātus, atklātu mehāniskos defektus lieljaudas transformatoru tinumos un magnētavadā. Transformatora vibrāciju modeļa darbība ir paredzēta gadījumos, kad tvertnes virsmas vibrāciju mērījumu rezultāti ir tuvu vai pārsniedz iestatītās robežvērtības (skat. 1.3. apakšnodaļu).

Izstrādātais vibrāciju modelis izmanto melnās kastes principu un dinamisku ģenētisko algoritmu, lai simulētu vibrācijas transformatora tinumos un magnētavadā. Slēdzienu veidošanā tiek izmantota faziloģika. Rezultātā lietotājs saņem slēdzienu par attiecīgo transformatoru ar rekomendācijām turpmākām diagnostikas pārbaudēm, kā arī transformatora tvertnes virsmas vibrāciju vizualizāciju. Izstrādātā vibrāciju modeļa darbību ilustrē 2.1. attēls.

Izstrādātā vibrāciju modeļa rezultātā iegūst vienu no pieciem slēdzieniem ar atbilstošām rekomendācijām.

### 1. Nav aizdomu par mehānisku defektu transformatora aktīvajā daļā.

Rekomendācija: jāturpina veikt transformatora vibrāciju diagnostiku bez izmaiņām pārbaudes periodiskumā.

### 2. Rezultāts ir neskaidrs.

Rekomendācija:

- a) atkārtoti jāveic vibrāciju mērījumi uz tvertnes virsmas, un šie dati jāizmanto slēdziena iegūšanai izstrādātajā vibrāciju modelī;
- b) ieteicams papildus pārbaudīt transformatora piespieddzeses sistēmu, transformatora tvertnes pamatni un iespējamajos ārējos vibrāciju avotus.

### 3. Aizdomas par mehānisku defektu tinumos.

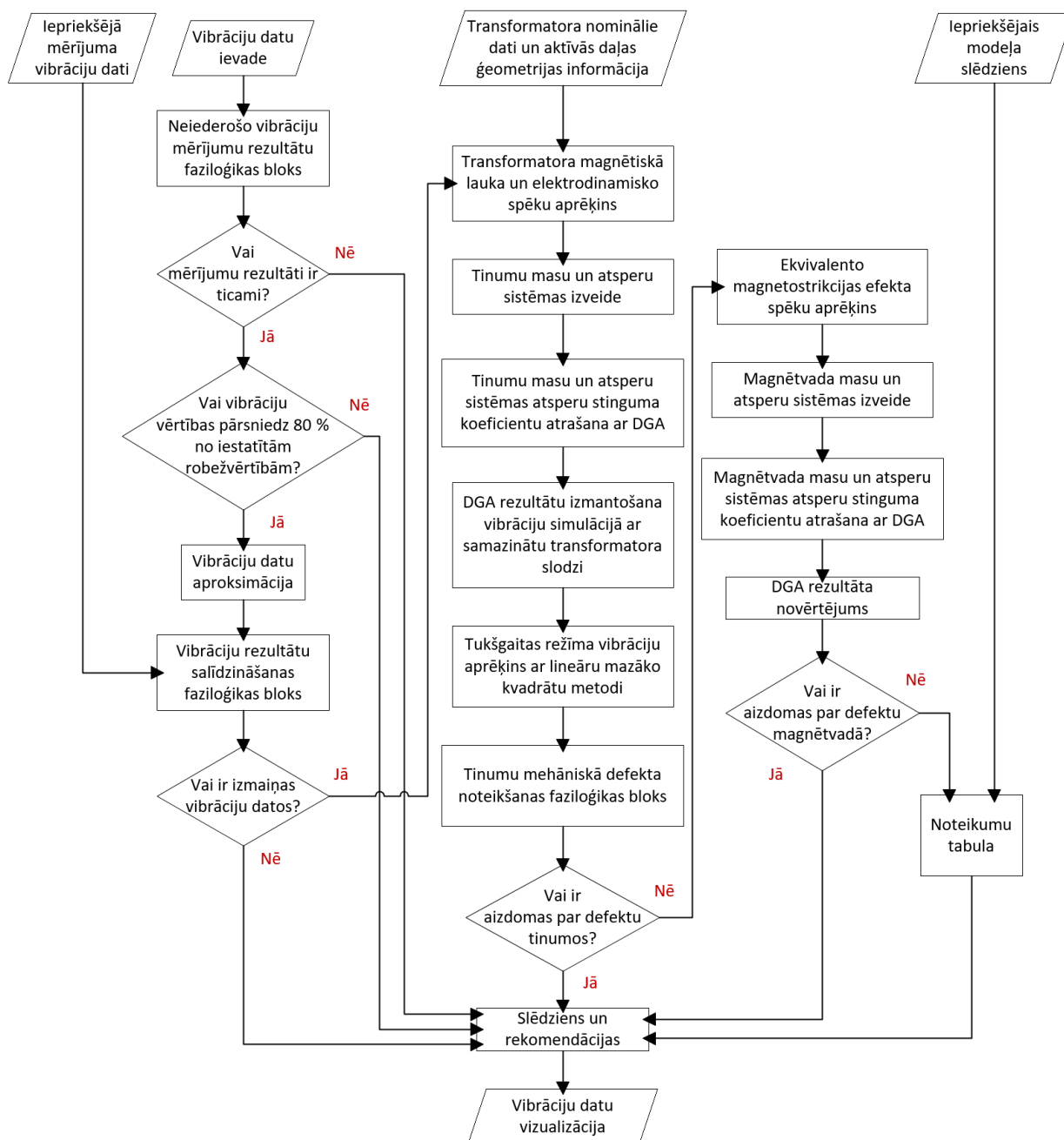
Rekomendācija: veikt frekvenču raksturlīknes analīzi; noteikt transformācijas koeficienta vērtību katrā fāzē; veikt atkārtotu tvertnes virsmas vibrāciju diagnostiku; veikt  $Z_k$  pretestības mērījumus.

### 4. Aizdomas par mehānisku defektu magnētavadā.

Rekomendācija: veikt tukšgaitas strāvu un zudumu noteikšanu; veikt atkārtotu tvertnes virsmas vibrāciju diagnostiku tukšgaitas režīmā, sīkāk pārbaudot attiecīgo magnētavada reģionu.

### 5. Aizdomas par defekta klātbūtni tinumos un/vai magnētavadā, bet to nevar lokalizēt.

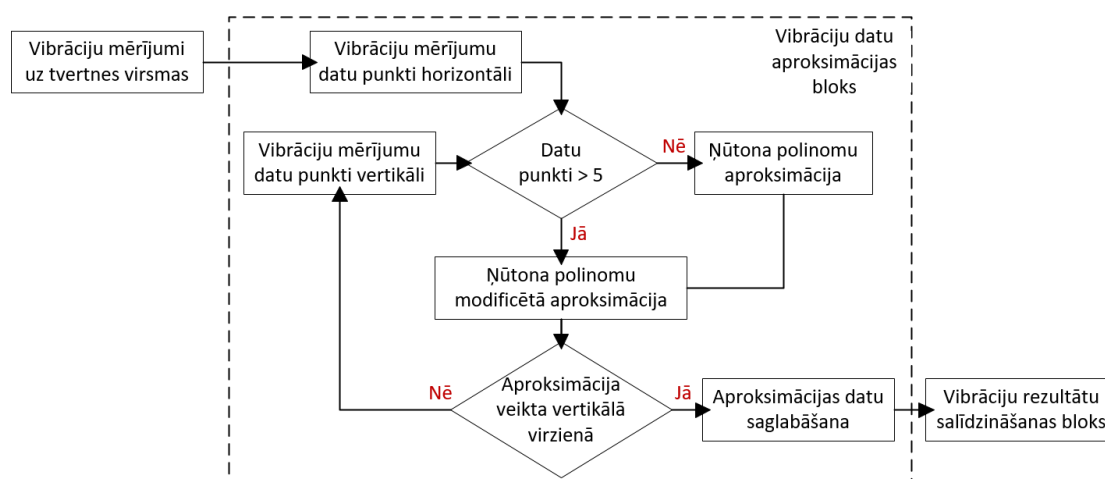
Rekomendācija: atkārtot tvertnes virsmas vibrāciju pārbaudi ar palielinātu mērījumu punktu skaitu un to pārklājuma reģionu; veikt frekvenču raksturlīknes analīzes mērījumus, ja tie jau ir veikti agrāk, veikt frekvenču raksturlīknes analīzi; noteikt transformācijas koeficienta vērtību katrā fāzē; veikt atkārtotu tvertnes virsmas vibrāciju diagnostiku, samazinot transformatora jaudu vairākos intervālos un sīkāk pārbaudot attiecīgo magnētavada reģionu; veikt  $Z_k$  pretestības mērījumus un tukšgaitas strāvu un zudumu noteikšanu.



2.1. att. Transformatora vibrāciju modeļa darbības blokshēma.

### 3. VIBRĀCIJU MĒRĪJUMU DATU APROKSIMĀCIJA UN VIZUALIZĀCIJA

Vibrāciju mērījumu laikā uz transformatora tvertnes virsmas sensorus parasti izvieto līdz 150 vietās. Lai varētu veikt analīzi, nepieciešams, lietojot aproksimācijas metodes, iegūt nepārtrauktu vibrāciju ainu uz tvertnes virsmas. Vibrāciju datu punktu skaits nosaka, kāda veida aproksimācijas metode sākotnēji tiks lietota (skat. 3.1. attēlu).



3.1. att. Vibrāciju datu aproksimācijas bloka blokshēma.

Ņūtona polinomu aproksimācijas metodes gadījumā tiek aprēķinātas diferencu vērtības, kas ļauj iegūt aproksimētu vērtību starp zināmiem datu punktiem noteiktās pozīcijās [5], [28]. Izteiksme (3.1.) parāda gadījumu, kad ir doti pieci zināmi datu punkti.

$$y_i = a_0 + a_1(x_i - x_1) + a_2(x_i - x_1)(x_i - x_2) + a_3(x_i - x_1)(x_i - x_2)(x_i - x_3) + a_4(x_i - x_1)(x_i - x_2)(x_i - x_3)(x_i - x_4), \quad (3.1.)$$

kur  $y_i$  – aproksimētā datu vērtība  $i$ -tajā pozīcijā;

$x_i$  –  $i$ -tā pozīcija aproksimācijai starp zināmiem datu punktiem;

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$  – polinoma koeficienti;

$x_1, x_2, x_3, x_4$  – zināmo datu punktu pozīcijas.

