

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 darbs

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

RTU Izdevniecība
Rīga 2019

Pateicība

Promocijas darbs ir izstrādāts Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātes Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūtā.

Vēlos izteikt vislielāko pateicību promocijas darba zinātniskajai vadītājai profesorei Dr. sc. ing. Sandrai Vītoļiņai par neizmērāmu atbalstu un profesionalitāti visā promocijas darba veidošanas periodā, kā arī vienreizēju pretimnākšanu, neatlaidīgu darbu un spēju motivēt pilnveidot un uzlabot jau sasniegto, kā rezultāti ir vērojami visā periodā, sākot ar bakalaura studijām līdz doktorantūras studiju beigu etapiem.

Liels paldies profesoram Dr. sc. ing. Kārlim Ketneram par sadarbību doktorantūras studiju priekšmeta “Pārejas procesi maiņstrāvas elektriskajās mašīnās” ietvaros, lai apgūtu programmatūras *Matlab Simulink* darbību.

Paldies asociētajam profesoram Dr. sc. ing. Andrejam Podgornovam par zināšanu sniegšanu elektrisko mašīnu magnētisko lauku modelēšanā un materiālu anizotropijas simulēšanā.

Vislielākais paldies ģimenei par sapratni un atbalstu visā promocijas darba īstenošanas periodā.

Anotācija

Promocijas darbā izstrādātais vibrāciju modelis ir balstīts uz transformatora elektrodinamisko spēku iespaidā radīto vibrāciju tinumos un magnetostrīcijas efekta dēļ radīto vibrāciju magnētavadā matemātisko modelēšanu. Modelī tiek izveidota lieljaudas transformatora aktīvās daļas mehāniska konfigurācija, kura rada ekvivalentas vibrāciju vērtības iegūtajiem rezultātiem uz transformatora tvertnes virsmas. Tādejādi iespējams izmantojot tvertnes virsmas vibrāciju datus, simulēt un lokalizēt radušos mehāniskos defektus transformatora aktīvā daļā.

Transformatora vibrāciju modeļa sekmīgai darbībai ir izstrādāts attiecīgo transformatoru magnētiskā lauka modelis, kas ir īstenots *COMSOL* programmatūrā. Tas sniedz informāciju par transformatora magnētiskā lauka magnētiskās indukcijas vērtībām tinumos un magnētavadā, kā arī strāvas blīvuma vērtībām transformatora tinumos.

Izstrādātā vibrāciju modeļa ietvaros ir izveidota masu un atsperu sistēma, kas ir nepieciešama, lai modelētu transformatora tinumu un magnētavada mehāniskas kustības elektrodinamisko spēku un magnetostrīcijas efekta iespaidā. Šī sistēma ir radīta, lai tā varētu simulēt vibrācijas gan divdimensionālā telpā, kas ir vajadzīga, lai simulētu tinumu radītās vibrācijas, gan trīsdimensionālā telpā, kas ir izveidota magnētavada radīto vibrāciju simulācijai.

Transformatora tinumu un magnētavada vibrāciju simulācijas ekvivalentu vērtību atrašanai tiek piemērots dinamisks ģenētisks algoritms. Tā darbības iespaidā tiek mainīti masu un atsperu sistēmas atsperu stinguma koeficienti, lai atrastu šīs sistēmas konfigurāciju, kas rada vienlīdzīgas vērtības reģistrētajām uz transformatora tvertnes virsmas. Šī algoritma darbība ir balstīta uz nejaušu sistēmas konfigurācijas izmaiņu ieviešanu, kuru pozitīva ietekme uz rezultātu tiek atbalstīta, bet izmaiņas ar negatīvu ietekmi, dzēstas. Dinamisks ģenētiskais algoritms ir vajadzīgs, jo izveidotai masu un atsperu sistēmas konfigurācijai nav noteiktas korelācijas ar simulēto vibrāciju vērtībām, un iespējamo variāciju skaits ir pārāk liels, lai būtu iespējams tās visas simulēt.

Izstrādātais vibrāciju modelis ir izmantots, lai iegūtu rezultātus 5 lieljaudas transformatoriem, kuros ietilpst slēdzieni atsevišķiem to aktīvo daļu reģioniem un vibrāciju aproksimācijas vizualizācija. Šie transformatori ir izvēlēti ar atšķirīgām tvertnes virsmas vibrāciju vērtībām, kur vairākos gadījumos tās pārsniedz uzdotās robežvērtības vai ir tuvas tām. Šāda pieeja ļauj pārliccināties par transformatora vibrāciju modeļa pareizu darbību atšķirīgos gadījumos.

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tas satur ievadu, 7 nodaļas, rezultātus un secinājumus. Darba apjoms ir 117 lappuses, kurās ir ietverti 59 attēli un 33 tabulas. Ir izmantoti 103 literatūras avoti, kas uzrādīti izmantotās literatūras sarakstā.

Abstract

A vibration model is developed in the doctoral thesis that is based on the mathematical modelling of vibrations caused by the transformer due to electrodynamic forces existing in the windings and magnetostrictive effects occurring in the magnetic core. A mechanical configuration of the active part of a large transformer is created within this model, which creates equivalent vibration values for the obtained results on the surface of the transformer tank.

Therefore, it is possible to simulate and localize the existing mechanical defects within the active part of the transformer by using the vibration data on the tank surface.

Magnetic field model of the corresponding transformers is developed and implemented in COMSOL software for successful operation of the transformer vibration model. It provides information about the values of magnetic induction of the transformer magnetic field in the windings and the magnetic core as well as the current density values in the transformer windings.

A system of masses and springs is created within the developed vibration model, which is required to simulate the mechanical movements of the transformer winding and the magnetic core under the influence of electrodynamic forces and the magnetostrictive effect. This system is created for it to be possible to simulate vibrations in both the two-dimensional space needed to simulate vibrations caused by windings and the three-dimensional space designed to simulate vibrations generated by the magnetic core.

A dynamic genetic algorithm is applied to find the equivalent vibration values of transformer windings and magnetic core simulation. The stiffness coefficients of the springs of mass and spring system are altered to find the configuration of this system as a result of this algorithm, which produces equivalent values to those recorded on the surface of the transformer tank. The operation of this algorithm is based on introduction of random changes to the system configuration. The positive effects of this process are supported, but changes with negative effects are deleted. A dynamic genetic algorithm is needed because the configuration of the created mass and spring system does not have any correlation with the simulated vibration values and the number of possible variations is too large to simulate them all.

The developed vibration model is used to obtain results for 5 large power transformers. These results include conclusions for individual regions of their active parts and visualization of vibration approximation. These transformers are selected with different vibration values on tank surface, which in many cases exceed or are close to the specified limits. This approach allows to verify the correct operation of the transformer vibration model in different cases.

The dissertation is written in Latvian, it contains an introduction, 7 chapters, results and conclusions. The thesis consists of 117 pages, which include 59 figures and 33 tables. 103 sources of literature have been used, that are listed in the list of used literature.

Saturs

IEVADS	7
Tēmas aktualitāte.....	7
Darba mērķis un uzdevumi	7
Darba zinātniskā novitāte	8
Darba praktiskā nozīme.....	8
Pētījuma līdzekļi un metodes	9
Darba aprobācija	9
Autora publikācijas	9
Darba struktūra un apjoms	10
1. LIELJAUDAS TRANSFORMATORU MEHĀNISKIE DEFEKTI UN TO NOTEIKŠANAS IESPĒJAS.....	11
1.1. Izklāsts par lieljaudas transformatoru mehāniskajiem defektiem	11
1.2. Diagnostikas metožu izvērtējums mehānisko defektu noteikšanai.....	16
1.3. Transformatora radīto vibrāciju mērījumi un rezultātu izvērtēšana.....	19
2. TRANSFORMATORA VIBRĀCIJU MODELIS MEHĀNISKO DEFEKTU NOTEIKŠANAI.....	23
2.1. Modeļa kopskats.....	23
2.2. Raksturlielumi transformatora vibrāciju modeļa īstenošanai.....	26
2.2.1. Transformatora nominālie dati.....	26
2.2.2. Transformatora aktīvās daļas ģeometrija	27
2.2.3. Transformatora tvertnes virsmas vibrāciju mērījumu dati.....	28
3. VIBRĀCIJU MĒRĪJUMU DATU APROKSIMĀCIJA UN VIZUALIZĀCIJA.....	30
4. TRANSFORMATORA MAGNĒTISKĀ LAUKA RAKSTURLIELUMU UN ELEKTRODINAMISKO SPĒKU APRĒĶINĀŠANA	37
4.1. Transformatora magnētiskā lauka modelēšanas nepieciešamība	37
4.2. Magnētiskā lauka aprēķinu teorētiskie aspekti.....	37
4.3. Transformatora magnētiskā lauka modeļa izveide.....	40
4.3.1. Programmatūras rīki transformatora magnētiskā lauka modeļa izveidei....	40
4.3.2. Transformatora magnētiskā lauka modeļa darbības kopsavilkums un veiktie pieņēmumi.....	42
4.3.3. Ģeometrijas izveide un domēnu un materiālu definēšana	44

4.3.4.	Galīgo elementu režģa definēšana un izveide.....	46
4.4.	Elektrodinamisko spēku aprēķins.....	48
5.	VIBRĀCIJU SIMULĀCIJA AR MASU UN ATSPERU SISTĒMĀM	50
5.1.	Tinumu masu un atsperu sistēma	50
5.2.	Magnētvida masu un atsperu sistēma	55
5.3.	Dinamisks ģenētiskais algoritms stinguma koeficientu noteikšanai masu un atsperu sistēmā	61
5.3.1.	Ģenētisko algoritmu struktūra un darbības principi.....	61
5.3.2.	Dinamiskā ģenētiskā algoritma izveide	63
6.	FAZILOĢIKAS IZMANTOŠANA TRANSFORMATORA VIBRĀCIJU MODEĻA REZULTĀTU ĢENERĒŠANAI.....	67
6.1.	Faziloģikas struktūra un darbības pamatprincipi	67
6.2.	Transformatora vibrāciju modeļa slēdziena ģenerēšanas bloks	69
6.2.1.	Slēdziena iegūšanas pamatprincipi	69
6.2.2.	Neiederošo vibrāciju mērījumu rezultātu bloks.....	70
6.2.3.	Vibrāciju rezultātu salīdzināšanas faziloģikas bloks	73
6.2.4.	Tinumu mehāniskā defekta noteikšanas faziloģikas bloks	75
6.2.5.	Mehānisko defektu noteikšana magnētvidā	78
6.2.6.	Papildu izvērtēšana slēdziena ģenerēšanai.....	79
7.	TRANSFORMATORA VIBRĀCIJU MODEĻA REZULTĀTI.....	81
7.1.	Aprēķina piemērs vienam transformatoram.....	81
7.2.	Izstrādātā vibrāciju modeļa rezultāti	99
	SECINĀJUMI	107
	IZMANTOTĀ LITERATŪRA	109

IEVADS

Tēmas aktualitāte

Lieljaudas transformatori ir nozīmīgi elektriskās sistēmas elementi. Tiem ir salīdzinoši sarežģīta konstrukcija un attiecīgi var rasties dažāda tipa bojājumi [57], 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 atteicu [88]. *CIGRE* veiktā pētījumā pierādīts, ka no apskatītajām atteicēm 19 % gadījumos iemesls bija tinumi, 3 % – magnētvars [84]. Savukārt Taizemē veiktā pārbaudē šie defekti bija 2,03 % no visām atteicēm [15]. Veiktā pētījuma [92] 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 atteicu 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, laikietilpīgs 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 turpmākajām 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 [85]. Turklāt nav iespējams noteikt defekta atrašanās vietu precīzāk par atsevišķu transformatora fāzi [2]. 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 [43]. Savukārt nav iespējams uzzināt informāciju par radītajām vibrācijām transformatora aktīvajā daļā, jo tai transformatora darbības laikā ar nepieciešamo vibrāciju sensoru nav iespējams piekļūt [76].

Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir izveidot jaunu vibrāciju modeli lieljaudas transformatora tinumu un magnētvara 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 matemātisks 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 mehānisko defektu 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 magnētavadā;
- 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 magnētvasda presējuma līmeņa samazināšanos u. c.;
- atrast mehānisko defektu novietojumu transformatora aktīvās daļas robežās;
- sniegt slēdzieni par turpmāku transformatora diagnostikas pārbaužu veikšanu.

Pētījuma līdzekļi un metodes

Promocijas darba izstrādē ir izmantotas Ņūtona polinomu un splainu 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 13th 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 IEEEExplore, 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 IEEEExplore, 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 IEEEExplore, 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.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tas satur ievadu, 7 nodaļas, rezultātus un secinājumus. Darbā apjoms ir 117 lappuses, kurās ir ietverti 59 attēli un 33 tabulas. Ir izmantoti 103 literatūras avoti, kas uzrādīti izmantotās literatūras sarakstā.