Ņūtona polinomu aproksimācija paliek sarežģītāka, pieaugot vajadzīgajai polinoma augstākai pakāpei. Papildus aproksimētajām vērtībām ir tendence radīt lokālus funkcijas ekstrēmus ārpus sākotnēji uzdotajām vērtībām. Līdz ar to ir izstrādāta un piedāvāta modifikācija Ņūtona polinomu aproksimācijas metodei. Modifikācija paredz, ka datu punkti tiek iedalīti grupās, kur katrā grupā ir pieci punkti, turklāt katras nākamās grupas sākuma datu punkts ir iepriekšējās grupas beigu punkts. Datu grupu skaits tiek noteikts ar izteiksmi (3.2.)

$$g_{sk} = \text{rounddown}\left(\frac{x_{sk}-2}{2}\right), \quad (3.2.)$$

kur  $g_{sk}$  – aproksimācijas grupu skaits;

$x_{sk}$  – datu punktu skaits.

Kā redzams 3.2. attēlā, šādi tiek radīts datu aproksimācijas punkts, kurā atsevišķo grupu aproksimāciju līknes veido lūzumu. Lai nodrošinātu, ka ir monotona izmaiņa vibrāciju vērtību amplitūdām, tiek veikta papildu datu aproksimācija ar atšķirīgām sākotnējām grupām. Papildu datu grupa tiek novietota tā, lai tās viduspunkts atrastos aproksimācijas rezultātu lūzuma vietā, piemēra gadījumā – no 3. līdz 7. datu punktam, kas 3.2. attēlā ir parādīta kā zaļā līkne.

Lai visus aproksimācijas rezultātus apvienotu vienā līknē, tiek izveidota katras aproksimācijas grupas piederības funkcija, ar kuru ir iespējams apvienot rezultātus bez nozīmīgām izmaiņām precizitātē. Piederības funkcija izmanto jau iegūtos aproksimācijas datus no atsevišķām datu grupām, kas raksturo iegūtās vērtības vienā pozīcijā. Atkarībā no šīs pozīcijas novietojuma attāluma līdz attiecīgo izmantoto grupu viduspunktiem tiek aprēķināta aproksimācijas vērtība

$$y_i = \frac{y_{g,i}(x_n - x_i)^2 + y_{g+1,i}(x_i - x_1)^2}{(x_n - x_i)^2 + (x_i - x_1)^2}, \quad (3.3.)$$

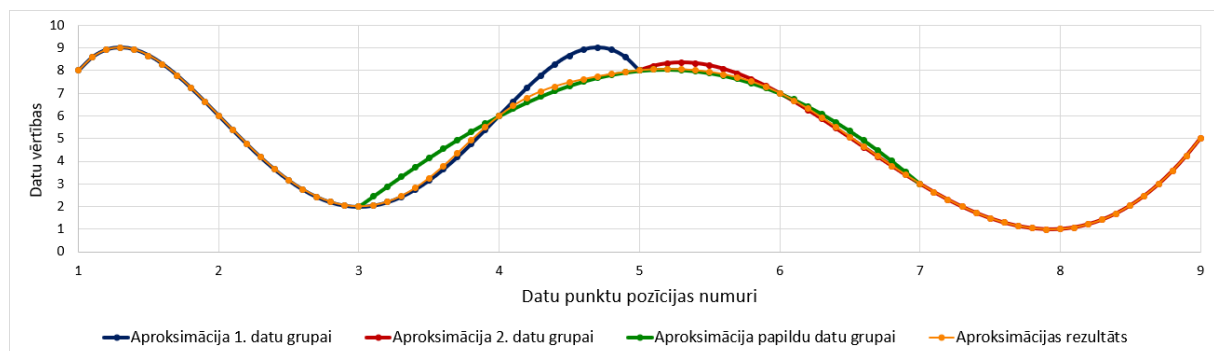
kur  $y_{g,i}$  – datu aproksimētā vērtība no pirmajām datu grupām;

$y_{g+1,i}$  – datu aproksimētā vērtība no otrās datu grupas;

$x_1$  – pozīcijas vērtība aproksimācijas apvienošanas perioda sākumā;

$x_i$  – konkrētā aproksimācijas vērtības pozīcija;

$x_n$  – pozīcijas vērtība aproksimācijas apvienošanas perioda beigās.



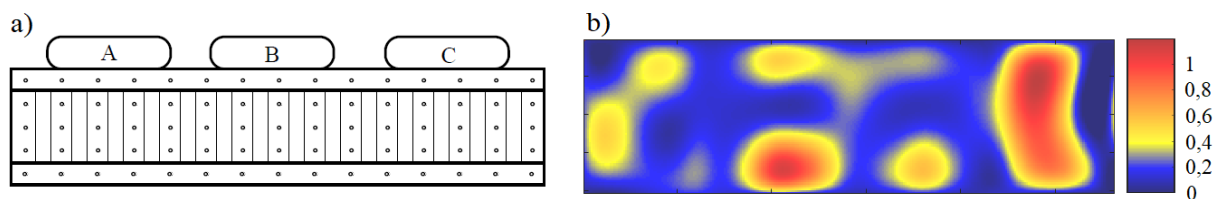
3.2. att. Modificētās Ņūtona polinomu aproksimācijas beigu rezultāts.

Piedāvātās modifikācijas verifikācijai tiek izmantoti trešās pakāpes splaini [6]. Verifikācijas nolūkos tiek salīdzināti transformatora tvertnes virsmas vibrāciju dati 108 atsevišķiem mērījumiem. Pēc aproksimācijas darbību veikšanas tiek atrasta globālā maksimuma vērtība  $m_n$  modificētai Ņūtona polinomu metodei un  $m_s$  – splainu metodei, ar salīdzinājumu pārbaudot, ka aproksimācijas dēļ nav radušies jauni vibrāciju epicentri ar vērtībām, kas pārsniedz sākotnēji izmērītās vērtības. Iegūto globālo maksimuma vērtību salīdzinājums ir parādīts 3.1. tabulā.

Modificētās Ņūtona polinomu aproksimācijas metodes verifikācijas rezultāti

Gadījumu skaits	Vibroaātrinājuma $a$ , dati	Vibroātruma $v$ , dati	Vibropārvietojuma $l$ , dati
Pozitīvu gadījumu skaits ( $m_n < m_s$ )	28	23	24
Negatīvu gadījumu skaits ( $m_n > m_s$ )	8	13	12

Kā redzams no verifikācijas rezultātiem, modificētā aproksimācijas metode lielākajā daļā gadījumu sniedz vibrāciju aproksimācijas rezultātus ar mazāku globālo maksimumu  $m_n$ . 3.3. attēls ilustrē aproksimācijas piemēru.



3.3. att. Transformatora tvertnes virsmas vibrāciju aproksimācijas vizualizācija:

a) sensoru attiecīgais izvietojums uz transformatora tvertnes, b) vibrāciju aproksimācija.

## 4. TRANSFORMATORA MAGNĒTISKĀ LAUKA RAKSTURLIELUMU UN ELEKTRODINAMISKO SPĒKU APRĒĶINĀŠANA

### 4.1. Transformatora magnētiskā lauka modelēšanas nepieciešamība

Magnētiskā lauka esamība transformatora iekšējā konstrukcijā ir cēlonis fizikālajiem procesiem, kas rada vibrācijas transformatora tinumos un magnētavadā. Tas skaidrojams ar to, ka elektrodinamiskie spēki rodas, kad transformatora izkliedes plūsma šķērso tā tinumus [4], savukārt magnetostrīcijas process rodas, jo magnētiskā lauka ietekmē magnētvasda materiāls maina savas ģeometriskās formas [27].

4.1. izteiksme attēlo funkciju elektrodinamisko spēku aprēķinam:

$$F(t) = B(t) \cdot I(t) \cdot l \cdot \cos(\alpha), \quad (4.1.)$$

kur  $F(t)$  – radītais elektrodinamiskais spēks, N;

$B(t)$  – transformatora magnētiskā lauka modeļa aprēķinātās magnētiskās indukcijas vērtības visos tā galīgo elementu krustpunktos, T;

$I(t)$  – aprēķinātās strāvas tangenciālās vērtības visos tā galīgo elementu krustpunktos, A;

$l$  – transformatora tinuma fragmenta vidējais garums, m;

$\alpha$  – leņķis starp magnētiskās indukcijas un strāvas vērtības vektoriem, rad.

Tāpēc elektrodinamisko spēku momentānās vērtības iegūšanai ir nepieciešams modelēt magnētiskās indukcijas tinumos plūstošās strāvas vērtības, kā arī to vektorālos virzienus.

### 4.2. Transformatora magnētiskā lauka modeļa izveide

Lai aprēķinātu radīto magnētisko lauku transformatora tinumos, magnētavadā un apkārtējā vidē un iegūtu gan šī magnētiskā lauka magnētiskās indukcijas vērtības, gan strāvas blīvuma vērtības transformatora tinumu ģeometriskajā konstrukcijā, ir izvērtētas vairākas programmatūras, kas paredzētas fizikālas modelēšanas veidošanai un aprēķinu veikšanai. Tās ir analizētas, balstoties uz trīs atšķirīgiem kritērijiem:

- vai ir iespējams veikt trīsdimensionālu modelēšanu, lai iegūtu transformatora magnētiskā lauka modelī nepieciešamās magnētiskās indukcijas vektorālo vērtību visu telpas asu komponentes;
- vai programmatūra spēj aprēķināt laikā mainīgu magnētisko lauku;
- vai ir iespējams veikt rezultātu datu eksportēšanu, lai magnētiskās indukcijas un strāvas blīvuma datus tālāk izmantotu, aprēķinot elektrodinamisko spēku vērtības un to vektorālos virzienus.

Balstoties uz veikto izpēti, ir izvēlēta *COMSOL* programmatūra, jo tā atbilst visiem izvirzītajiem kritērijiem un ir pieejama Rīgas Tehniskā universitātē.

Jāatzīmē, ka transformatora magnētiskā lauka aprēķina gaitā tiek piemēroti vairāki pieņēmumi, kas ir izveidoti, lai iegūtu rezultātus bez liela skaita transformatora sastāvdaļu raksturlielumu un papildu informācijas par tiem. Transformatora veiktie pieņēmumi ir:

- visi izveidotie domēni ir homogēni;
- magnētqvads un tinumi ir perfektas formas;
- magnētiskais lauks neatrodas ārpus transformatora magnētiskā lauka modeļa telpas;
- magnētiskie zudumi netiek ņemti vērā;
- visu sprieguma pakāpju slēgumi ir pārveidoti uz zvaigznes slēgumiem;
- magnētqvada magnetizēšanās līkne tiek interpolēta lineāri;
- transformatora magnētiskā lauka modelī netiek ņemti vērā citi transformatora konstrukcijas elementi, kas var izraisīt magnētiskā lauka esamību;
- magnētqvada materiāls ir izotropisks tā modelēšanas plaknē;
- transformatora elektriskā ķēde ir norobežota ar perfektiem izolatoriem.

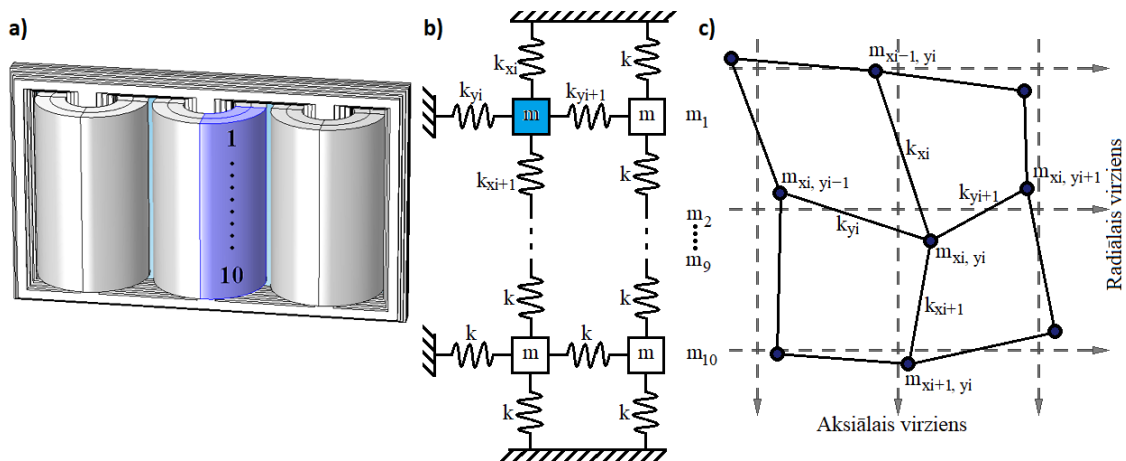
*COMSOL* programmatūras simulācijas ietvaros tiek uzdots, ka tiks modelēts 0,1 sekundes laika periods ar iterācijas soli 0,0005 sekundes. Šis periods ir atbilstošs, jo tas ietver pietiekamu skaitu (20) sprieguma avota periodus, kas rada pastāvīgu režīmu ar jau norimušiem pārejas procesiem. Izvēlētais iterācijas soļa ilgums nodrošina nepieciešamās magnētiskā lauka magnētiskās indukcijas vērtības un strāvas blīvuma vērtības modelējamā transformatora tinumos 40 reizes vienā avota sprieguma periodā, un no šiem datiem pēc tam var aprēķināt citus nepieciešamos raksturlielumus ar tādu pašu iterāciju soļa lielumu.

## 5. VIBRĀCIJU SIMULĀCIJA AR MASU UN ATSPERU SISTĒMĀM

### 5.1. Tinumu masu un atsperu sistēma

Transformatora tinumu vibrāciju simulācijai izstrādātā vibrāciju modeļa ietvaros tiek lietota masu un atsperu sistēma. Katram sistēmas elementam tiek definēta tā masa, blakus esošo atsperu stinguma koeficienti un tiek pievienoti iepriekš aprēķinātie elektrodinamiskie spēki. Pēc tam šī sistēma tiek aizstāta ar diferenciālvienādojumu sistēmu, ar kuru mijiedarbojas dinamisks ģenētiskais algoritms, kas iteratīvi atrod sistēmas konfigurāciju, kurai ģenerētās vibrācijas atbilst realitātē iegūtajām uz transformatora tvertnes virsmas.

5.1. attēls parāda vienas iterācijas vizualizāciju, kur izcelts tinumu segments, kas tiek sadalīts 10 fragmentos. Skaitļi no 1 līdz 10 ilustrē tinumu masu sadalījumu aksiālā virzienā. Šis process tiek veikts gan ar iekšējo, gan ar ārējo tinumu, līdz ar to tiek izveidoti 20 masu elementi.



5.1. att. Transformatora

a) tinuma segments, b) masu un atsperu sistēmas fragments, c) ilustrācija vienam masas elementam.

Atsevišķa masas elementa  $m_{xi,yi}$  kustība un tam pievienotās atsperes ir vizualizētas 5.1. c) attēlā. Redzams, ka jebkurš masu un atsperu sistēmas elements, mijiedarbojoties ar tam pievienotajām atsperēm, var pārvietoties radiālā tinumu šķērs griezuma plaknē. Izveidojot divu diferenciālvienādojumu sistēmu, ir iespējams aprēķināt katra masas elementa koordinātas noteiktā laika intervālā. Šo masu kustību izsaka šādi:

$$\begin{aligned}
 m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} - k_{xi}(x_{i-1} - x_i) + k_{xi+1}(x_i - x_{i+1}) \\
 - k_{yj}(x_{j-1} - x_j) - k_{yj+1}(x_{j+1} - x_j) = F_{xi}(t), \\
 m_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} - k_{yj}(y_{j-1} - y_j) + k_{yj+1}(y_j - y_{j+1}) \\
 - k_{xi}(y_{i-1} - y_i) - k_{xi+1}(y_{i+1} - y_i) = F_{yi}(t),
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

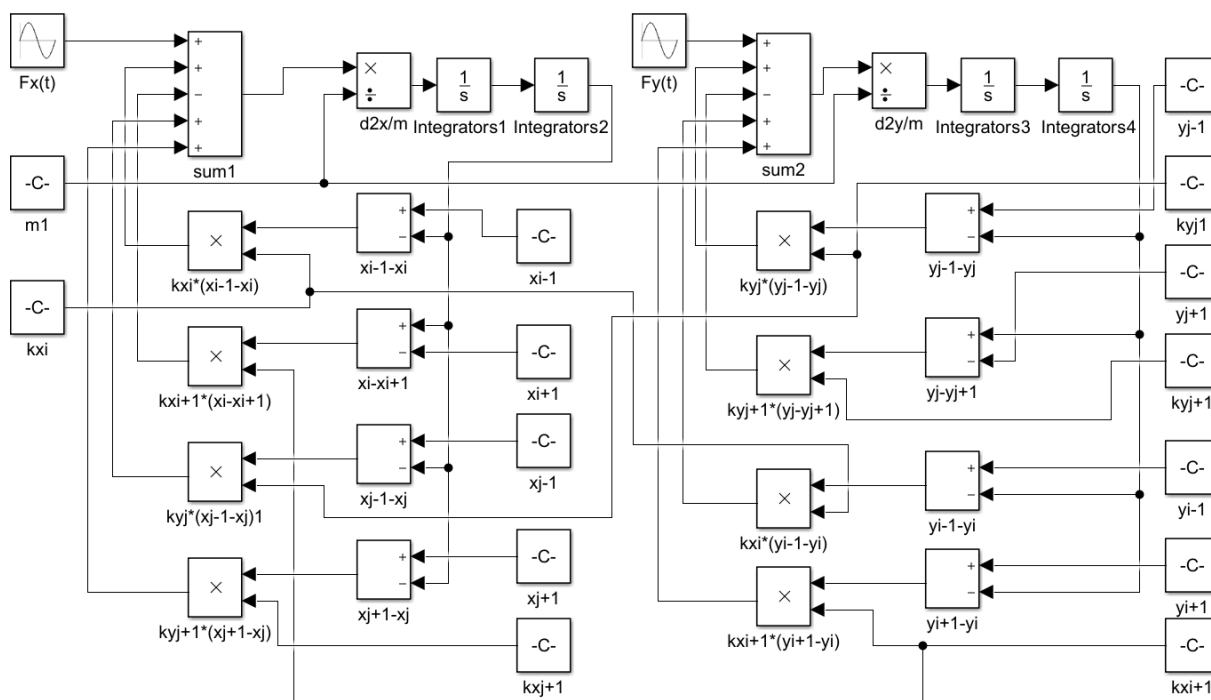
kur  $m_i$  – masas elementa masa, kg;

$x_{i-1}; x_i; x_{i+1} \dots y_{j-1}; y_j; y_{j+1}$  – masas elementa, tam sekojošā un iepriekšējā masas elementa radiālā un aksiālā virzienos pozīcija radiālā un aksiālā virzienā, m;

$k_{xi}; k_{xi+1}; k_{yi}; k_{yi+1}$  – radiālā un aksiālā virziena atsperu stinguma koeficienti;

$F_{xi}(t); F_{yi}(t)$  – elektrodinamiskie spēki radiālā un aksiālā virzienā.

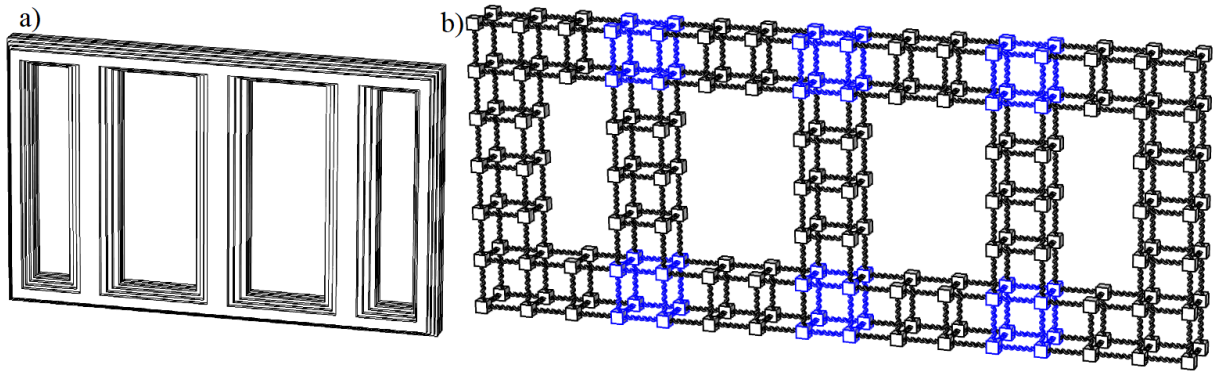
Masu un atsperu sistēmas matemātiskais modelis ir realizēts *Matlab Simulink* programmatūrā, kas piedāvā iespēju pārveidot diferenciālvienādojumus signālu plūsmu shēmā, sniegt to rezultātus atšķirīgos laika intervālos ar maināmu precizitāti un individuālo iterāciju biežumu un eksportēt mainīgu raksturlielumu vērtības uz *Matlab* programmatūru tālākai apstrādei un aprēķiniem. Katras simulētās masas diferenciālvienādojumu sistēma ir saistīta ar blakus esošo masu diferenciālvienādojumu sistēmu, jo šos masu elementus savieno viena atsperē, tāpēc visa signālu plūsmu shēma ir iekšēji savienota. 5.2. attēls ilustrē masu un atsperu sistēmas viena masas elementa shēmu *Matlab Simulink* vidē.