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 sekojošos tipos:

- termiskie – piemēram, transformatora cietās izolācijas degradācija, karstie punkti transformatora tinumos;
- elektriskie – piemēram, īsslēgumi starp individuāliem tinuma vijumiem, lokalizētas daļējās izlādes;
- mehāniskie – piemēram, transformatora tinumu atslābšana un nobīde, magnētvasda laminācijas atslāpošanās;
- ārējie – defekti, kuru sākotnējais cēlonis, kurš rada transformatora bojājumus, atrodas ārpus tā konstrukcijas.

CIGRE veiktajā pētījumā pierādīts, ka no apskatītajām atteicēm 19 % gadījumos iemesls bija tinumi, 3 % – magnētvasds [84]. Šie abi elementi veido transformatora aktīvo daļu. Savukārt Taizemē veiktajā pārbaudē šie defekti bija 2,03 % no visām atteicēm [15]. Brazīlijā veiktajā pētījumā aktīvās daļas defekti radīja 30 % transformatoru atteicu [88]. Veiktā pētījuma [92] 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 atteicu skaita daļu.

Šis darbs ir fokusēts uz transformatora mehāniskajiem defektiem tā aktīvā daļā, tādēļ ir būtiski izprast šī defektu tipa rašanās cēloņus. Lieljaudas transformatoru darbības laikā tinumos plūst maiņstrāva, un to ģeometriju šķēļ transformatora radītā magnētiskā lauka izkliedes plūsma. Magnētiskā lauka izkliedes plūsmas komponentes vērtība ir apgriezti proporcionāla magnētisko vadītspēju proporcijai, jo transformatora magnētvasda magnētiskā caurlaidībai un pārējo aktīvās daļas elementu magnētiskai caurlaidībai eksistē kāda proporcija [22]. Šī procesa dēļ transformatora tinumi ir pakļauti elektrodinamiskiem spēkiem, kuriem ir sekojošas īpašības [9], [96]:

- periodiski mainīgas vektoriālās amplitūdu vērtības;
- vērtību izmaiņas frekvence ir dubulta transformatoram pievadītā sprieguma frekvencei;
- vektoriālās vērtības katrā to perioda intervālā saglabā noteiktu virzienu;
- amplitūdas ir proporcionālas tinumos plūstošās strāvas kvadrātam;
- eksistē izteiktas radiālas un aksiālas komponentes, kuru ietekme ir atkarīga no noteiktā tinumu ģeometrijas fragmenta;
- ietekmes rezultātā, transformatora tinumi rada mehāniskas vibrācijas;
- var radīt transformatora tinumu mehāniskus bojājumus, kad to vērtības pārsniedz transformatora tinumu stiprinājumu konstrukcijas mehāniskās izturības līmeni.

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 magnētvasda konfigurācijas un transformatora darba režīms [19], [35], [42].

Jāatzīmē, ka transformatoram paredzētu darba režīmu laikā elektrodinamisko spēku radītās vibrācijas var pakāpeniski izraisīt tādu tinumu mehāniskos defektus kā [6], [23], [60]:

- tinumu presējuma atslābšana;
- tinumu cietās izolācijas bojājums;
- lokāls īsslēgums starp atsevišķiem tinuma vijumiem;
- tinumu izvadu kontaktu bojājums;
- tinuma vijumu šķērssgriezuma laukuma izmaiņa.

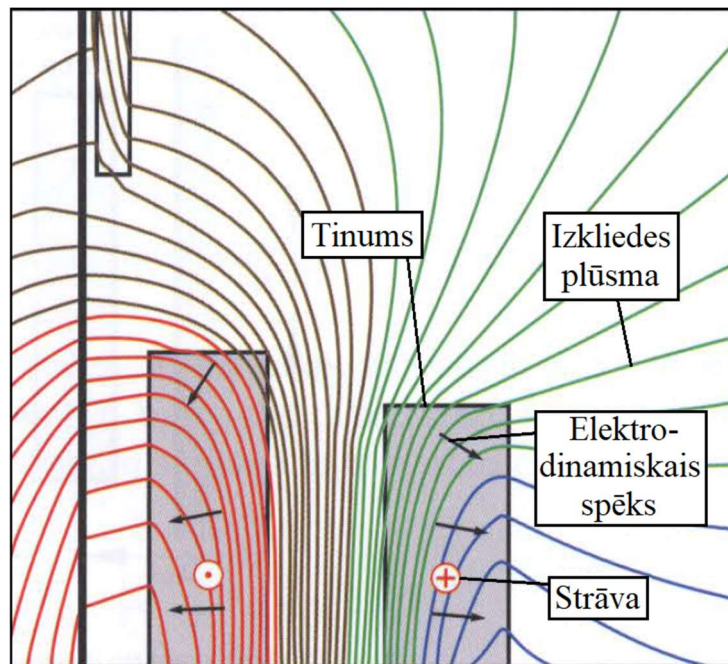
Savukārt, īsslēguma gadījumā elektrodinamisko spēku vērtības var pieaugt vairākkārtīgi. Līdz ar to, var rasties mehāniskie bojājumi, kuri noteiktā tinumu reģionā izsauc tinumu deformācijas.

Jāatzīmē, ka transformatora tinumu mehānisko defektu klātbūtne var darboties kā cēlonis cita veida defekta attīstībā. Piemēram, tinumu presējuma atslābšana palielina tinumu kustību transformatora darbības laikā, kā rezultātā var tikt bojāta tinumu atsevišķo vijumu cietā izolācija, kas var novest pie tinumu lokāla īsslēguma veidošanās, skat. ilustrāciju 1.1. attēlā [59]. Papildus, samazināts tinumu presējuma līmenis var radīt bojājumus tinumu izvadu kontaktos, jo to viena savienojuma puse transformatora darbības laikā tiek pakļauta nepārtrauktām paaugstinātas amplitūdas vibrācijām.



1.1. att. Lokāla starpvijumu īsslēguma pozīcija uz tinuma struktūras.

Tā kā elektrodinamisko spēku ietekmi uz transformatora tinumiem var sadalīt to radiālās un aksiālās komponentēs, šo spēku ietekme ir atšķirīga tinumu vidus reģionā vai reģionos tuvāk to apakšējām vai augšējām ģeometrijas beigām. Kopējo elektrodinamisko spēku virzienu ir iespējams redzēt 1.2. attēlā, kurā, tuvojoties transformatora tinuma ģeometrijas beigām, elektrodinamisko spēku vektora virziens mainās, jo palielinās tā aksiālā komponente [10].



1.2. att. Elektrodinamisko spēku vektora virziena maiņa.

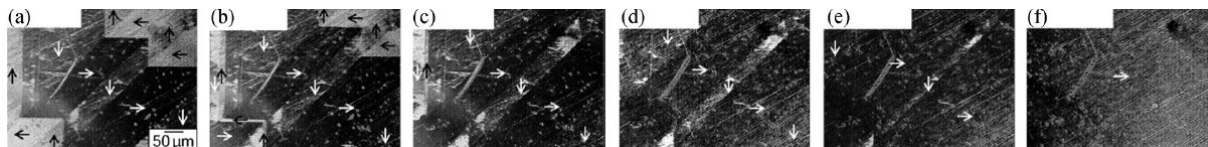
Līdz ar to, mehānisko defektu iespējamā rašanās ir atkarīga no katra tinumu fragmenta novietojuma. Piemēram, ja tinumu presējuma mehāniskā izturība ir augstāka tinumu radiālā virzienā nekā aksiālā, tad tinumu presējuma atslābšana var notikt intensīvāk tinumu ģeometrijas galos. Šo elektrodinamisko spēku komponentu attiecīgā ietekme ir atkarīga no tinumu mehāniskām raksturīpašībām.

Lieljaudas transformatoru magnētqvads tiek veidots no materiāla, kuram ir salīdzinoši lielāka magnētiskā vadītspēja attiecībā pret citiem transformatora aktīvās daļas elementiem. Šāda materiāla raksturīpašība ir nepieciešama, jo ir vajadzīgs pārvadīt maksimāli lielu primāro tinumu radīto magnētiskā lauka plūsmu caur sekundāriem tinumiem. Ja magnētqvada magnētiskā caurlaidība ir mazāka, tad lielāka daļa radītās magnētiskās plūsmas noslēdzas caur tinumu konstrukciju un transformatora izolāciju. Līdz ar to kā transformatora magnētqvada materiāls tiek lietots elektrotehniskais tērauds [74].

Elektrotehniskam tēraudam mikroskopiskā struktūra sastāv no domēniem, kuriem katram ir izteikta magnētiskā polarizācija. Tas ir skaidrojams ar to, ka šie domēni sastāv no individuālām molekulām, kurām katrai ir arī eksistē sava magnētiskā polarizācija un noteikti izmēri šīs polarizācijas garenvirzienā un šķērsvirzienā. Savukārt katra elektrotehniskā tērauda domēna ietvaros esošo molekulu magnētiskām polarizācijām ir viens virziens [34].

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. Šis process notiek, jo atšķirīgo virzienu domēnu gadījumā tajos esošās molekulas, kuras atrodas pie domēna ģeometrijas robežas, maina savu virzienu tā, lai tas sakristu ar ārējā magnētiskā lauka virzienu.

Līdz ar to, šīs molekulas, nepārvietojas, bet veic rotāciju un kļūst par blakus esošā domēna sastāvdaļu, kura magnētiskā polarizācija sakrīt ar ārējo magnētisko lauku. Šis process ir vizualizēts 1.3. attēlā, kur materiāls tiek pakļauts pieaugošam magnētiskam laukam, kura plūsmas virziens ir no kreisās attēla puses uz labo pusi.



1.3. att. Materiāla domēnu magnētiskās polarizācijas izmaiņa [4]:

a) - f) pastāvīgi pieaugoša magnētiskā lauka magnētiskās indukcijas vērtība.

Molekulu izmēri magnētiskās polarizācijas garenvirzienā un šķērsvirzienā atšķiras, tāpēc domēnu izmaiņas gadījumā mainās materiāla ģeometriskā forma. Šis ir magnetostrīcijas process. Tā kopējā iedarbība uz magnētvara materiālu ir atkarīga no ārēji radītā magnētiskā lauka kā arī no magnētvarā izmantotā materiāla [97], [98]. Lieljaudas transformatora darbības laikā tā radītais magnētiskais lauks periodiski mainās. Līdz ar to magnetostrīcijas procesa dēļ transformatora magnētvars tiek pakļauts periodiskām tā ģeometrijas formas izmaiņām, kas rada tā vibrācijas, kurām ir izteikta galvenā harmonika, kas ir četrkārtā pievadītā sprieguma frekvencei [50].

Tā kā magnetostrīcijas process ir atkarīgs no ārēji radītā magnētiskā lauka, magnētvara materiāla ģeometriskos izmēru izmaiņu nosaka funkcija

$$\Delta l = f(B), \quad (1.1)$$

kur Δl – materiāla izmēra izmaiņa, m;

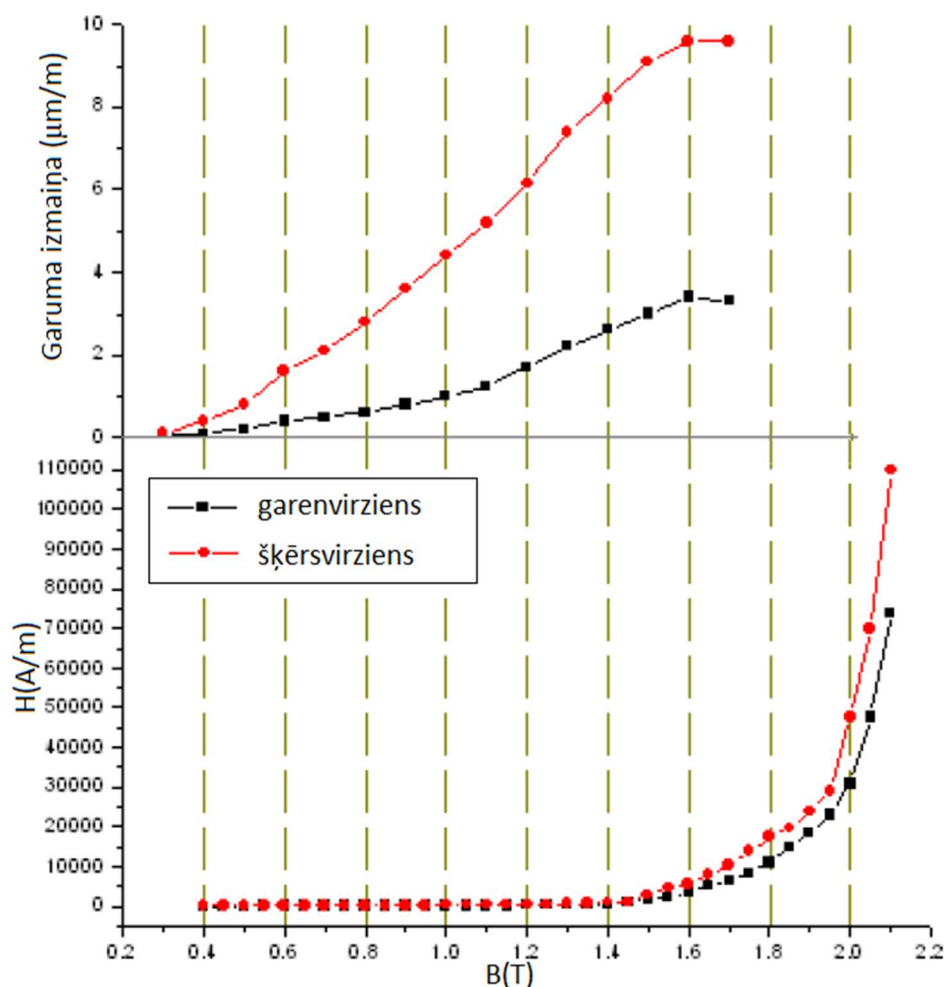
B – ārējā lauka radītā magnētiskā indukcija, T.

Šī funkcija nav precīza matemātiska izteiksme, jo elektrotehniskā tērauda domēnu magnētiskās polarizācijas virzieniem ir gadījuma raksturs. Līdz ar to, nav iespējams matemātiski noteikt precīzu materiāla deformācijas izmaiņas amplitūdu atkarībā no magnētiskās indukcijas vērtības.

Jāatzīmē, ka šī materiāla mijiedarbība ar magnētisko lauku ir atšķirīga tā garenvirzienā un šķērsvirzienā. Tas ir skaidrojams ar to, ka materiāla domēnu molekulu rotācija var palielināt tā kopējo izmēru garenvirzienā, bet samazināt šķērsvirzienā. Turklāt, magnetostrīcijas procesam var būt arī negatīva izmēru izmaiņas sakarība, t.i. ir iespējama izmēru samazināšanās magnētiskā lauka garenvirzienā. Tādā gadījumā izteiksmei (1.1) ir negatīva proporcionalitāte [78].

Kā papildus magnetostrīcijas procesa izmaiņu veidojošs faktors ir transformatora magnētvara struktūra. Tas tiek veidots no plāksnēm, kuras ir pārklātas ar izolācijas kārtu, un tā elektrotehniskam tēraudam var pastāvēt magnētiska anizotropija. Līdz ar to, magnetostrīcijas radītās magnētvara ģeometriskos izmēru izmaiņas ir atšķirīga rakstura magnētiskā lauka plūšanas virzienā, magnētvara plāksņu šķērsvirzienā un magnētvara plāksņu garenvirzienā, kas

ir perpendikulārs materiāla anizotropijas virzienam. Kā redzams 1.4. attēlā, magnetostrīcijas radītās magnētvasda materiāla deformācijas ir pastiprinātas tā šķērsvirzienā [100].



1.4. att. Materiāla garuma izmaiņa atkarībā no magnētiskā lauka intensitātes un indukcijas.

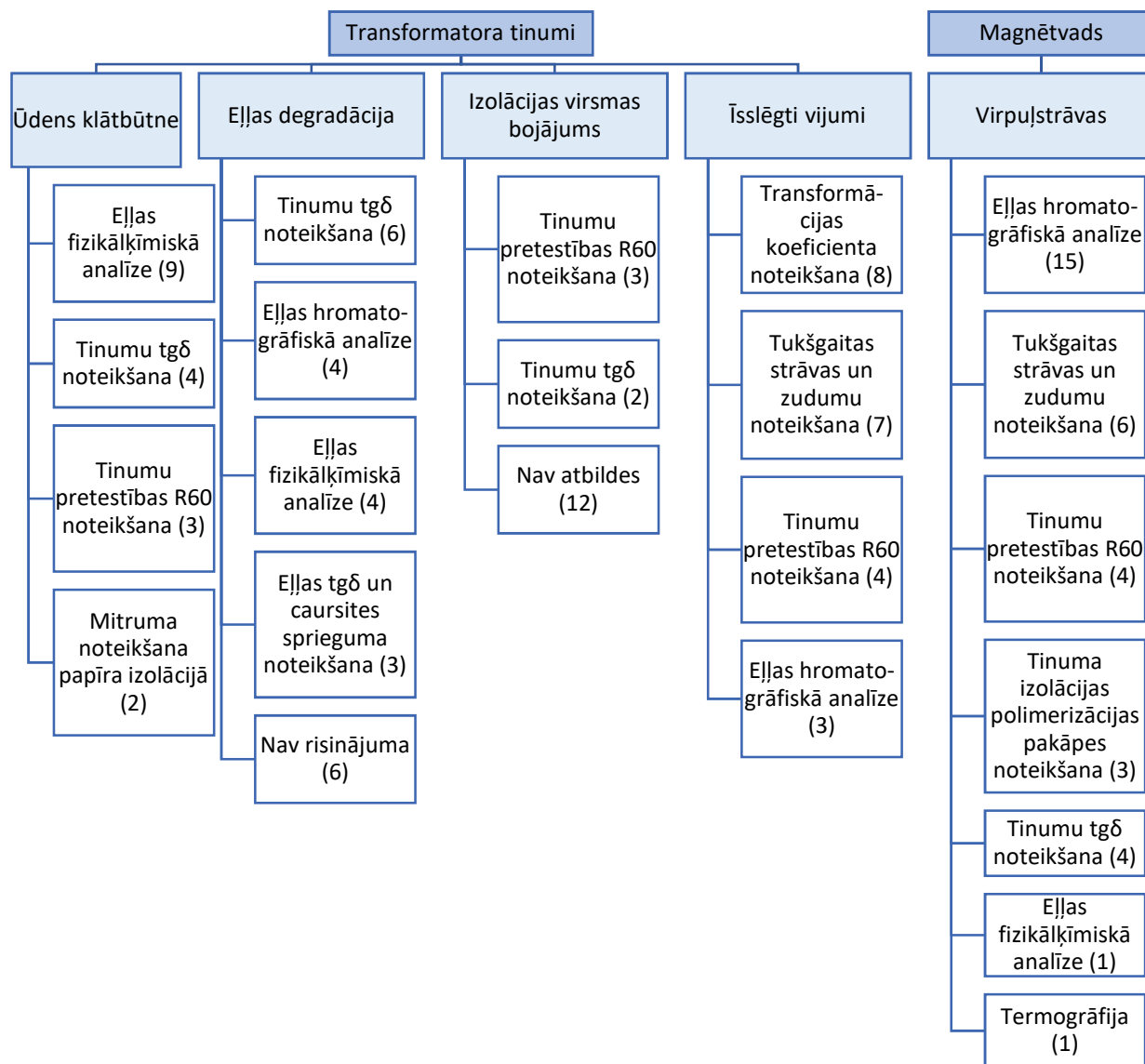
Magnetostrīcijas procesa radītās vibrācijas ilgā laika posmā var samazināt magnētvasda mehānisko stiprinājumu izturību. Tā rezultātā vibrāciju amplitūda var pieaugt, jo magnētvasds joprojām maina savas ģeometriskos izmērus atkarībā no magnētiskās indukcijas, bet mehāniskā stiprība tā saturošām konstrukcijām ir samazinājusies.

Rezultātā transformatora magnētvasda laminētās kārtas var atslāņoties vai laminācijas slāņi var zaudēt savas dielektriskās īpašības, kas var izraisīt magnētvasda elektrotehniskā tērauda slokšņu kontaktu [59]. Šis kontakts palielina virpuļstrāvu vērtību šajā reģionā, kas palielina magnētvasda temperatūru, kas var paātrināt citu magnētvasda defektu rašanos un to reģionu pieaugumu.

Var secināt, ka lieljaudas transformatoriem ir iespējami atšķirīgi mehāniskie defekti to tinumu un magnētvasda struktūrā, kuru iedarbība samazina transformatora mehānisko izturību un darbības drošumu. Līdz ar to, ir nepieciešamība pēc transformatoru diagnostikas metodes, kas spēj noteikt mehāniskos defektus, neatverot transformatora tvertni.

1.2. Diagnostikas metožu izvērtējums mehānisko defektu noteikšanai

Veicot literatūras izpēti, ir apzinātas diagnostikas metodes, lai noteiktu mehāniskus defektus tinumos un magnētavadā. *CIGRE* pētījuma [82] rezultāti par energosistēmās izmantotajām diagnostikas metodēm ir apkopoti 1.5. attēlā, kur iekavās norādīts aptaujāto ekspertu skaits, kuri noteiktam transformatora defektam izmanto attiecīgo diagnostikas metodi.



1.5. att. Diagnostikas metodes transformatora tinumu un magnētavada defektu noteikšanai.

Lai izvērtētu, vai ar ekspertu izmantotajām metodēm [82] ir iespējams noteikt tieši transformatoru mehāniskos defektus, ir papildus veikta literatūras izpēte, kuras rezultāti apkopoti 1.1.1. tabulā.

Diagnostikas metožu pielietojums mehānisko defektu noteikšanai

Diagnostikas metode	Pielietojuma apraksts	Iespēja noteikt mehānisku defektu
Eļļas hromatogrāfiskā analīze	<p>Identificēt pastiprinātu silšanu eļļas reģionā, kas sekmē metāna (CH_4), etāna (C_2H_6) un etilēna (C_2H_4) izdalīšanos transformatora eļļā.</p> <p>Identificēt daļējās izlādes, kas rosina ūdeņraža (H_2), metāna (CH_4) kā arī mazos daudzumos acetilēna (C_2H_2) un etāna (C_2H_6) izdalīšanos.</p> <p>Pastāvīgu dzirksteļošanu, kas ietekmē ūdeņraža (H_2), acetilēna (C_2H_2) un etilēna (C_2H_4) izdalīšanos.</p> <p>Kā arī pastiprinātu silšanu cietajā izolācijā, kuras sekas ir oglekļa monoksīda (CO) un oglekļa dioksīda (CO_2) izdalīšanās [24], [37], [47], [83], [93].</p>	Tiešā veidā nevar noteikt mehāniskos defektus transformatora aktīvajā daļā, bet pastāvīga dzirksteļošana var liecināt par mehāniskām izmaiņām transformatora tinumu konstrukcijā. Nav iespējams noteikt potenciālo mehānisko defektu atrašanās vietu.
Eļļas fizikālķīmiskā analīze	<p>Noteikt transformatora eļļas skābes līmeni, kas veicina oksidēšanās procesu uz iekšējām transformatora konstrukcijām saskarsmē ar eļļu [87], [73].</p> <p>Novērtēt mehānisko daļiņu esamību. Tās var rasties no pārāk lielas temperatūras, tā rezultātā rodas mehāniskas oglekļa daļiņas, kā arī kustīgu detaļu nodiluma rezultātā [48].</p> <p>Noteikt antioksidantu koncentrāciju eļļā, kas nosaka tās fizikālo spēju oksidēties un potenciālo skābes līmeņa pieaugumu nākotnē [66]</p> <p>Noteikt izšķīdušo furānu koncentrāciju eļļā, kas raksturo papīra izolācijas tehnisko stāvokli – sadalīšanās pakāpi [16].</p>	Tiešā veidā nav iespējams noteikt mehāniskos defektus aktīvā daļā, bet relatīvi spēcīgu mehānisko deformāciju rezultātā, var atdalīties mehāniskās daļiņas. Nevar noteikt defektu atrašanās vietu.
Tinuma izolācijas polimerizācijas pakāpes noteikšana	Noteikt papīra izolācijas tehnisko stāvokli un novecošanas līmeni. To raksturo polimerizācijas pakāpe, jo transformatora izolācijai novecojot, papīra struktūra pakāpeniski noārdās un polimēru ķēdes sadalās un paliek īsākas [12], [32].	Nav iespējams noteikt mehāniskos defektus transformatora aktīvā daļā, to atrašanās vietu.
Mitruma noteikšana papīra izolācijā	Noteikt, kāds ir ūdens mitruma līmenis transformatora tinumu papīra izolācijā, kas raksturo šīs izolācijas dielektrisko stāvokli [54].	Nav iespējams noteikt mehāniskos defektus transformatora aktīvā daļā, to atrašanās vietu.
Transformācijas koeficienta noteikšana	Tiek mērīts gan primārais, gan sekundārais spriegums, un aprēķināta transformācijas koeficienta vērtība. Ja koeficients atšķiras no uzdotās vērtības, vismaz vienā sprieguma pusē ir tinumu defekts [36].	Ir iespējams noteikt transformatora tinuma fāzi, kurā ir aizdomas par mehānisku defektu tinumos.