5.2. att. Modeļa viena masas elementa shēma *Matlab Simulink* vidē [14].

## 5.2. Magnētvasda masu un atsperu sistēma

Masu un atsperu sistēma vibrāciju modelēšanai lieljaudas transformatora magnētvasdā ir izpildīta līdzīgi kā transformatora tinumos. Visizteiktākā atšķirība magnētvasda masu un atsperu sistēmas izveidei ir papildus pievienotā dimensija. Transformatora magnētvasda (5.3. a) attēls) aizvietošanu ar masu un atsperu sistēmu ilustrē 5.3. b) attēls.



5.3. att. Transformatora magnētvasda aizvietošanas ar masu un atsperu sistēmu ilustrācija:  
a) magnēta konstrukcija, b) aizvietotā masu un atsperu sistēma.

Iekrāsotie masu elementi un to savienojošās atsperes tiek uzskatīti par nekustīgiem, jo konstrukcijā attiecīgie punkti ir savienoti ar stiprinājumiem [12]. Katra masu un atsperu sistēmas masas elementa kustību ir iespējams izteikt kā vektorālu summu no tā kustībām visu telpas dimensiju virzienos. Šīs kustības raksturo diferenciālvienādojumu sistēma

$$\begin{aligned}
 & m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} + k_{xi}(x_i - x_{i-1}) + k_{xi+1}(x_i - x_{i+1}) + k_{yj}(x_j - x_{j-1}) \\
 & + k_{yj+1}(x_j - x_{j+1}) + k_{zl}(x_l - x_{l-1}) + k_{zl+1}(x_l - x_{l+1}) = F_{xi}(t) \\
 & m_j \frac{d^2 y_j}{dt^2} + k_{yj}(y_j - y_{j-1}) + k_{yj+1}(y_j - y_{j+1}) + k_{xi}(y_i - y_{i-1}) \\
 & + k_{xi+1} \cdot (y_i - y_{i+1}) + k_{zl}(y_l - y_{l-1}) + k_{zl+1} \cdot (y_l - y_{l+1}) = F_{yj}(t), \\
 & m_l \frac{d^2 z_l}{dt^2} + k_{zl}(z_l - z_{l-1}) + k_{zl+1}(z_l - z_{l+1}) + k_{xi}(z_i - z_{i-1}) \\
 & + k_{xi+1}(z_i - z_{i+1}) + k_{yj}(z_j - z_{j-1}) + k_{yj+1}(z_j - z_{j+1}) = F_{zl}(t),
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

kur  $m_i$  – masas elementa masa, kg;

$x_{i-1}; x_i; x_{i+1} \dots z_{l-1}; z_l; z_{l+1}$  – masas elementa, tam sekojošā un iepriekšējā masas elementa pozīcija vertikālā, horizontālā magnētvasda garuma un platuma virzienos, magnētvasda augstuma, garuma un platuma asīs, m;

$k_{xi}; k_{xi+1} \dots k_{zl}; k_{zl+1}$  – magnētvasda vertikālā, horizontālā garuma un platuma virzienu atsperu stinguma koeficienti;

$F_{xi}(t); F_{yj}(t); F_{zl}(t)$  – ekvivalentais magnetostrīkijas spēks magnētvasda vertikālā, horizontālā garuma un platuma virzienos.

Lai ar šo diferenciālvienādojumu sistēmu varētu simulēt magnetostrīkijas efektu, ir nepieciešams aprēķināt ekvivalentos magnetostrīkijas spēkus  $F_{xi}(t)$ ,  $F_{yj}(t)$  un  $F_{zl}(t)$ . Magnetostrīkijas radīto deformāciju simulācijai tiek lietots dinamiskais elastības modulis, ko aprēķina kā

$$E = \frac{Fl_0}{S\Delta l'} \tag{5.3}$$

kur  $F$  – pievadītais spēks, N;

$l_0$  – sākotnējais materiāla garums, m;

$S$  – virsmas laukums, kur spēks tiek pievadīts,  $m^2$ ;

$\Delta l$  – materiāla deformācijas garums, m.

Vienādojumu sistēmu ir nepieciešams aprēķināt vienlaikus visiem masu un atsperu sistēmas masu elementiem katrā laika momentā, jo blakus esošo masu elementu pozīcijas izmaiņa ietekmē uz attiecīgā masas elementa rezultējošo atsperu elastības spēku vērtības. Tāpēc ir nepieciešams visu masu elementu kustības vienādojumus apvienot kopējā sistēmā. Tas tiek panākts *Matlab Simulink* programmatūras vidē.

Nākamā izstrādātā vibrāciju modeļa soļa uzdevums ir atrast šīs shēmas atsperu stingumu koeficientu konfigurāciju, kas dotu rezultējošās vibrāciju amplitūdas ārējā tinuma radiālā virzienā, kas ir vienādas ar realitātē izmērītām vibrācijām uz transformatora tvertnes virsmas.

### **5.3. Dinamisks ģenētiskais algoritms stinguma koeficientu noteikšanai masu un atsperu sistēmā**

Pētījumā izstrādātā dinamiskā ģenētiskā algoritma mērķis ir atrast mainīgo raksturlielumu konfigurāciju, kas radītu līdzīgu rezultātu vibrāciju mērījumu datiem, izmantojot mākslīgas evolūcijas simulāciju. Šāda pieeja ir nepieciešama, jo masu un atsperu sistēmā katrai atsperei var būt savs individuāls stinguma koeficients, kura vērtība var svārstīties vairāku kārtu robežās, un rodas liels daudzums atšķirīgu konfigurāciju. Ģenētiskie algoritmi dod iespēju meklēt individuālas konfigurācijas ļoti lielā daudzumā iespējamu atšķirīgu gadījumu. Šādi algoritmi darbojas pēc lokālu izmaiņu un nejaušības principa. Ja kādā jaunā konfigurācijā ir konstatēts labāks rezultāts, lielāks īpatsvars nākamajos meklējumos notiek šajā apgabalā. Izmantojot atšķirīga veida mutācijas, ir iespējams meklēt rezultātus logaritmiska mēroga telpas apgabalā ar līdzīgu precizitāti katrā kārtā.

Pētījumā izveidotais dinamiskais ģenētiskais algoritms sākotnēji izveido populāciju, kas ir 100 indivīdu kopa. Sākotnējā indivīdu ģenerēšana rada pirmo populācijas paaudzi. Katras atsperes stinguma koeficienta vērtībai tiek piešķirts nejaušs skaitlis intervālā no 0 līdz  $10^7$ .

Izmantojot izstrādāto dinamisko ģenētisko algoritmu transformatora tinumu, magnētvasda masu un atsperu sistēmas, ir iespējams atrast tādas atsperu stinguma koeficientu vērtības, lai attiecīgā masu un atsperu sistēma ģenerētu vibrācijas, kas atbilst mērījumiem uz transformatora tvertnes virsmas un interpolētām vibrāciju vērtībām starp šiem mērījumu punktiem.



Neiederošo vibrāciju mērījumu rezultātu faziloģikas bloks izmanto četrus raksturlielumus. Tiek izvērtēts arī trūkstošo mērījuma punktu skaits  $n_p$  un blakus esošu nezināmo mērījumu punktu skaits  $n_{kp}$ .

Koeficients  $kvb_{max}$  dod informāciju par vibrāciju mērījumu rezultātu maksimālās vērtības  $vb_1$  attiecību pret otro lielāko vibrāciju mērījumu vērtību  $vb_2$ . Raksturlielums  $kvb_{min}$  ir attiecība, lai pārbaudītu, vai vibrāciju mērījumos ir datu punkti, kuriem kļūdas iespaidā ir neraksturīgi maza vērtība. Transformatoru tvertnes virsmas vibrāciju diagnostikā tiek uzņemti dati par šo vibrāciju vibropārvietojumu  $l$ , vibroātrumu  $v$  un vibropaātrinājumu  $a$ , tāpēc šo faziloģikas bloku ir nepieciešams izpildīt katram vibrāciju raksturlielumam atsevišķi.

Vibrāciju rezultātu salīdzināšanas faziloģikas bloks ir paredzēts, lai salīdzinātu divu secīgi veiktu vibrāciju mērījumu rezultātus. Tas ir nepieciešams, lai gadījumā, kad uz attiecīgā transformatora tvertnes virsmas ir novērotas paaugstinātas vibrācijas un izvērtēšana jau ir veikta, vibrāciju simulācija netiktu veikta, jo transformatora situācija nav mainījiesies.

Šī faziloģikas bloka raksturlielumi ir  $kvb_A$ ,  $kvb_B$  un  $kvb_C$ . Katrs no tiem raksturo vibrāciju maksimālās vērtības amplitūdu atšķirību starp divām diagnostikas reizēm attiecīgās transformatora fāzes reģionā uz tā tvertnes, un to aprēķina piemērs ir parādīts izteiksmē (6.1.).

$$kvb_A = \frac{\max(vb_{A2.i}) - \max(vb_{A1.i})}{\max(vb_{A1.i})}, \%, \quad (6.1.)$$

kur  $vb_{A2.i}$  – vibrāciju mērījumu  $i$ -tā vērtība A fāzes apgabala pēdējā diagnostikas reizē;

$vb_{A1.i}$  – vibrāciju mērījumu  $i$ -tā vērtība A fāzes apgabala iepriekšējā diagnostikas reizē.

Pēdējais šī faziloģikas bloka raksturlielums ir koeficients  $kvb_{max,d}$ , kas izsaka, cik lielā mērā ir izmainījies maksimālā vibrāciju amplitūdu mērījumu vērtība proporcionāli tās iepriekšējam mērījumam visa mērījumu apgabala reģionā.

Tinumu mehāniskā defekta noteikšanas faziloģikas bloks ir paredzēts, lai noteiktu, kurā pārbaudāmā transformatora aktīvās daļas sastāvdaļā ir aizdomas par mehānisko defektu. Faziloģikas bloks izmanto trīs raksturlielumus:  $k_a$ ,  $k_v$  un  $k_l$ , kas nosaka, cik lielā mērā modelēto vibrāciju raksturlielumu amplitūdu vērtības simulācijām ar regulāri samazinātu transformatora slodzi sakrīt ar vibrāciju vērtībām, kas ir iegūtas no tukšgaitas režīma diagnostikas mērījumu rezultātiem. Raksturlielumu vibropaātrinājumam  $k_a$  aprēķina šādi:

$$k_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_v} (a_{sl.i} - a_{t.i})^2}{n_v}} \cdot 100, \quad (6.2.)$$

kur  $a_{sl.i}$  – vibropaātrinājuma  $i$ -tā vērtība no slodzes vibrāciju simulācijas,  $m/s^2$ ;

$a_{t.i}$  – vibropaātrinājuma  $i$ -tā vērtība no tukšgaitas mērījumu rezultātiem,  $m/s^2$ ;

$n_v$  – vibrāciju vibropaātrinājuma mērījumu punktu skaits.

Līdzīgi aprēķina raksturlielumu vibroātrumam  $k_v$  un vibropārvietojumam  $k_l$ . Jāatzīmē, ka modelēto vibrāciju amplitūdu vērtības sākotnēji tiek iegūtas, simulējot transformatora darbību ar pilnu slodzi. Pēc tam šis process ar jau atrastiem masu un atsperu sistēmas stinguma koeficientiem tiek atkārtoti aprēķināts ar slodzēm no 100 % līdz 30 % no nominālās jaudas,

katrā simulācijas reizē to samazinot par 10 %. Šādā veidā tiek iegūts modelēto vibrāciju amplitūdu izmaiņas raksturs, samazinot transformatora slodzi. Rezultātu piemērs ir parādīts 7.5. attēlā.

Pēc tam tiek lietota lineāra vismazāko kvadrātu metode [16], lai ekstrapolētu modelēto vibrāciju amplitūdu vērtības tukšgaitas režīmā, izmantojot aprēķinātās vibrāciju vērtības no 100 % līdz 30 % no nominālās jaudas.

Šī faziloģikas bloka ietvaros ir nepieciešams atrast tā rezultātu piederības funkcijas grafika gravitācijas centra pozīciju, jo ir iespējami trīs atšķirīgi faziloģikas bloka rezultāti. Rezultātu piederības funkcijas gravitācijas centru aprēķina šādi:

$$R_{fuzi} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{it}} x_{f,i} y_{f,i}}{\sum_{i=1}^{n_{it}} y_{f,i}}, \quad (6.3.)$$

kur  $x_{f,i}$  – faziloģikas galējo rezultātu piederības funkcijas  $i$ -tā argumenta vērtība;

$y_{f,i}$  – faziloģikas galējo rezultātu piederības funkcijas  $i$ -tā argumenta funkcijas vērtība;

$n_{it}$  – faziloģikas galējo rezultātu piederības funkcijas izvēlēts iterāciju skaits.

Pozitīva rezultāta gadījumā iegūst slēdzienu, ka ir aizdomas par mehānisko defektu transformatora tinumos. Negatīva rezultāta negatīva gadījumā ir aizdomas par mehānisko defektu transformatora magnētavadā. Neitrāla rezultāta gadījumā nav tieši zināms, kurā transformatora aktīvās daļas elementā ir aizdomas par mehānisko defektu, jo nav skaidras norādes ne uz transformatora tinumiem, ne uz tā magnētavadu.

Gadījumos, kad tinumu mehāniskā defekta noteikšanas faziloģikas bloks sniedz negatīvu vai neitrālu rezultātu, tiek veikta magnetostrīcijas efekta radīto vibrāciju modelēšana [13]. Tās darbības rezultātā tiek atrasti izveidotās masu un atsperu sistēmas stinguma koeficienti transformatora magnētavada jūgu un stieņu simulētajā ģeometrijā. Pēc tam katrs simulētais stienis vai jūgs tiek sadalīts fragmentos, kas sastāv no četriem masu elementiem (skat. 6.3. attēlu). Katrā fragmentā ir divas atsperes, kas ir novietotas perpendikulāri transformatora tvertnes virsmai, uz kuras tika iegūtas vibrāciju mērījumu vērtības.

6.1. tabula

Noteikumu tabula slēdziena ģenerēšanai

Iepriekšējais modeļa slēdziens	Vai slēdziens ir ticams	Tinumu mehāniskā defekta noteikšanas faziloģikas bloka rezultāts	Slēdziena numurs (skat. 2. nodaļu)
2	Jā vai nē	Neitrāls vai negatīvs	2
3	Jā	Neitrāls vai negatīvs	3
3	Nē	Neitrāls vai negatīvs	2
4	Jā	Neitrāls vai negatīvs	4
4	Nē	Neitrāls vai negatīvs	2
5	Jā vai nē	Neitrāls	5
5	Jā vai nē	Negatīvs	2
Nav	–	Neitrāls	5
Nav	–	Negatīvs	2

Izdalot lielāko no šiem koeficientiem ar mazāko, tiek iegūts proporcijas koeficients  $k_r$ . Šī koeficienta vērtība attiecībā pret citu tā paša magnētvasda stieņa vai jūga fragmentu proporciju koeficientiem nosaka, vai ir aizdomas par mehānisko defektu tieši attiecīgajā fragmentā.

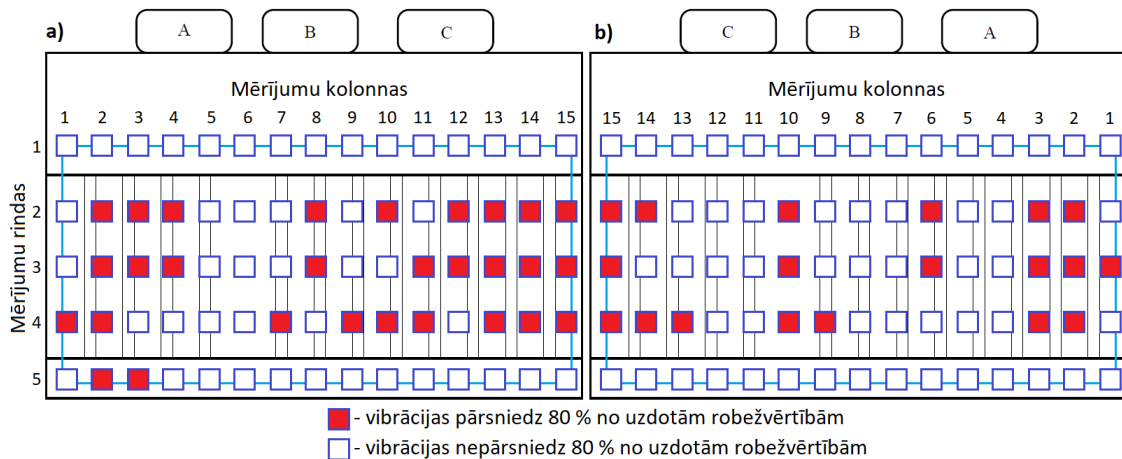
Gadījumos, kad transformatora tinumu un magnētvasda simulācijas jau ir veiktas un pie šiem izstrādātā vibrāciju modeļa blokiem nav iespējams nonākt, ja nav aizdomu par mehānisku defektu transformatora aktīvā daļā, tiek veikta papildu izvērtēšana, lietojot bināro loģiku ar noteikumu tabulu (skat. 6.1. tabulu).

# 7. TRANSFORMATORA VIBRĀCIJU MODEĻA REZULTĀTI

## 7.1. Aprēķina piemērs vienam transformatoram

Aprēķins tiek veikts transformatoram, kuram vibrāciju mērījumi uz tā tvertnes virsmas uzrāda vērtības, kas pārsniedz 80 % no uzdotām robežvērtībām (skat. 7.1. attēlu).

Lai pārliecinātos par šī transformatora radīto vibrāciju datu pareizību, tie visi tiek apstrādāti ar neiederošo vibrāciju mērījumu faziloģikas bloku. Šīs pārbaudes ietvaros tiek pārbaudītas 12 vibrāciju datu grupas. Šī transformatora gadījumā visiem tā datiem tiek iegūts pozitīvs rezultāts, kas liecina, ka vibrāciju mērījumu dati ir ticami. Līdz ar to transformatora vibrāciju modelis nonāk tālāk pie vibrāciju rezultātu salīdzināšanas faziloģikas bloka, kura darbības veikšanai ir jāveic vibrāciju vērtību aproksimāciju.



7.1. att. Vibrāciju sensoru uzrādītie dati uz transformatora:

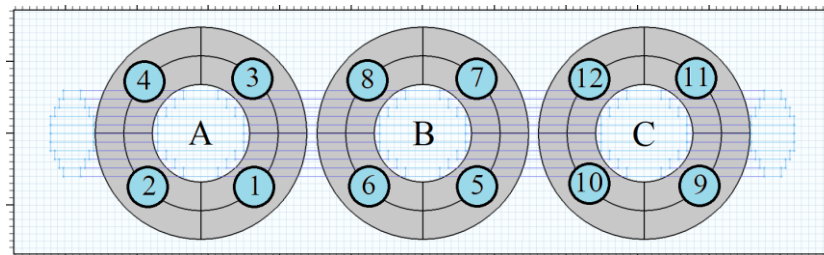
a) tvertnes virsmas augstākā sprieguma pusē, b) tvertnes virsmas zemākā sprieguma pusē.

Iepriekšējā mērījumā datu punkti iegūti no četrām mērījumu rindām un 12 mērījumu kolonnām, tāpēc tiek izmantota gan Ņūtona polinomu, gan modificētā Ņūtona polinomu metode. Vibrāciju rezultātu salīdzināšanas faziloģikas bloka rezultāti visiem mērījumu raksturlielumiem – gan 100 % slodzes režīmā, gan tukšgaitas režīmā – norāda, ka vibrāciju vērtības ir dinamiskas. Līdz ar to ir nepieciešams veikt tālāk izstrādātā vibrāciju modeļa darbību un veikt vibrāciju simulāciju transformatora tinumos.