Diagnostikas metožu pielietojums mehānisko defektu noteikšanai

Diagnostikas metode	Pielietojuma apraksts	Iespēja noteikt mehānisku defektu
Tinumu tgδ noteikšana	Šī parametra noteikšana ļauj uzzināt sausās izolācijas novecošanas līmeni un elektrisko zudumus tajā [79].	Nav iespējams noteikt mehāniskos defektus transformatora aktīvā daļā, to atrašanās vietu.
Tinumu pretestības R_{60} noteikšana	Šī parametra noteikšana sniedz informāciju par transformatora cietās izolācijas dielektriskajām īpašībām [95].	Netiešā veidā var noteikt lokālus īsslēgumus transformatora tinumos, bet nav iespējams noteikt to precīzu atrašanās vietu.
Eļļas tgδ un caursites sprieguma noteikšana	Šo parametru noteikšana ļauj noteikt izolācijas novecošanas līmeni un elektrisko zudumus tajā, kas vispārīgi raksturo šo dielektriķu stāvokli. Caursites sprieguma vērtība nedrīkst pazemināties zem pieļaujamās, lai dielektriskā izolācija ir atzīta par atbilstošu [3], [13], [64].	Nav iespējams noteikt mehāniskos defektus transformatora aktīvā daļā, to atrašanās vietu.
Tukšgaitas strāvas un zudumu noteikšana	Nosaka tukšgaitas zudumus, kas galvenokārt ir magnētiskie histerēzes zudumi, virpīlstrāvu zudumi un zudumi primārajā tinumā [5], [14], [81].	Netiešā veidā ir iespējams noteikt magnētvasda deformācijas, ja virpīlstrāvu un histerēzes zudumi ir pieauguši, bet ne šo defektu, to precīzu atrašanās vietu.
Termogrāfija	Ar termogrāfiju ir iespējams ārēji diagnosticēt paaugstināta sasiluma vietas, kas liecina par iespējamiem bojājumiem attiecīgajos reģionos. Tie var būt sliktas kontaktvietas, nepareiza eļļas plūsma tvertnē vai mehāniskie bojājumi pie transformatora izvadiem [90].	Nav iespējams noteikt mehāniskos defektus transformatora aktīvā daļā, to atrašanās vietu.

Papildus ekspertu izmantotām diagnostikas metodēm ir apzinātas un 1.2. tabulā apkopotas citas metodes, kuras saistītas ar mehānisko defektu diagnosticēšanu transformatora aktīvajā daļā un kuru veikšana neparedz transformatora tvertnes atvēršanu vai transformatora daļēju izjaukšanu.

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.

Alternatīvu diagnostikas metožu apkopojums mehānisko defektu noteikšanai

Diagnostikas metode	Pielietojuma apraksts	Iespēja noteikt mehānisku defektu
Daļējo izlāžu noteikšana	Šī metode nosaka daļējo izlāžu esamību transformatora izolācijas slāņos, kas izsaka iespējamus defektus tinumu izolācijā [62], [86].	Mehānisko defektu rezultātā, ir iespējami cietās izolācijas struktūras bojājumi, kuru reģionos var izteikti parādīties daļējās izlādes, bet tas ir tikai viens no iespējamajiem cēloņiem, bieži nav iespējams noteikt defektu atrašanās vietu.
Īsslēguma pretestības noteikšana	Identificē, vai īsslēguma pretestība atbilst noteiktam vērtību diapazonam. Mazāka pretestība signalizē par iespējamām lokāliem starpvijumiem īsslēgumiem vai citām mehāniskām deformācijām [65]	Ir iespējams noteikt potenciālu mehānisko defektu esamību tinumos pie atšķirīgām īsslēguma pretestības vērtībām, bet nav iespējams noteikt defekta atrašanās vietu.
Transformatora tvertnes vibrāciju pārbaude	Mērījumus uz transformatora tvertnes veic, lai iegūtu informāciju par tā aktīvās daļas radītajām vibrācijām, kas raksturo transformatora tinumu un serdes mehānisko stāvokli. Vibrācijas sīkāk apskata kā harmoniku spektru, vibroātrumu, vibropaātrinājumu un vibropārvietojumu [1], [75], [76], [94]	Šī metode ir paredzēta, lai iegūtu informāciju par aktīvās daļas mehāniskajiem defektiem, jo pēc vibrāciju raksturlielumiem ir iespējams noteikt iespējamā defekta aptuvenu atrašanās vietu un veidu.
Frekvenču raksturlieknes analīze	Transformatoram pievada mazas amplitūdas sinusoidālu sprieguma signālu ar maināmu frekvenci. Izejošais signāls dod informāciju par transformatora tinumu un magnētvida mehānisko stāvokli [39], [41].	Ir iespējams noteikt mehāniska defekta esamību, bet nevar lokalizēt tā atrašanās vietu.

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 radīto vibrāciju amplitūdām un citiem to raksturlielumiem:

- 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 [77].

Cita pieeja ir izmantot vibrāciju sensorus, kuri ir iebūvēti transformatora konstrukcijā. Šādā veidā tiek panākts, ka aktīvās daļas vibrācijas tiek uztvertas tieši, bet šos vibrāciju sensorus nav iespējams pārvietot vai nomainīt, neizjaucot transformatora konstrukciju [46].

Izmantots tiek arī transformatora radīto vibrāciju uztveršanas paņēmiens ar vibrāciju sensoru uzstādīšanu noteiktā attālumā ārpus transformatora tvertnes, lai tie uztvertu tā radīto skaņu un tās raksturlielumus. Šāda pieeja ir neprecīzāka, kā iepriekš apskatītās, jo transformatora radītās vibrācijas no atšķirīgiem tā reģioniem saplūst, kas samazina uztverto vibrāciju informācijas precizitāti. Līdz ar to, šāda pieeja tiek izmantota gadījumos, kad ir jāierobežo transformatora radītā skaņa nevis jādiagnosticē tā aktīvās daļas mehāniskie defekti [27].

Vibrācijas kā objekta periodiskas kustības telpā ir iespējams raksturot ar jebkuru no to trim galvenajiem raksturlielumiem – vibropārvietojumu l , m, vibroātrumu v , m/s un vibropaātrinājumu a , m/s². Zinot vienu vibrāciju raksturlielumu, ir iespējams iegūt to pārējos raksturlielumus, izmantojot izteiksmes (1.2) un (1.3) [71].

$$a(t) = \frac{dv}{dt}, \quad (1.2)$$

$$v(t) = \frac{dl}{dt}. \quad (1.3)$$

Lieljaudas transformatoru diagnostikā tiek izmantoti visi uzskaitītie vibrāciju raksturlielumi, jo šī ir informācija par to, kā mehāniski kustas transformatora tinumi elektroīnamisko spēku ietekmē un magnētvars magnetostrīcijas dēļ. 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.

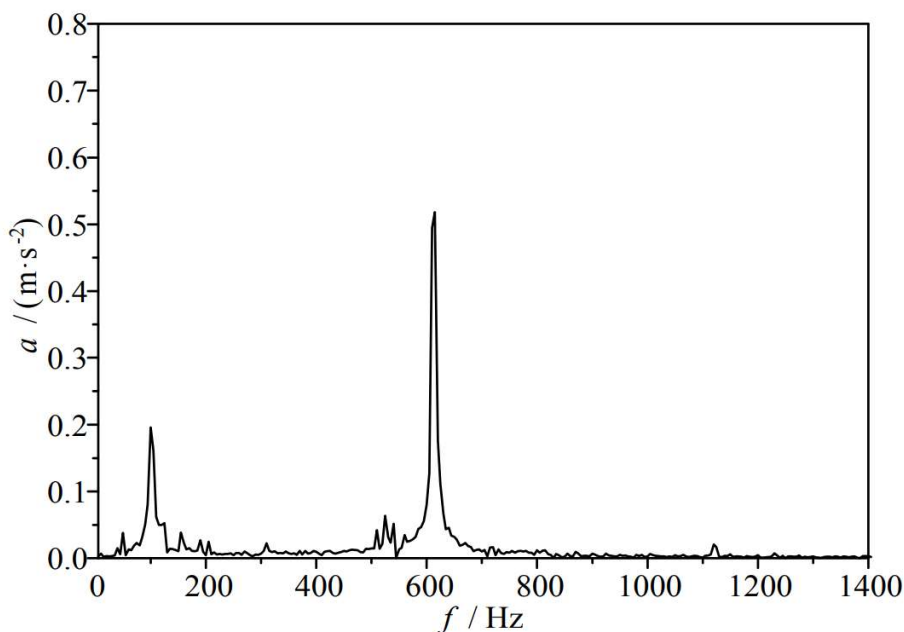
Tāpēc, izmantojot informāciju par visiem trim vibrāciju raksturlielumiem, var iegūt datus par mehānisko defektu esamību ar lielāku precizitāti.

Vibrāciju raksturlielumi var būt uzdoti gan kā kopējā vērtība, gan kā vibrāciju harmoniku spektrs. Vibrāciju kopējā vērtība sniedz vispārīgu raksturojumu par objekta kustību. Savukārt, vibrāciju harmoniku spektrs sniedz daudz detalizētāku informāciju par vibrācijām un ļauj noteikt atšķirīgo vibrāciju cēloņu avotu ietekmi uz kopējo vibrāciju vērtību [29].

Lieljaudas transformatoru gadījumā galvenā vibrāciju harmonika ir dubulta pievadītā sprieguma frekvencei. Tas ir skaidrojams ar to, ka elektroīnamiskie spēki, kuri rada vibrācijas transformatora tinumos, iedarbojas uz tiem katru pievadītā sprieguma pusperiodu. Savukārt, otrā harmonika signalizē par magnetostrīcijas efekta dēļ radītām vibrācijām transformatora magnētvarā. Ja tiek uztvertas harmonikas, kuras nav galvenās harmonikas reizinājums ar naturālu skaitli, tās tiek radītas no kāda cita vibrāciju ģenerējoša avota, piemēram, piespiedu dzesēšanas sistēmas kustīgiem elementiem.

Kā piemērs, 1.6. attēlā ir ilustrēti transformatora tvertnes virsmas vibropaātrinājuma a dati, kur vislielākā vērtība ir 600 Hz frekvences harmonikai, bet 100 Hz harmonikas amplitūda ir otrā lielākā. Tas skaidrojams ar to, ka šo datu ieguves laikā darbojās transformatora dzesēšanas

ventilators, kurš radīja vislielākās vibrācijas, bet 100 Hz harmoniku radīja elektrodinamisko spēku iedarbība uz transformatora tinumiem [68].



1.6. att. Uz transformatora tvertnes virsmas nomērīto vibrāciju spektrs.

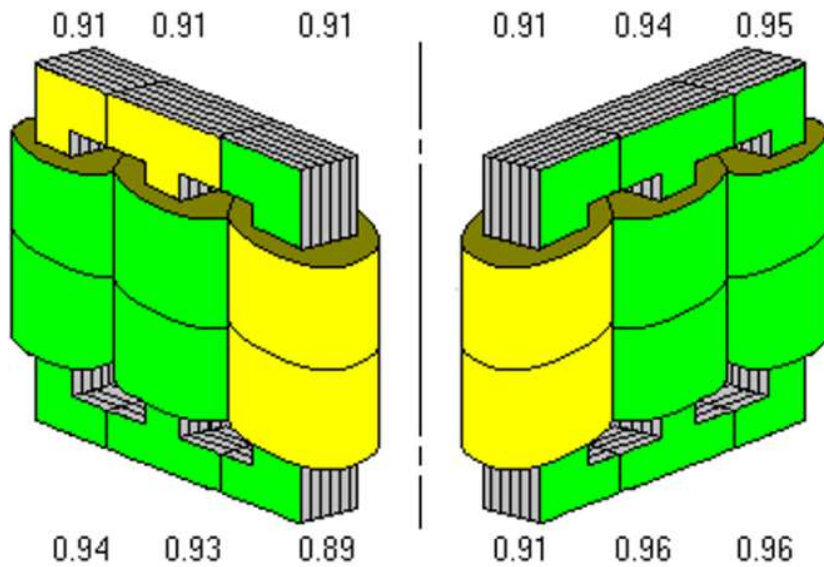
Jāatzīmē, ka ir iespējams veikt transformatoru vibrāciju diagnostiku, izmantojot tikai vibrāciju kopējās vērtības amplitūdu.

Katram no vibrāciju raksturlielumiem var tikt uzstādīta noteikta vērtība, kuru pārsniegšana var liecināt par iespējamu mehānisku bojājumu konkrētā transformatorā [103]:

- 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. Tas skaidrojams ar to, ka noteikta vibrāciju raksturlieluma vērtība var signalizēt par bojājumu noteiktam transformatoram, bet citam šādas vērtības ir pieļaujamas.