Izstrādātā vibrāciju modeļa transformatora magnētiskā lauka elektrodinamisko spēku aprēķina bloka darbība sākas ar attiecīgā transformatora aktīvās daļas ģeometriskā modeļa izveidi un tā fragmentu sadalīšanu galīgo elementu metodes elementos. Pēc transformatora magnētiskā lauka modeļa aprēķinu veikšanas iegūtie magnētiskās indukcijas  $B$  transformatora tinumos un magnētvadā un strāvas blīvuma  $j$  tinumos rezultāti tiek eksportēti uz .txt dokumentu tālākai to apstrādei, kur tiek izmantotas tieši magnētiskā lauka izkliedes komponentes, kas šķērso modelējamā lieljaudas transformatora tinumus.

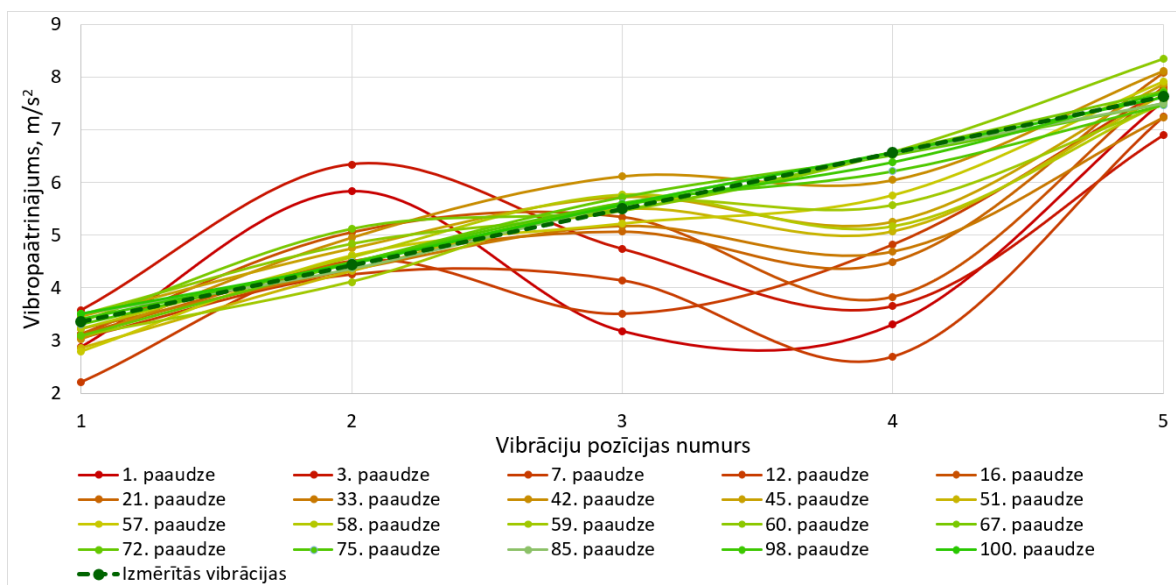
Pēc transformatora magnētiskā lauka modeļa magnētiskās indukcijas  $B$  magnētvadā un tinumos un strāvās blīvuma tinumos iegūšanas šie dati tiek pārvietoti uz *Microsoft Excel*

programmu to glabāšanai, pēc tam izmantoti *Matlab*. Jāatzīmē, ka pirms nākamā izstrādātā vibrāciju modeļa bloka darbības sākšanas tiek aprēķinātas elektrodinamisko spēku vērtības transformatora tinumu segmentu fragmentos.



7.2. att. Transformatora tinumu segmentu numerācija.

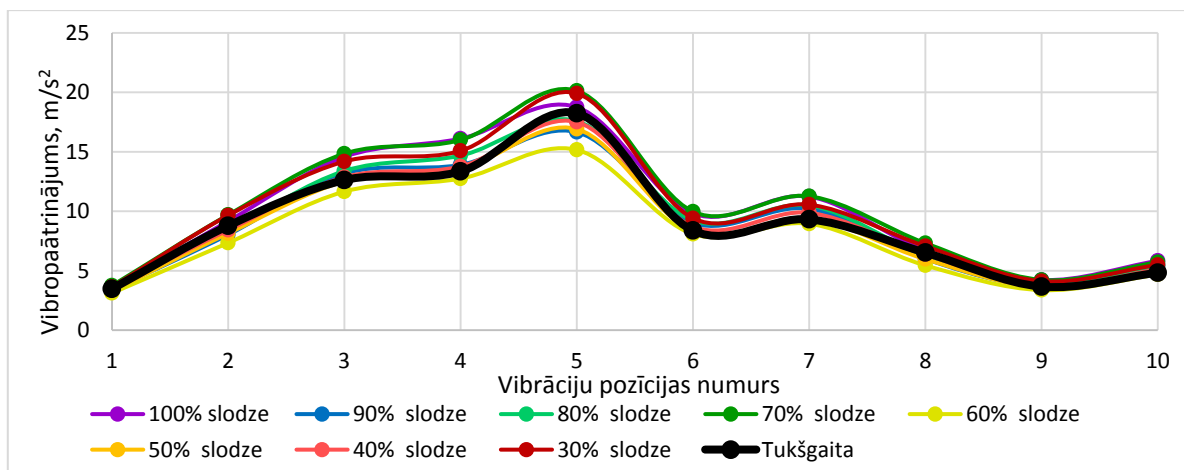
Nākamajā solī katrā tinumu segmenta (skat. 7.2. attēlu) simulācijai tiek lietots dinamisks ģenētisks algoritms, ar kuru tiek atrasti masu un atsperu sistēmas atsperu stinguma koeficienti.



7.3. att. DGA iegūto rezultātu vizualizācija.

Katra tinumu segmenta radīto vibrāciju iegūšanai lietotā DGA evolūcijas simulācija norit atšķirīgu skaitu paudžu, tādējādi to skaits ir mainīgs katrā simulācijas reizē to haotiskā rakstura un melnās kastes principa dēļ. Piemēram, 7.3. attēls ilustrē DGA rezultātu gadījumu ar 100 simulētām paudzēm.

Kā redzams 7.3. attēlā, pirmajās DGA algoritma simulētajās paudzēs iegūto vibrāciju vērtībām ir haotisks raksturs, bet tas tiecas uz izmērīto vibrāciju vērtībām, pieaugot simulēto paudžu skaitam. Papildus jāatzīmē, ka 7.3. attēlā ilustrētās DGA paudzes ir izvēlētas, jo tieši šajās paudzēs ir atrastas masu un atsperu sistēmas konfigurācijas, kas sniedz labāku rezultātu, salīdzinot ar attiecīgo iepriekšējo paudzi.



7.4. att. Tinumu 1. segmenta vibropaātrinājuma rezultāti ar atšķirīgām transformatora slodzes vērtībām.

Pēc tinumu vibrāciju simulācijas rezultātu iegūšanas nākamais solis ir transformatora tinumu radīto vibrāciju simulācijas gaitā iegūto atsperu stinguma koeficientu izmantošana analīzei, pakāpeniski samazinot transformatora slodzi līdz 30 %. Iegūtie rezultāti tinumu 1. segmentam ir parādīti 7.4. attēlā, kur ir redzams, kā mainās tinumu 1. segmenta radīto vibrāciju vibropaātrinājuma vērtības atkarībā no transformatora uzdotās slodzes simulācijā. Lai aprēķinātu un ekstrapolētu vibrācijas, kādas tiek radītas tukšgaitas režīmā, tiek izmantota lineāra mazāko kvadrātu metode. Šādā veidā tiek ņemts vērā vibrāciju kopējais izmaiņas raksturs katrā mērījumu vai aproksimācijas punktā, un izņēmumu gadījumi neizraisa pretrunīgus rezultātus, kad vibrāciju vērtībās pieaug, samazinot transformatora slodzi. Mazāko kvadrātu metodes rezultāti ir redzami 7.1. tabulā.

7.1. tabula

Lineārās mazāko kvadrātu metodes rezultāti tinumu 1. segmentam

Mērījumu punkta numurs	Tinuma 1. segmenta vibrāciju raksturlielumi					
	Vibropaātrinājums		Vibroātrums		Vibropārvietojums	
	Simulācija, $m/s^2$	Mērījums, $m/s^2$	Simulācija, mm/s	Mērījums, mm/s	Simulācija, $\mu m$	Mērījums, $\mu m$
1	3,47	2,80	1,86	1,30	7,13	1,40
2	8,77	7,15	8,52	10,44	8,30	16,75
3	12,62	11,11	15,92	17,40	19,58	28,11
4	13,35	14,30	15,96	20,00	20,63	31,50
5	18,24	16,17	5,03	17,15	15,35	25,03
6	8,37	15,50	11,41	12,10	12,65	15,20
7	9,32	11,71	6,59	8,36	5,83	8,84
8	6,52	7,50	4,02	6,00	5,52	5,60
9	3,66	5,53	1,81	4,34	2,93	3,61
10	4,83	5,10	2,48	3,00	5,29	2,10

7.1. tabulā apkopotie tinumu 1. segmenta rezultāti un pārējo tinumu segmentu rezultāti darbojas kā ievades dati tinumu mehāniskā defekta noteikšanas faziloģikas blokā. Šī bloka rezultāti nosaka, vai ir aizdomas par mehānisko defektu attiecīgajā transformatora tinumu segmentā. Jāatzīmē, ka katras transformatora aktīvās daļas fāzes apgabalā ir četri tinumu segmenti, kas var katrs ģenerēt savu individuālo rezultātu, bet vēlāk visi šie rezultāti tiek apvienoti vienā, proti, katra tinumu segmenta rezultāts dod īpatsvaru uz visas fāzes tinumu rezultātu.

Ar šādu pieeju tiek iegūti rezultāti visiem transformatora tinumu segmentiem, un tad tie tiek apvienoti katras transformatora fāzes ietvaros. Šī transformatora gadījumā tinumu mehāniskā defekta noteikšanas faziloģikas bloka rezultāti ir parādīti 7.2. tabulā.

7.2. tabula

Tinumu mehāniskā defekta noteikšanas faziloģikas bloka rezultāti

Tinumu segmenta numurs	Transformatora attiecīgā fāze	Faziloģikas bloka rezultāts	Turpmākās darbības
1.–4.	A	Neitrāls	Magnētvara vibrāciju modelēšana
5.–8.	B	Negatīvs	Magnētvara vibrāciju modelēšana
9.–12.	C	Neitrāls	Magnētvara vibrāciju modelēšana

Kā redzams, šī transformatora gadījumā ir iegūts neitrāls rezultāts 1.–4. un 9.–12. segmentu reģionā un negatīvs rezultāts 5.–8. segmentu reģionā. Līdz ar to šī transformatora magnētvara visu fāžu stieņos ir jāveic magnetostrīcijas efekta radītās vibrācijas. Serdei ir piecu stieņu konstrukcija, un transformatora tvertnes virsmas vibrācijas uzrāda vērtības tvertnes malu sānus, kas pārsniedz 80 % no uzdotām robežvērtībām, papildus ir nepieciešams veikt arī šo magnētvara konstrukcijas elementu radīto vibrāciju simulāciju un aprēķinu.

Nākamais solis ir ekvivalento magnetostrīcijas efekta spēku aprēķins, ko veic, izmantojot 5.3. izteiksmi un jau iepriekšējos soļos aprēķinātās magnētiskās indukcijas  $B$  vērtības magnetvadā. Pēc tam tiek izveidota masu un atsperu sistēma gan katras transformatora fāzes magnētvara stienim, gan tā sānu konstrukcijas stieņiem. Šī transformatora gadījumā katras fāzes magnētvara stieņa masu un atsperu sistēma sastāv no 20 masu elementiem, kas ir savstarpēji savienoti ar 84 atsperēm. Savukārt sānu stieņu gadījumā šī sistēma sastāv no 44 masu elementiem, kas ir savstarpēji savienoti ar 180 atsperēm.

Pēc tam atkārtoti tiek lietots DGA, lai atrastu atsperu stinguma koeficientus, ar kuriem magnetostrīcijas efekta dēļ tiktu simulētas vibrācijas, kas atbilst tukšgaitas režīma mērījumu rezultātiem un aproksimētām vibrāciju vērtībām starp tiem.

DGA izmanto melnās kastes principu, tāpēc ir nepieciešams aprēķināt proporcijas koeficienta vērtību  $k_r$ . Šī koeficienta rezultāti attiecīgajam transformatoram ir parādīti 7.3. tabulā. Iezīmētās proporcijas koeficienta vērtības signalizē, ka šajos fragmentos pastāv krasas to mehāniskās stiprības izmaiņas. Līdz ar to izstrādātais vibrāciju modelis nonāk pie slēdzieniem, ka fāžu A, B un C stieņos un kreisā sāna stienī ir aizdomas par mehānisku defektu magnetvadā, savukārt labā sāna stienī rezultāts ir neskaidrs. Iegūtais slēdziens katram

transformatora aktīvās daļas reģionam ar rekomendācijām un vibrāciju ainu vizualizāciju apkopots 7.5. attēlā.

Jāatzīmē, ka labā sāna stieņa slēdziens ir iegūts, izmantojot 6.4. tabulu, jo šī magnētvasda reģiona gadījumā nav iepriekšēju izstrādātā vibrāciju modeļa rezultātu. Līdz ar to vienīgā 6.1. tabulas rinda, kurai atbilst šī magnētvasda stieņa situācija, sniedz 2. slēdzienu.

7.3. tabula

Proporcijas koeficienta rezultāti pārbaudāmajam transformatoram

	Magnētvasda stienis				
	Kreisais sāns	A fāze	B fāze	C fāze	Labais sāns
Proporcijas koeficients $k_r$	1,40	2,66	1,63	2,10	1,01
	1,52	2,15	7,93	21,92	1,03
	2,26	1,81	78,10	14,06	1,45
	3,60	4,44	22,38	5,85	1,19
	1,10	4,78	7,89	1,17	1,25
Slēdziens	4. slēdziens	4. slēdziens	4. slēdziens	4. slēdziens	2. slēdziens

Transformatora aktīvās daļas reģions	Slēdziens	Rekomendācijas					
Kreisais sāns	Aizdomas par mehānisku defektu magnētvasdā	Veikt tukšgaitas strāvu un zudumu noteikšanu, veikt atkārtotu tvertnes virsmas vibrāciju diagnostiku tukšgaitas režīmā, sīkāk pārbaudot attiecīgo magnētvasda reģionu. Ieteicams papildus pārbaudīt transformatora piespieddzses sistēmu, transformatora tvertnes pamatni un iespējamus ārējos vibrāciju avotus.					
A fāze	Aizdomas par mehānisku defektu magnētvasdā						
B fāze	Aizdomas par mehānisku defektu magnētvasdā						
C fāze	Aizdomas par mehānisku defektu magnētvasdā						
Labais sāns	Neskaidrs rezultāts						
Vibrāciju aproksimācijas vizualizācija 100 % slodzes režīmā							
Raksturlielums	Augstākā sprieguma tvertnes puse			Zemākā sprieguma tvertnes puse			Skala
	Fāzes: A	B	C	Fāzes: C	B	A	
$a$ , relatīvās vienībās							
$v$ , relatīvās vienībās							
$l$ , relatīvās vienībās							

7.5. att. Izstrādātā vibrāciju modeļa aprēķina piemēra rezultāti attiecīgajam transformatoram.

## 7.2. Izstrādātā vibrāciju modeļa rezultāti

Izstrādātā vibrāciju modeļa verifikācijas ietvaros papildus iepriekš apskatītajam transformatoram tiek iegūti rezultāti vēl četriem transformatoriem, kuriem ir attiecīgie vibrāciju diagnostikas rezultātu dati:

- 1. transformators – vibrāciju vērtības pārsniedz 80 % no uzdotām robežvērtībām A un B fāzes reģionos gan 82 % slodzes režīmā, gan tukšgaitas režīmā;
- 2. transformators – vibrāciju vērtības pārsniedz 80 % no uzdotām robežvērtībām A fāzes reģionā, kur vislielākās vibrāciju vērtības ir reģistrētas tukšgaitas režīmā;
- 3. transformators – vibrāciju vērtības nepārsniedz 80 % no uzdotām robežvērtībām nevienā reģionā – gan transformatoram attiecīgās slodzes, gan tukšgaitas režīmā;
- 4. transformators – vibrāciju vērtības nepārsniedz 80 % no uzdotām robežvērtībām nevienā reģionā – gan transformatoram attiecīgās slodzes, gan tukšgaitas režīmā.

1. transformatoram izstrādātais vibrāciju modelis sniedz rezultātus, kuros transformatora A fāzes reģionā ir aizdomas par mehāniskā defekta klātbūtni, bet to nevar lokalizēt. Tas skaidrojams ar to, ka gan tinumu, gan magnētvasda radīto vibrāciju simulācija un aprēķins nesniedz tiešu norādi par mehāniskā defekta klātbūtni tieši šajā aktīvās daļas reģionā. Savukārt B fāzes reģionā ir aizdomas par mehānisku defektu magnētvasdā, C fāzes reģionā nav aizdomu par mehāniska defekta klātbūtni.

2. transformatoram tiek iegūts slēdziens, ka A fāzes reģionā ir aizdomas par mehāniska defekta klātbūtni, bet nevar lokalizēt tā atrašanās vietu noteiktā transformatora aktīvās daļas sastāvdaļā. Fāžu B un C reģionos nav aizdomu par mehānisko defektu aktīvā daļā.

Izstrādātā vibrāciju modeļa rezultāti 3. transformatoram liecina, ka vibrāciju diagnostikas dati ir ticami, netiek veikta ne tinumu, ne magnētvasda radīto vibrāciju simulācija, jo nav pamata aizdomām par mehānisko defektu nevienā tā aktīvās daļas reģiona sastāvdaļā. Līdz ar to 3. transformatoram visos tā aktīvās daļas reģionos, kuriem ir veikta tvertnes virsmas vibrāciju diagnostika, tiek iegūts slēdziens, ka nav aizdomu par mehānisko defektu transformatora aktīvā daļā.

Izstrādātā vibrāciju modeļa rezultāti 4. transformatoram visos tā aktīvās daļas reģionos norāda, ka nav aizdomu par mehānisko defektu transformatora aktīvā daļā, jo vibrāciju diagnostikas rezultāti ir ticami un to vērtības nepārsniedz 80 % no uzdotām robežvērtībām.

## SECINĀJUMI

1. Literatūras analīzes rezultātā var secināt, ka nepastāv transformatoru diagnostikas metode, ar kuru tieši un viennozīmīgi var noteikt mehāniskus defektus transformatora aktīvajā daļā. Turklāt nozarē lietotajām diagnostikas metodēm raksturīga kopīga iezīme – nav universālas mērījumu rezultātu interpretācijas. Konstatētās problēmas risināšanai promocijas darbā ir izstrādāts transformatora vibrāciju modelis, kura ievades dati ir vibrāciju mērījumu uz tvertnes virsmas rezultāti un kas, lietojot dinamisku ģenētisku algoritmu, faziloģiku, melnās kastes darbības principu un modificētu Ņūtona polinomu aproksimācijas metodi, ļauj iegūt slēdzienu par mehāniskā defekta esamību aktīvajā daļā un sniegt rekomendācijas turpmākās diagnostikas veikšanai.
2. Vibrāciju modeļa darbība neatkarīgi no sensoru izvietojuma uz tvertnes virsmas ir sekmīgi panākta, veicot vibrāciju aproksimāciju ar Ņūtona polinomu metodi, tostarp izstrādāto šīs metodes modifikāciju, kas paredzēta, ja attiecīgā virzienā ir vairāk nekā pieci sensori. Modificētās Ņūtona polinomu aproksimācijas metodes priekšrocības ir: mazāks skaits jaunu lokālo maksimumu, aproksimācijai lietojot kubiskos splainus, un aprēķins nepaliek ģeometriski lielāks nekā Ņūtona polinomu metodei. Veicot pārbaudi ar 108 vibrāciju mērījumu rezultātiem, konstatēts, ka modificētā metode 69,44 % gadījumu rada mazāk lokālo maksimumu.
3. Balstoties uz magnētiskā lauka raksturlielumu un elektrodinamisko spēku aprēķinu un brīvi maināmas konfigurācijas masu un atsperu sistēmas principu, vibrāciju modeļa ietvaros veiktā vibrāciju simulācija ļauj ģenerēt vibrāciju raksturlielumus transformatora tinumos, kurus apstrādājot faziloģikas blokā, iegūst slēdzienu par iespējamu mehānisku defektu tinumā.
4. Magnētvasda radīto vibrāciju simulācijai ir izveidota brīvi maināmas konfigurācijas masu un atsperu sistēma tā stieņiem un jūgiem, kuras pamatā ir gan literatūras analīze, gan iegūtā pieredze vibrāciju simulācijai tinumos, kas ļauj iegūt vibropārvietojuma vērtības transformatora magnētvasdā. Tās izvērtējot, tiek iegūts slēdziens par iespējamu mehānisku defektu magnētvasdā.
5. Pārbaudot, vai simulētās vibrācijas atbilst uz tvertnes virsmas nomērīto vibrāciju raksturam, izveidota masu un atsperu sistēma transformatora tinuma fragmentam, kas sastāv no 20 masu elementiem un 42 atsperēm, un tā piecstieņu magnētvasdam, kas sastāv no 20 masu elementiem un 84 atsperēm fāžu stieņu gadījumos, un no 44 masu elementiem un 180 atsperēm sānu stieņu gadījumos. Gala rezultātā tiek iegūts, ka tinumu simulēto vibrāciju rezultātiem lielākā kvadrātiskā novirze attiecībā pret nomērītajām vērtībām vibropaātrinājumam ir  $2,3 \text{ m/s}^2$ , vibroātrumam –  $4,8 \text{ mm/s}$  un vibropārvietojumam –  $5 \text{ }\mu\text{m}$ , savukārt magnētvasda simulēto vibrāciju lielākā kvadrātiskā novirze vibropārvietojumam –  $3 \text{ }\mu\text{m}$  sānu stieņiem un  $1,9 \text{ }\mu\text{m}$  fāžu stieņiem.