Nomērīto tvertnes virsmas vibrāciju vērtību interpretēšanai ir iespējams izmantot “*Camapa Прубоп*” izstrādāto transformatora tinumu un magnētvasda presējuma kvalitātes operatīvo vērtēšanas sistēmu *VESTA* [91]. Šī pieeja paredz transformatora aktīvās daļas elementus sadalīt fragmentos, aprēķināt koeficientu katram no tiem un slēdzienu grafiski ilustrēt ar krāsu kodu, kurā ar zaļu krāsu tiek norādīts labs presējuma stāvoklis, ar dzeltenu krāsu apmierinošs, bet ar sarkanu – neapmierinošs presējuma stāvoklis. Jāatzīmē, ka šī sistēma nav spējīga interpretēt transformatora tvertnes virsmas vibrāciju datus detalizētāk, kā parādīts 1.7. attēlā, un nav iespējams uzzināt, kā tiek iegūti šīs sistēmas koeficienti, kuri nosaka rezultātu katrā tinumu un magnētvasda fragmentā.



1.7. att. *VESTA* sistēmas rezultātu piemērs [91].

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. Vibrāciju mērījumi uz transformatora tvertnes virsmas ir perspektīva metode, jo to var lietot mehānisko defektu noteikšanai, transformatoram darbojoties. Taču grūtības sagādā vibrāciju mērījumu rezultātu interpretācija, jo nepastāv universāli pielietoti vibrāciju limiti un standartizētas novērtēšanas metodes. Līdz ar to ir nepieciešams paņēmieni, kā veikt vibrāciju mērījumu rezultātu apstrādi, lai iegūtu precīzu informāciju par iespējamiem mehāniskiem defektiem transformatoru aktīvajā daļā.

2. TRANSFORMATORA VIBRĀCIJU MODELIS MEHĀNISKO DEFEKTU NOTEIKŠANAI

2.1. Modeļa kopskats

Izstrādātais vibrāciju modelis ir paredzēts, lai, izvērtējot mērījumu rezultātus, atklātu mehāniskos defektus lieljaudas transformatoru tinumos un magnētavadā, jo šāda veida defekti rada pastiprinātas vibrācijas, un pastāv korelācija starp vibrāciju amplitūdām uz tvertnes virsmas un transformatora aktīvās daļas mehānisko stāvokli.

Transformatora vibrāciju modeļa darbība ir paredzēta gadījumos, kad tvertnes virsmas vibrāciju mērījumu rezultāti ir tuvu vai pārsniedz iestatītās robežvērtības (piemēram, 1.3. apakšnodaļā norādītos limitus).

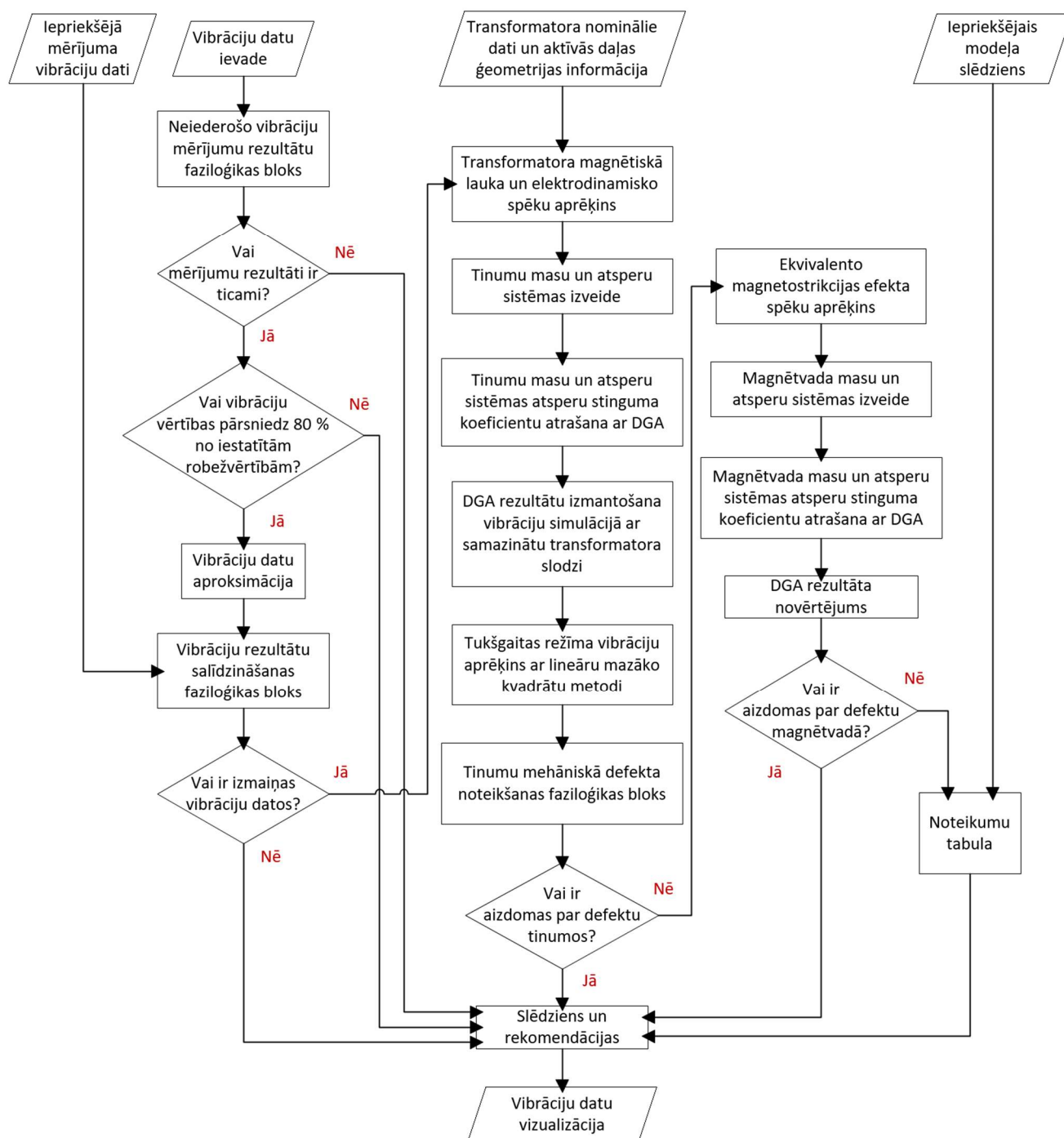
Izstrādātais vibrāciju modelis izmanto melnās kastes principu un dinamisku ģenētisko algoritmu, lai simulētu vibrācijas transformatora tinumos un magnētavadā. Slēdzienu veidošanā tiek izmantota faziloģika, jo var rasties situācija, kurā pretrunīgu rezultātu sniedz vairāki simulācijas vibrāciju raksturlielumi. Rezultātā lietotājs saņem slēdzienu par attiecīgo transformatoru ar rekomendācijām turpmākām diagnostikas pārbaudēm, kā arī transformatora tvertnes virsmas vibrāciju vizualizāciju.

Izstrādātā vibrāciju modeļa realizācijā ir izmantota *COMSOL* un *Matlab* programmatūra. Izstrādātā vibrāciju modeļa darbību ilustrē 2.1. attēls.

Modeļa darbība sākas ar vibrāciju datu izvērtēšanu (sīkāk skat. 6.2.2. apakšnodaļu), kuras ietvaros pārbauda:

- vai ir kādi vibrāciju amplitūdu mērījumi, kuri vairākas reizes atšķiras no citiem tā paša transformatora tvertnes daļas mērījumu datiem;
- vai eksistē iztrūkstoši datu punkti, kas nepieļauj tālāku algoritma izpildi;
- vai ir kādi vibrāciju mērījumi, kuri ir vismaz 80 % no iestatītām robežvērtībām vai pārsniedz tās;
- vai vibrāciju mērījuma rezultāti salīdzinājumā ar šī paša transformatora iepriekšējiem vibrāciju mērījumiem ir mainījušies, lai novērstu nevajadzīgu transformatora vibrāciju modeļa darbību.

Atkarībā no datu izvērtēšanas bloku rezultātiem, iespējams vai nu iegūt slēdzienu, ka nav aizdomu par mehāniska rakstura defektu attiecīgā transformatora aktīvajā daļā, slēdzienu, kas sakrīt ar iepriekšējo izstrādātā vibrāciju modeļa slēdzienu, vai arī tiek turpināts aprēķinu algoritms.



2.1. att. Transformatora vibrāciju modeļa darbības blokshēma.

Rezultāta iegūšanai izstrādātajā vibrāciju modelī iekļauti šādi bloki:

- vibrāciju datu aproksimācija detalizētākas vibrāciju informācijas iegūšanai un attēlošanai (skat. 3. nodaļu);
- transformatora magnētiskā lauka un tinumu strāvas blīvuma aprēķini (skat. 4.2. apakšnodaļu), kas vajadzīgi tinumu elektrostatisko spēku (skat. 4.4. apakšnodaļu) un magnētvasdā eksistējošā magnetostrīcijas efekta radīto vibrāciju aprēķinam (skat. 5.2. apakšnodaļu);

- tinumu masu un atsperu sistēmas izveide transformatora tinumu radīto vibrāciju simulācijai (skat. 5.1. apakšnodaļu);
- magnētvara masu un atsperu sistēmas izveide transformatora magnētvara radīto vibrāciju simulācijai (skat. 5.2. apakšnodaļu);
- dinamiska ģenētiskā algoritma izveide atbilstoša rezultāta atrašanai sistēmās ar ļoti lielu skaitu iespējamu iekšējo konfigurāciju (skat. 5.3. apakšnodaļu);
- faziloģikas pielietošana, lai iegūtu nepieciešamo izstrādātā vibrāciju modeļa slēdzienu ar attiecīgām rekomendācijām (skat. 6.2.2., 6.2.3. un 6.2.4. apakšnodaļas);
- slēdziens un rekomendācijas un vibrāciju vizualizācija kā izstrādātā vibrāciju modeļa rezultāts (skat. 3. nodaļu un 6. nodaļu).

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

- 1) **Nav aizdomu par mehānisku defektu transformatora aktīvajā daļā** – slēdziens, pie kura nonāk gadījumos, kad vibrāciju diagnostikas mērījumu rezultātu vērtības nepārsniedz iestatītās robežvērtības.

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

- 2) **Rezultāts ir neskaidrs** – slēdziens, pie kura nonāk, ja:

- a) datu izvērtēšanas bloka darbības laikā atrod datu punktus, kuru vērtības neiederas starp pārējām datu vērtībām un tādejādi liecina par iespējamu mērījumu kļūdu;
- b) ne elektrodinamisko spēku radīto vibrāciju modelēšanas bloks, ne magnetostrikcijas radīto vibrāciju modelēšanas bloks neatrod mehāniskā defekta klātbūtni nevienā no transformatora aktīvās daļas sastāvdaļām.

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 iespējamos ārējos vibrāciju avotus.

- 3) **Aizdomas par mehānisku defektu tinumos** – slēdziens, ja elektrodinamisko spēku radīto vibrāciju ģenerēšanas procesā tiek atklāts, ka, samazinot transformatora jaudu, radīto vibrāciju vērtībām nav korelācijas ar tukšgaitas diagnostikas rezultātiem.

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** – slēdziens, ja magnetostrikcijas radīto vibrāciju ģenerēšanas procesā tiek atklāti viens vai vairāki magnētvara fragmenti, kuros mehāniskā stiprība ir nevienlīdzīga.

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

- 5) **Aizdomas par defekta klātbūtni tinumos un/vai magnētvadā, bet to nevar lokalizēt** – slēdziens, ja ir aizdomas par mehānisku defektu, bet nevar to deduktīvi lokalizēt ne tinumos, ne magnētvadā. Līdz ar to, ir diagnosticēta mehāniska defekta klātbūtne, bet nav zināms tieši, kurā attiecīgā transformatora aktīvās daļas sastāvdaļā tas atrodas. 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 magnētvada reģionu; veikt Z_k pretestības mērījumus un tukšgaitas strāvu un zudumu noteikšanu.

2.2. Raksturlielumi transformatora vibrāciju modeļa īstenošanai

2.2.1. Transformatora nominālie dati

Lai izstrādātā vibrāciju modeļa ietvaros modelētu magnētisko lauku un aprēķinātu strāvas blīvumu vērtības gan primārās sprieguma puses, gan sekundārās sprieguma puses tinumu šķērsgrīzumos, kā ievades parametri ir nepieciešami transformatora pases dati. Izstrādātā vibrāciju modeli izmantoti šādi transformatora pases dati un no tiem aprēķinātie parametri:

- jauda, MVA;
- primārais fāzes spriegums, kV;
- primārās puses fāzes strāva, A;
- primārās puses aktīvā pretestība, Ω ;
- sekundārais fāzes spriegums, kV;
- sekundārās puses fāzes strāva, A;
- sekundārās puses aktīvā pretestība, Ω ;
- transformācijas koeficients;
- sprieguma frekvence, Hz;
- tinumu materiāla blīvums, kg/m^3 ;
- magnētvada materiāla blīvums, kg/m^3 ;
- magnētvada materiāla magnetostrikcijas raksturlīkne;
- magnētvada materiāla magnetizēšanās raksturlīkne.

Ja pārbaudāmajam transformatoram ir arī terciārie tinumi, papildus ir nepieciešami sekojošie dati:

- terciārais fāzes spriegums, kV;
- terciārās puses fāzes strāva, A;
- terciārās puses aktīvā pretestība, Ω .

Jāatzīmē, ka pārbaudāmā transformatora fāžu strāvu vērtības ir nepieciešamas, lai aprēķinātu gan augstākā, gan zemākā sprieguma tinumu aktīvo pretestību vērtības. Jo modelēšanas procesā transformatora primārās puses spriegums tiek izmantots, lai piešķirtu magnētiskā lauka modelim enerģiju, bet visu sprieguma pušu tinumu pretestība darbojas kā to noteicošs raksturlielums, lai būtu iespējams simulēt strāvu vērtības atšķirīgiem slodzes režīmiem.

Jāatzīmē, ka gadījumos, kad kādas sprieguma pakāpes tinumi ir slēgti trīsstūra slēgumā, ir nepieciešams tos pārveidot un definēt kā zvaigznes slēgumu, jo magnētiskā lauka modelī katram tinumam pievadītais spriegums tiek pievadīts katrai fāzei individuāli, un programmatūra neatbalsta cikliskas elektriskās ķēdes izveidi, kurā spriegumi tiek pieslēgti virknē.

Transformatora tinumu un magnētvasda konstrukcijā izmantoto materiālu blīvumi ir nepieciešami, lai aprēķinātu masu un atsperu sistēmas matemātisko modeli. Savukārt, magnētvasda materiāla magnetostrikcijas raksturlīknes dati ir nepieciešami, lai aprēķinātu magnetostrikcijas efekta rezultātā radītās magnētvasda deformācijas, bet šī materiāla magnetizēšanās raksturlīkne ir vajadzīga attiecīgā transformatora magnētiskā lauka aprēķināšanas procesā. Gadījumā, ja magnetizēšanās raksturlīknes dati nav pieejami, ir iespējams izmantot magnētvasda materiāla relatīvo magnētisko vadītspēju, bet šāda pieeja var radīt neprecizitātes aprēķinātajās transformatora magnētiskā lauka vērtībās.

2.2.2. Transformatora aktīvās daļas ģeometrija

Bez iepriekš minētiem datiem transformatora izstrādātajam vibrāciju modelim ir nepieciešama arī informācija par transformatora aktīvās daļas ģeometriju (apjomu skat. 2.1. tabulā).

2.1. tabula

Nepieciešamie transformatora ģeometrijas raksturlielumi

Transformatora ģeometrijas sastāvdaļa	Raksturlielums				
	Augstums, m	Platums, m	Garums, m	Iekšējais diametrs, m	Ārējais diametrs, m
Primārais tinums	+			+	+
Sekundārais tinums	+			+	+
Terciārais tinums	+			+	+
Magnētvasda ārējais izmērs	+	+	+		
Magnētvasda stienis	+	+	+		
Magnētvasda jūgs	+	+	+		
Transformatora tvertne	+	+	+		

Jāatzīmē, ka transformatora tvertnes aptuveni izmēri ir nepieciešami, lai modelēšanas procesā uzdotu ārējās telpiskās robežas, ārpus kurām magnētiskais lauks nevar izplatīties. Šīs ārējās robežas ir iespējams uzdot kā noteikta izmēra paralēlskaldni un nav nepieciešams tvertnes ģeometrijā atveidot detalizētākās sastāvdaļas kā tvertnes ribas un stiprinājumus, jo šo

elementu klātbūtne praktiski neietekmē transformatora radītā magnētiskā lauka izplatīšanos caur tā iekšējo konstrukciju.

Toties tinumu ģeometrijai ir jābūt iespējami precīzai salīdzinājumā ar to izmēriem realitātē, jo šajā transformatora ģeometriskā modeļa elementā tiek radīts transformatora magnētiskais lauks, kā arī pēc tam aprēķinātas strāvas blīvuma vērtības.

Jāatzīmē, ka izstrādātā vibrāciju modeļa ietvaros visi transformatora aktīvās daļas elementi ir definēti kā monolīti un izotropiski domēni, tāpēc tinumu ģeometrijā tiek pieņemts, ka tie veido cilindriskas formas. Šāda pieeja būtiski nesamazina izstrādātā vibrāciju modeļa precizitāti, toties gan magnētiskā lauka, gan strāvas blīvuma tinumos aprēķini tiek veikti vienkāršām ģeometriskām figūrām. Turklāt attiecīgā transformatora tinumu ģeometrijas izveidē var izmantot tikai to augstumu, iekšējo diametru un ārējo diametru, kas būtiski atvieglo vajadzīgās ģeometrijas informācijas ieguvu.

Transformatora ģeometriskā modeļa izveidošanai ir nepieciešama informācija par attiecīgā transformatora magnētvasda ģeometriju: tā kopējo augstumu, platumu un garumu, kā arī katra individuāla stieņa un jūga visu dimensiju izmērus. Jāatzīmē, ka arī magnētvasda gadījumā tiek pieņemts, ka tā konstrukcijas ģeometrija sastāv no vairākiem paralēlskalduņiem, un visi elementu domēni tiek definēti kā monolīti un izotropiski. Šī pieeja būtiski neietekmē aprēķinātā magnētiskā lauka raksturu, izplatīšanās apgabalu un individuālās vērtības telpā, taču būtiski samazina izstrādātā vibrāciju modeļa ģenerēto galīgo elementu daudzumu, kas samazina aprēķinu ilgumu. Būtiska papildu magnētvasda ģeometrijas izmaiņa ir pieņēmums, ka magnētvasds nav laminēts atšķirībā no situācijas realitātē. Šāda pieeja vēl vairāk samazina aprēķinu sarežģītību un ilgumu un maz ietekmē magnētiskā lauka ainu, toties vairs nav nepieciešams zināt magnētvasda lamināta kārtu biezumu, fizikālos raksturlielumus un ģeometriskos izmērus.

Izmantojot šo pieeju un pieņēmumus, ir panākts, ka visas attiecīgā transformatora aktīvas daļas un ārējo robežu ģeometrijas izmērus ir iespējams iegūt, zinot to ārējo dimensiju izmērus. Jāatzīmē, ka gadījumā, kad kādi dati nav zināmi, joprojām ir iespējams veikt aprēķinus ar transformatora vibrāciju modeli, bet, nezināmo ģeometrijas raksturlielumu vietā veicot pieņēmumus, var rasties aprēķinu neprecizitātes, tomēr tālāk izveidoto ģenētisko algoritmu darbības pamatā esošais nejaušības princips var kompensēt šādu nobīdi no reālās situācijas.

2.2.3. Transformatora tvertnes virsmas vibrāciju mērījumu dati

Transformatora vibrāciju modeļa darbībai ir nepieciešami vibrāciju mērījumu dati uz tā tvertnes virsmas, (skat. 2.2. tabulu), kā arī informācija par transformatora slodzi vibrāciju mērījumu laikā, %.

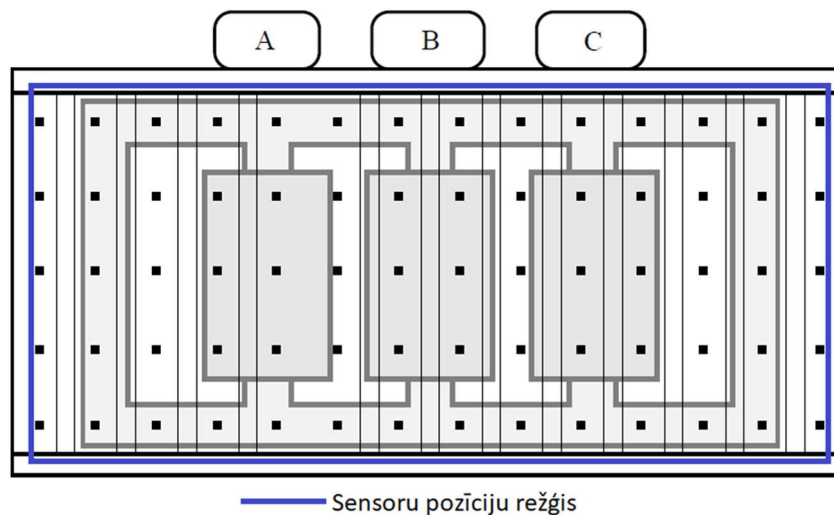
Jāatzīmē, ka transformatora vibrāciju modeļa sekmīgai darbībai nav obligāti nepieciešami visu vibrāciju raksturlielumu mērījumu dati. Turklāt, nav nepieciešama harmoniku analīze, jo tiek izmantotas vibrāciju kopējās vērtības.

2.2. tabula

Nepieciešamie transformatora vibrāciju mērījumu dati, kopējās vērtības

	Vibropārvietojums l , μm	Vibroātrums v , mm/s	Vibropaātrinājums a , m/s^2
Tvertnes augstākā sprieguma puse	+	+	+
Tvertnes zemākā sprieguma puse	+	+	+

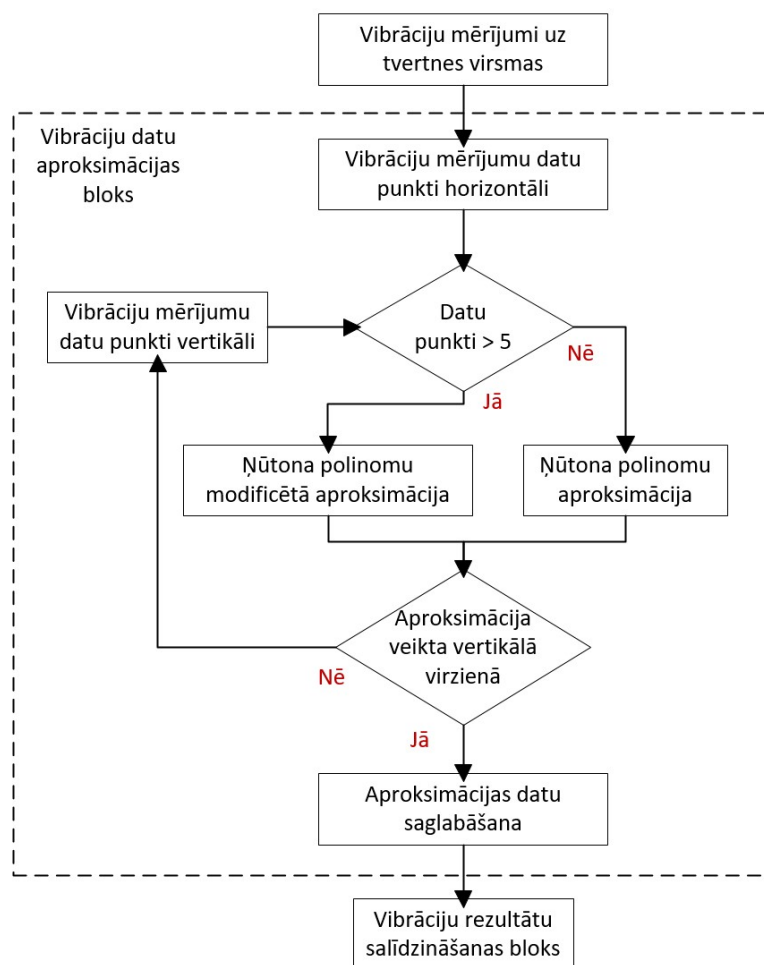
Papildus 2.2. tabulā uzrādītiem datiem ir vajadzīga informācija par sensoru novietojumu uz transformatora tvertnes virsmas, piemēram, 2.2. attēla ilustrētās sensoru novietojuma pozīcijas uz transformatora zemākā sprieguma puses tvertnes sienas. Sensoru novietojums var tikt mainīts vairākās diagnostikas reizēs, jo izstrādātais vibrāciju modelis ir spējīgs aproksimēt vibrāciju vērtības ģeometrijas pozīcijās, kurās tie netika uzstādīti, izmantojot interpolāciju, ko veic datu vizualizācijas bloks (piem., skat. 3.4. attēlu).



2.2. att. Vibrāciju sensora novietošanas pozīcijas uz transformatora tvertnes virsmas.