6. Aprēķina gaita transformatoram ar paaugstinātām vibrāciju vērtībām uz transformatora tvertnes, kas promocijas darbā ir atspoguļots kā detalizēts aprēķina piemērs, ļauj secināt, ka faziloģikas bloki mērījuma datu izvērtēšanai, secīgu mērījumu datu salīdzināšanai un slēdziena iegūšanai darbojas atbilstoši, jo izstrādātā piemēra ietvaros ir iegūts vissarežģītākais iespējamais variants faziloģikas blokam, kur ar aprēķinātajām vērtībām  $k_a = 2,7 \%$ ;  $k_v = 4,3 \%$  un  $k_l = 6,4 \%$  tiek aktivizētas visas iespējamās noteikumu tabulas ailes, un pastāv vislielākā rezultātu neskaidrība, no kuras faziloģikas bloks iegūst vienu konkrētu rezultātu.
7. Izstrādātā vibrāciju modeļa verifikācijas ietvaros transformatoram iegūtie slēdzieni labi korelē ar transformatoru vibrāciju mērījumu datiem. Proti, diviem transformatoriem, kuriem vibrāciju vērtības nepārsniedz 80 % no uzdotām robežvērtībām, ar izstrādāto vibrāciju modeli tiek iegūts slēdziens, ka aizdomu par mehānisku defektu nav. Savukārt trīs transformatoriem ar paaugstinātām vibrāciju vērtībām aprēķinu rezultātā ar izstrādāto vibrāciju modeli ir iegūta norāde par iespējamu mehānisku defektu tinumos un/vai magnētavadā.

## KOPSAVILKUMĀ IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. Alsuhaibani, S., Khan, Y., Beroual, A., Malik, N. H. A Review of Frequency Response Analysis Methods for Power Transformer Diagnostics. *Energies*. 2016, vol.9, no.11, pp. 1–17. e-ISSN 1996-1073. Available from: doi:10.3390/en9110879.
2. Chaidee, E., Tippachon, W. Failure Statistics and Condition Evaluation for Power Transformer Maintenance. **In:** *2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, China, Wuhan, March 25–28*. IEEE, 2011, pp. 1–4. ISBN: 978-1-4244-6255-1.
3. Chiesa, N., Lotfi, A., Høidalen, H. K. Mork, B., et al. Five-leg transformer model for GIC studies. **In:** *The International Conference on Power Systems Transients (IPST2013), July 18–20, 2013, Vancouver, Canada*. Vancouver, 2013, pp.1-6. ISSN 2434-9739.
4. Dirba, J., Ketners, K. *Elektriskās mašīnas*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2009. 534 lpp. ISBN 9789984325569.
5. Hamming R.W. *Numerical methods for scientists and engineers*. 2<sup>nd</sup> Edition. New York: Dover Publications, 1987, 752 p. ASIN 0486652416.
6. Houston Knott, D. G., *Interpolating Cubic Splines*. 1st edition. Boston: Birkhäuser Boston, 1999, 240 p. ISBN 0817641009.
7. Hsu, C., Huang, Y., Hsieh, M., Fu, C., et al. Transformer sound level caused by core magnetostriction and winding stress displacement variation. *AIP Advances*. 2017, vol. 7, no. 5, pp. 1–7. ISSN 2158-3226. Available from: doi:10.1063/1.4978759.
8. Ibarguengoytia, P. H., Linan, R., Pascacio, A. *Probabilistic vibration models in the diagnosis of power transformers*. InTech, 2011. 236 p. ISBN 978-953-307-696-6.
9. Jin M., Pan J., Huang H., Zhou J. Transmission of vibration of a power transformer from the internal structures to the tank. **In:** *Proceedings of Acoustics 2012, Fremantle: School of Mechanical and Chemical Engineering, Australia, Fremantle, November 21–23, 2012*. Fremantle, 2012, pp. 1–7, ISBN 9780646590394.
10. Jin, M., Pan, J., Huang, H., Zhou, J. Vibration transmission from internal structures to the tank of an oil-filled power transformer. *Applied Acoustics*. 2016, vol. 113, no. 1, pp. 1–6. ISSN 0003-682X.
11. Liu, M., Hubert, O., Mininger, X., Bouillault, F., et al. Reduction of Power Transformer Core Noise Generation due to Magnetostriction Induced Deformations using Fully Coupled Finite Element Modeling Optimization Procedures. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2017, vol. 53, no. 8, pp. 1–4. ISSN 0018-9464. Available from: doi:10.1109/TMAG.2017.2687409.
12. Marks J., Vitolina S. Modelling of Magnetostriction of Transformer Magnetic Core for Vibration Analysis. *Open Physics*. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 803–808. ISSN 2391-547, Available from: DOI: 10.1515/phys-2017-0094.
13. Marks J., Vitolina S., Dirba J. Magnetostrictive Vibration Model for Evaluation of Mechanical Integrity of Power Transformer Magnetic Core. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2019, vol. 56, no. 3, pp. 13–25. ISSN 0868-8257, Available from: DOI: 10.2478/lpts-2019-0016.

14. Marks, J., Vitolina S. Dynamic Genetic Algorithm in Model for Vibrations of Power Transformer Windings. **In:** *10th International Conference of Exposition on Electrical and Power Engineering, Romania, Iasi, October 18–19, 2018*. IEEE, 2018, pp. 52–57, ISBN 978-1-5386-5061-5.
15. Metwally, I. A. Failures, Monitoring and New Trends of Power Transformers. *IEEE Potentials*. 2011, vol. 30, no. 3, pp. 36–43. ISSN 0278-6648. Available from: doi:10.1109/MPOT.2011.940233.
16. Nicholson, W. K. *Linear Algebra with Applications*. 6<sup>th</sup> edition. New York: McGraw Hill Higher Education, 2009. 544 p. ISBN 978-0070985100.
17. Schoenekess, H., Ricken, W., Becker, W. Influences of Magnetostriction and Magnetisation State on Strain and Force Measurement with Eddy-Current Sensors Applied to Steel Reinforced Concrete., Berlin, Germany, Sept. 16–19, 2003 **In:** *International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering NDT-CE, Germany, Berlin, September 16–19, 2003*. Berlin: DGZfp, 2003, pp. 1–5, ISBN 3931381498.
18. Shengchang, J., Lingyu, Z., Yanming, L. Study on transformer tank vibration characteristics in the field and its application. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*. 2011, vol. 87, no. 2, pp. 205–211. ISSN 033-2097.
19. Shi, Y., Lu, W., Zhang, F., Dang, Y., et al. Diagnosis of Transformer Winding Looseness Based on Vibration Sensor Array. **In:** *2018 Condition Monitoring and Diagnosis, Australia, Perth, September 23–26, 2018*. IEEE, 2018, pp. 1–5, ISSN 0000-2016. Available from: doi:10.1109/CMD.2018.8535884.
20. Sokolov, V., Lpaworth, J., Harley, J., Guuinic, P., et al. *Life Management Techniques for Power Transformers*. CIGRE, 2003. 133 p.
21. Suwanasri, T., Chaidee, E., Adsoongnoen, C. Failure Statistics and Power Transformer Condition Evaluation by Dissolved Gas Analysis Technique. **In:** *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, China, Beijing, April 21–27*. IEEE, 2008, pp. 1–8. ISBN: 978-1-4244-1621-9.
22. Sweetser, C., McGrail, T. *Sweep Frequency Response Analysis Transformer Applications*. Watertown: Boble Engineering Company, 2003. 47 p.
23. Tenbohlen, S., Stirl, T., Bastos, G., Baldauf, J., et al. Experienced-based Evaluation of Economic Benefits of On-line Monitoring Systems for Power Transformers. **In:** *Cigre 2002, France, Paris*. Cigre, 2002, pp. 1–8.
24. Vitolina, S., Jakovleva, J. Classification of power transformers' faults in Latvian electrical transmission network. **In:** *52<sup>nd</sup> Annual International Scientific Conference of Riga Technical University, Latvia, Riga*. 2011, 1.–4. pp.
25. Yuan, S., Gao, X., Li, J., Mu, X., et al. Magnetic Domain Motion and Magnetostriction in the Fe–Ga Sheets. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015, vol. 51, no. 11, pp. 1–4. ISSN 0018-9464. Available from: doi:10.1109/TMAG.2015.2442294.
26. Zhang, P., Li, L., Cheng, Z., Tian, C., et al. Study on Vibration of Iron Core of Transformer and Reactor Based on Maxwell Stress and Anisotropic Magnetostriction.

*IEEE Transactions on Magnetics*. 2019, vol. 55, no. 2, pp. 1–5. ISSN 0018-9464.  
Available from: doi:10.1109/TMAG.2018.2875017.

27. Zhu, L., Yang, Q., Yan, R., Yang, Q. Numerical Analysis of Vibration due to Magnetostriction of Three Phase Transformer Core. **In:** *2012 Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications, China, Liaoning, Dalian, June 19–21, 2012*. IEEE, 2012, pp. 1–4, ISBN 978-1-4673-1335-3.
28. Zviedris, A. Datorrealizācijas matemātiskās metodes: Lekciju konspekts. Rīga: Rīgas Tehniskā universitāte, 2001. 73 lpp.
29. Методические указания по оценке состояния и продлению срока службы силовых трансформаторов. РД ЭО 0410-02, концерн “РОСЭНЕРГОАТОМ”, 2002.