3. VIBRĀCIJU MĒRĪJUMU DATU APROKSIMĀCIJA UN VIZUALIZĀCIJA

Vibrāciju mērījumu laikā uz transformatora tvertnes virsmas sensorus parasti izvieto 12 līdz 150 vietās. Atkarībā no transformatora konstrukcijas un mērījumu veikšanas mērķa, izvietojums var mainīties. Lai varētu veikt analīzi, nepieciešams, lietojot aproksimācijas metodes, iegūt nepārtrauktu vibrāciju ainu uz tvertnes virsmas. Šis izstrādātā vibrāciju modeļa darbības posms (skat. 2.1. attēlu) sāk darbību, kad ir konstatēti vibrāciju mērījumu rezultāti, kuri pārsniedz vai ir tuvi uzdotām robežvērtībām. Vibrāciju datu punktu skaits nosaka, kāda veida aproksimācijas metode sākotnēji tiks lietota (skat. 3.1. attēlu). Izvēlētais metode ir Ņūtona polinomu aproksimācija un modificēta Ņūtona polinomu aproksimācija, kuru darbības detalizēts izklāsts ir paskaidrots darba turpinājumā. Vispirms metodes izvēle notiek datu aproksimācijai horizontālā virzienā. Pēc tam šis process tiek atkārtots vertikālā virzienā gan sākotnēji zināmajiem datu punktiem, gan pirmajā aproksimācijas iterācijā iegūtajiem vibrāciju rezultātiem. Tad dati tiek saglabāti to izmantošanai tālākā izstrādātā vibrāciju modeļa posma darbības etapā.



3.1. att. Vibrāciju datu aproksimācijas bloka blokskhēma.

Piemēram 2.2. attēlā ilustrētā vibrāciju mērījumu punktu izvietojuma gadījumā vertikālā virzienā tiek izmantota Ņūtona polinomu aproksimācija, bet horizontālā virzienā – modificēta Ņūtona polinomu aproksimācija, jo vibrāciju mērījumu punktu skaits pārsniedz 5 punktus.

Ņūtona polinomu aproksimācijas metodes gadījumā tiek aprēķinātas diferenciālu vērtības, kas ļauj iegūt aproksimētu vērtību starp zināmiem datu punktiem noteiktās pozīcijās [31], [101]. Izteiksme (3.1) parāda gadījumu, kad ir doti pieci datu punkti ar zināmām vērtībām noteiktās pozīcijās. Līdz ar to, tiek izveidots polinoms, kura augstākā pakāpe ir 4, kas ir vienāds ar kopējo diapazonu skaitu starp sākotnēji dotajiem datu punktiem.

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

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.

Polinoma koeficientu vērtību aprēķins ir parādīts izteiksmēs (3.2) – (3.6) [31]. Kā redzams, katra nākošā augstākās pakāpes polinoma iegūšana ir ģeometriski apjomīgāka kā iepriekšējā. Līdz ar to, Ņūtona polinomu aproksimācija paliek sarežģītāka, pieaugot vajadzīgajai polinoma augstākai pakāpei. Papildus aproksimētajām vērtībām ir tendence radīt lokālus funkcijas ekstrēmumus ārpus sākotnēji uzdotajām vērtībām.

$$a_0 = y_i, \quad (3.2)$$

$$a_1 = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} = \frac{y_{i+1} - a_0}{x_{i+1} - x_i}, \quad (3.3)$$

$$a_2 = \frac{\frac{y_{i+2} - y_{i+1}}{x_{i+2} - x_{i+1}} - \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}}{x_{i+2} - x_i} = \frac{\frac{y_{i+2} - y_{i+1}}{x_{i+2} - x_{i+1}} - a_1}{x_{i+2} - x_i}, \quad (3.4)$$

$$a_3 = \frac{\frac{\frac{y_{i+3} - y_{i+2}}{x_{i+3} - x_{i+2}} - \frac{y_{i+2} - y_{i+1}}{x_{i+2} - x_{i+1}}}{x_{i+3} - x_{i+1}} - a_2}{x_{i+3} - x_i}, \quad (3.5)$$

$$a_4 = \frac{\frac{\frac{\frac{y_{i+4} - y_{i+3}}{x_{i+4} - x_{i+3}} - \frac{y_{i+3} - y_{i+2}}{x_{i+3} - x_{i+2}}}{x_{i+4} - x_{i+2}} - \frac{\frac{y_{i+3} - y_{i+2}}{x_{i+3} - x_{i+2}} - \frac{y_{i+2} - y_{i+1}}{x_{i+2} - x_{i+1}}}{x_{i+3} - x_{i+1}}}{x_{i+4} - x_{i+1}} - a_3}{x_{i+4} - x_i}, \quad (3.6)$$

kur $y_{i...i+4}$ – zināmo datu punktu datu vērtības.

Līdz ar to izstrādātā vibrāciju modeļa ietvaros ir izstrādāta un piedāvāta modifikācija Ņūtona polinomu aproksimācijas metodei, lai izvairītos no nesamērīgi ilgās datu aprēķināšanas, ja sākuma datu daudzums ir liels. Piemēram, 15 datu pozīcijām vienā virzienā aprēķins prasītu vairāk nekā $1,44 \cdot 10^5$ matemātiskas operācijas, lai iegūtu polinomu vienādojumu sistēmas nezināmos koeficientus. 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 (3.7) un katras nākošās datu grupas sākums ir 2 datu punktus tālāk, kā iepriekšējās datu grupas sākums. Šādā veidā panāk, ka visas datu grupas pārklājas vienmērīgi 2 kārtās. Izņēmums ir gadījumi, kad dotais datu punktu skaits ir pāra skaitlis. Tad pēdējā datu grupa izmanto tikai 4 datu punktus. Tā kā iepriekšējās datu grupas pozīcija ir beigusies, kur atrodas pēdējās datu grupas pēdējais intervāls starp diviem datu punktiem, kopējais aproksimācijas rezultāts netiek ietekmēts, jo tās rezultāti šajā reģionā ir doti tikai no pēdējās datu grupas un tie nav jāapvieno.

$$g_{sk} = \text{rounddown}\left(\frac{(x_{sk}-2)}{2}\right), \quad (3.7)$$

kur g_{sk} – aproksimācijas grupu skaits;

x_{sk} – datu punktu skaits.

Piemēram, 9 datu punktu gadījumā, ir 3 grupas, kur 5. punkts ir 1. grupas beigu punkts, 2. grupas sākumpunkts un papildu grupas viduspunkts. Ņūtona polinomu aproksimācija tiek pielietota tikai atsevišķiem grupu datu punktiem, lai iegūtu aproksimētās datu vērtības intervālos starp tiem. 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, mainoties to uztveršanas pozīcijām uz transformatora tvertnes virsmas, proti, lai novērstu šādu lūzuma punktu rašanos, 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. Kā redzams, papildus aproksimācijas rezultātā, lūzuma punkts pie 5. datu punkta vairs neveidojas.

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

$$y_i = \frac{y_{g,i}(x_n - x_i)^2 + y_{g+1,i}(x_i - x_1)^2}{(x_n - x_i)^2 + (x_i - x_1)^2}, \quad (3.8)$$

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

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

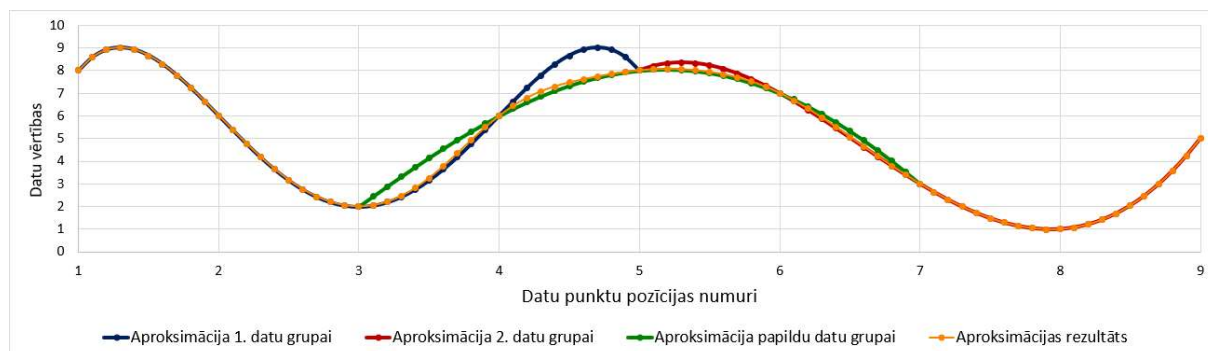
x_1 – pozīcijas vērtība aproksimācijas apvienošanas perioda sākumā;

x_i – konkrētā aproksimācijas vērtības pozīcija;

x_n – pozīcijas vērtība aproksimācijas apvienošanas perioda beigās.

Kā redzams 3.2. attēlā, aproksimācijas beigu rezultātā nav neviena lūzuma punkta un beigu rezultāts sakrīt ar sākotnējām grupu aproksimācijām vietās, kur tās dod monotonu rezultātu izmaiņu. Pielietotās piederības funkcijas dēļ grupu aproksimāciju vērtību izmaiņas tendences

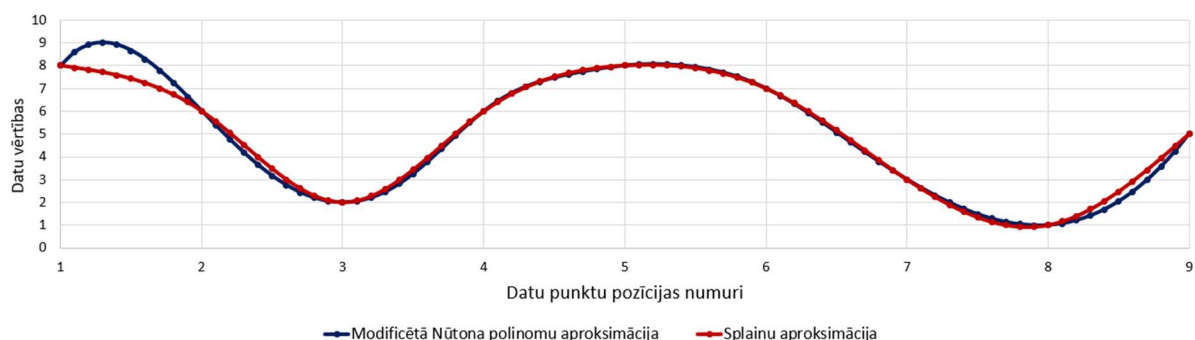
beigu rezultātā pakāpeniski mainās, jo to piederības īpatsvars gala rezultātā nav konstants un mainās atkarībā no tā, kurā pozīcijā ir nepieciešams iegūt rezultātu.



3.2. att. Ņūtona polinomu aproksimācijas beigu rezultāts.

Piedāvātās modifikācijas verifikācijai tiek izmantoti trešās pakāpes splaini, jo nav iespējams iegūt izliektas un ieliektas formas aproksimācijas vērtību līknes ar mazākas pakāpes splainiem vienā datu intervālā, bet lielākās pakāpes splainiem ir vairāk pieejamu brīvības pakāpju, kas neuzlabo šīs konkrētās aproksimācijas precizitāti [33].

Aplūkotajā piemērā kopā ir doti 9 vibrāciju amplitūdu datu punkti, kuri sastāda 8 intervālus starp šiem punktiem. Splainu nosacījumu apstiprināšanai ir nepieciešama 32 vienādojumu sistēma, kuru atrisina ar matricu metodi, atrodot visus vajadzīgos splainu aproksimācijas polinomu vienādojumu koeficientus. 3.3. attēls ilustrē splainu aproksimācijas un modificētās Ņūtonu polinomu aproksimācijas metodes iegūtos rezultātus. Redzams, ka vislielākā atšķirība rezultātos ir pozīcijās, kur datu vērtības izmainās visstraujāk, bet kļūda nepārsniedz 5 %.



3.3. att. Modificētās Ņūtona polinomu aproksimācijas un splainu aproksimācijas rezultāti.

Verifikācijas nolūkos tiek salīdzināti transformatora tvertnes virsmas vibrāciju dati 108 atsevišķiem mērījumu gadījumiem. Katram individuālam gadījumam tiek veiktas aproksimācijas gan ar modificēto Ņūtona polinomu aproksimācijas metodi, gan ar splainu aproksimācijas metodi. Pēc aproksimācijas darbību veikšanas no iegūtajiem vibrāciju rezultātiem, 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.

3.1. tabula

Modificētās Ņūtona polinomu aproksimācijas metodes verifikācijas rezultāti

Gadījumu skaits	Vibropaātrinājuma 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 nekā splainu aproksimācija. Jāatzīmē, ka 24 gadījumos, kad abas aproksimācijas metodes dod vienādu globālo maksimumu ($m_n = m_s$). Tas ir skaidrojams ar to, ka gadījumos, kad sākotnēji dotās vibrāciju vērtības ir ar vienmērīgu amplitūdu izmaiņu aproksimācijas apgabalā, izmantotās aproksimācijas metodes nedod izteiktas vērtību svārstības un nerodas jauni vibrāciju epicentri, kuru vērtība pārsniegtu sākotnēji zināmos datus.

Katrai no izmantotajām aproksimācijas metodēm ir zināmas priekšrocības un trūkumi. Ņūtona polinomu metodei priekšrocības ir:

- pielietojama mazam mērījumu punktu skaitam;
- viegli veikt lielu skaitu iterāciju.

Toties eksistē arī zināmi trūkumi:

- kļūst regresīvi neefektīva, pieaugot datu punktu skaitam;
- var tikt radīti jauni globālie ekstrēmi aproksimācijas periodu sākumos vai beigās.

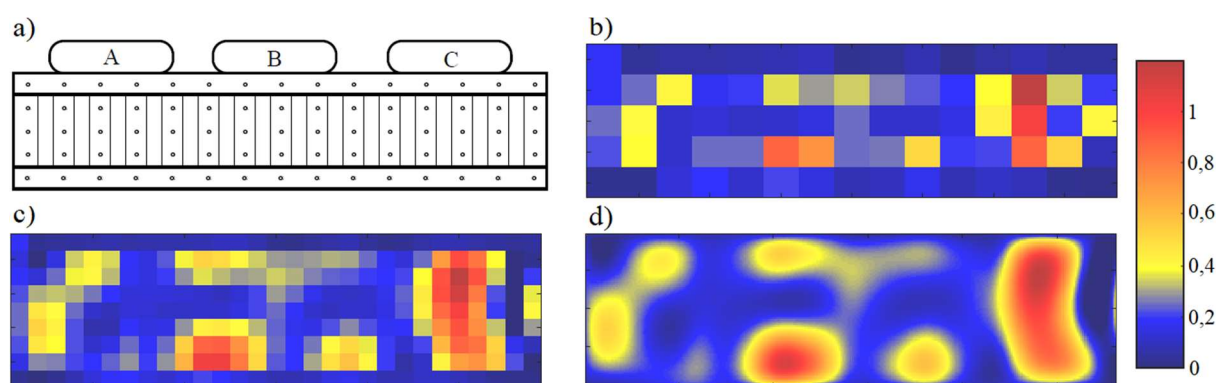
Modificētai Ņūtona polinomu metodei priekšrocības ir:

- neveidojas aproksimācijas vērtību lūzumu punkti;
- novērsti Ņūtona polinomu metodes trūkumi;
- efektīvi funkcionē pie liela mērījumu punktu skaita;
- piemērotāka par splainu aproksimāciju.

Savukārt, tās trūkums ir, ka šī metode ir pārbaudīta tikai viena pētījuma ietvaros. Tāpēc tās tiek izmantotas dinamiski, lai iegūtu nepieciešamo aproksimācijas rezultātu katrā individuālā gadījumā.

Abām datu aproksimācijas metodēm ir uzdots aproksimācijas koeficients e . Tas nosaka, cik pozīcijās ir nepieciešams aprēķināt vibrāciju vērtības starp diviem sākotnēji zināmiem datu punktiem. Šīs ģeometriskās pozīcijas ir vienmērīgi sadalītas kopējā diapazonā starp zināmajiem

punktiem. 3.4. attēls ilustrē aproksimācijas piemēru, kur rezultāti ir vizualizēti ar atšķirīgām e vērtībām. 3.4. b) attēlā ir redzama sākotnējo datu vizualizācija, kur šajā gadījumā aproksimācija vēl netiek veikta, e vērtība ir 1 un vizualizācija attēlo sensoru izvietojumu ar mērījumu datiem (skat. 3.4. a) attēlu). Tas nozīmē, ka diapazons starp diviem sākotnēji zināmiem vibrāciju datu punktiem netiek sadalīts. 3.4. c) attēls ilustrē transformatora tvertnes virsmas vibrāciju datu vērtību aproksimāciju ar vienu aproksimētu vērtību punktu starp jebkuriem diviem blakus esošiem datu punktiem, šādā veidā palielinot kopējo vizualizācijas izšķirtspēju 4 reizes. Kā redzams, vibrāciju datu vizualizācijā, palielinot aproksimācijas koeficientu, ir iespējams iegūt precīzāku sākotnējo datu vizualizāciju, kas palīdz izdarīt secinājumus par datu vērtību lokāliem un globāliem ekstrēmiem, to novietojumu, intensitāti un savstarpējo raksturu.



3.4. att. Transformatora tvertnes virsmas vibrāciju aproksimācijas vizualizācija:

a) sensoru attiecīgais izvietojums uz transformatora tvertnes, b) bez aproksimācijas punktiem, c) ar koeficientu $e=2$, d) ar koeficientu $e=100$.

3.2. tabula

Aproksimācijas koeficienta e analīze

Izvēles numurs	e vērtība	Ilustrācijas attēla izmēri (vertikāli x horizontāli)	Atbilstība izvēlētajam diapazonam horizontālā virzienā	Atbilstība izvēlētajam diapazonam vertikālā virzienā	Ilustrācija
1	1	5 x 15	Nē	Nē	3.4. b) attēls
2	2	9 x 29	Nē	Nē	3.4. c) attēls
3	5	25 x 61	Nē	Nē	-
4	10	41 x 141	Nē	Nē	-
5	20	81 x 281	Nē	Nē	-
6	50	201 x 701	Nē	Nē	-
7	100	401 x 1401	Jā	Jā	3.4. d) attēls
8	200	801 x 2801	Nē	Jā	-
9	500	2001 x 7001	Nē	Nē	-
10	1000	4001 x 14001	Nē	Nē	-

Izstrādātajā vibrāciju modelī lietotā aproksimācijas koeficienta e vērtība ir 100. Šī vērtība ir izvēlēta, jo, veicot aproksimācijas vizualizācijas analīzi, kā mērķis bija sasniegt vizualizācijas

izšķirtspēju, kas radītu attēlus ar izšķirtspēju, kas ir samērojama ar lielāko datoru monitoru izšķirtspēju. Līdz ar to, tika uzstādīts, ka horizontālai iegūtā aproksimācijas vizualizācijas attēla dimensijai ir jā sastāv no ne mazāk kā 1000 datu punktu un ne vairāk kā 2000 datu punktu, bet vertikālai 400 – 1000 datu punktu. 3.2. tabula parāda izveidotās aproksimācijas koeficienta e izvēles analīzes rezultātus.

Papildus, vibrāciju datu vizualizācijas ietvaros izmantotā krāsu gamma ir konstanta visos gadījumos, kuros tiek veikta vizualizācijas process. Ir izmantota šāda pieeja, lai būtu maksimāli uzskatāmi, kurās pozīcijās vibrāciju vērtības ir relatīvi paaugstinātas salīdzinājumā ar uzdotām robežvērtībām.

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 [22], savukārt magnetostrikcijas process rodas, jo magnētiskā lauka ietekmē magnētvida materiāls maina savas ģeometriskās formas [100]. Šie fizikālie procesi sīkāk skaidroti 1.1. apakšnodaļā.

Izteiksme (4.1) 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;

α – leņķis starp magnētiskās indukcijas un strāvas vērtības vektoriem, rad.

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

4.2. Magnētiskā lauka aprēķinu teorētiskie aspekti

Elektromagnētiski uzdevumi noteikta izmēra transformatora ģeometriskiem modeļiem tiek risināti, balstoties uz Maksvela vienādojumiem, kuri parādīti izteiksmēs (4.2) – (4.5) [18]. Izteiksme (4.2) ir Maksvela – Ampēra likums. Izteiksme (4.3) ir Maksvela – Faradeja likums. Izteiksmes (4.4) un (4.5) ir Gausa likums elektriskā un magnētiskā formā. Jāatzīmē, ka izteiksmē (4.2) izmantota magnētiskā lauka indukcija, nevis intensitāte. Tas skaidrojams ar to, ka indukcija tiek aprēķinātā no intensitātes [25].

$$\nabla \times B = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \mu_0 j, \quad (4.2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (4.3)$$

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad (4.4)$$

$$\nabla \cdot B = 0, \quad (4.5)$$

kur H – magnētiskā lauka intensitāte A/m;

j – strāvas blīvums, A/m²;

D – elektriskā indukcija, C/m²;
 E – elektriskā lauka intensitāte, V/m;
 B – magnētiskā lauka indukcija, T;
 ρ – elektriskais lādiņš, C/m³;
 t – laiks, s.

Kā papildus ir nepieciešama izteiksme (4.6). Tā kopā ar izteiksmēm (4.2) – (4.5) veido vienādojumu sistēmu, ko var aprēķināt ar galīgo elementu metodi. Izteiksme (4.6) raksturo noslēgtu transformatora ģeometrijas modeļa telpas sistēmu, kurā visos laika momentos ir nemainīgs lādiņu skaits, bet to attiecīgā pozīcija noteiktajos transformatora ģeometrijas modeļa telpas limitos var atšķirties [18], [25].

$$\nabla \times j = -\frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad (4.6)$$

Lai varētu modelēt slēgtu sistēmu, ir nepieciešams uzdot savstarpējās sakarības (skat. izteiksmes (4.7) – (4.9)). Savstarpējās sakarības ir mijiedarbība starp transformatora ģeometrijas modeļa raksturlielumiem, kur kāda mainīga izmaiņa ietekmē cita mainīgā sākotnēji konstanto vērtību. Izteismē (4.7) elektriskās polarizācijas vektors P izsaka, cik spēcīgi materiāls tiek polarizēts, ja tas tiek pakļauts elektriskam laukam. Izteismē (4.8) magnetizēšanas vektors M izsaka polarizēšanās daudzumu, ja materiāls ir pakļauts magnētiskajam laukam.

$$D = \varepsilon_0 \cdot E + P, \quad (4.7)$$

$$B = \mu_0 \cdot (H + M), \quad (4.8)$$

$$j = \sigma \cdot E, \quad (4.9)$$

kur ε_0 – vakuuma dielektriskā permeabilitāte, F/m;

μ_0 – vakuuma magnētiskā caurlaidība, H/m;

P – elektriskās polarizācijas vektors, C/m²;

M – magnetizēšanas vektors, A/m;

σ – īpatnējā elektrovadītspēja, S/m.

Izteiksmes (4.10) un (4.11) parāda, kā izmantojot šādu pieeju, var aprēķināt magnētiskā lauka indukciju. Magnētiskā lauka modeļa gadījumā tiek izmantota izteiksme (4.11), jo magnētīvada materiālām ir zināma magnetizēšanās raksturlīkne, kas ir uzdots tabulas formā un tiek aproksimēta ar lineāru interpolāciju.

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H + B_r, \quad (4.10)$$

$$B = f \cdot (|H|), \quad (4.11)$$

kur μ_r – īpatnējā magnētiskā caurlaidība, H/m;

B_r – paliekošā magnētiskā lauka indukcija, T;

f – materiāla funkcija, kas izsaka tā raksturlielumu sakarību.

Izteiksmes (4.12) un (4.13) ir galvenie aprēķina secības mezgli, kas ļauj iegūt magnētisko potenciālu telpā. Šis raksturlielums arī parādās, ka galvenais mainīgais programmas saskarnē, kad tiek veikts magnētiskā lauka aprēķins. Izteiksme (4.12) tiek izmantota gadījumā, ja magnētiskais lauks tiek rēķināts periodiski (tas ir periodiski mainīgs, bet tā vērtības katra perioda noteiktā laikā ir konstantas). Izteiksme (4.13) tiek izmantota, kad magnētiskais lauks ir mainīgs un var arī nebūt periodiski konstants (var modelēt pārejas procesus). Ir arī iespējams modelēt statiskus laukus, kuru aprēķins ir atšķirīgs [67].

$$(j \cdot \omega \cdot \sigma - \omega^2 \cdot \varepsilon) \cdot (A_{ext} + A_{red}) + \nabla \times (\mu^{-1} \cdot \nabla \times (A_{ext} + A_{red})) = j_e, \quad (4.12)$$

$$\sigma \cdot \frac{\partial}{\partial t} \cdot (A_{ext} + A_{red}) + \nabla \times (\mu^{-1} \cdot \nabla \times (A_{ext} + A_{red})) = j_e, \quad (4.13)$$

kur j – imaginārā komponente;

ω – leņķiskā frekvence, rad/s;

ε – īpatnējā dielektriskā permeabilitāte, F/m;

A_{ext} – fona magnētiskais potenciāls, Wb/m;

A_{red} – reducētais vektoriālais potenciāls, Wb/m;

μ – magnētiskā caurlaidība, H/m;

j_e – ārēji radītās strāvas blīvums, A/m.

Izteiksmes (4.14) – (4.17) ļauj aprēķināt elektriskās un magnētiskās enerģijas un jaudas vērtības. Nepieciešamības gadījumā, ir iespējams aprēķināt attiecīgos jaudas zudumus. Jāatzīmē, ka noteiktos gadījumos tiek veikti pieņēmumi, ka šo zudumu nav un tie netiek aprēķināti.

$$W_e = \int_V (\int_0^D E \cdot dD) dV = \int_V (\int_0^T E \cdot \frac{\partial D}{\partial t} dt) dV, \quad (4.14)$$

$$W_m = \int_V (\int_0^B H \cdot dB) dV = \int_V (\int_0^T H \cdot \frac{\partial B}{\partial t} dt) dV, \quad (4.15)$$

kur W_e – elektriskā enerģija, J;

W_m – magnētiskā enerģija, J;

V – elektriskais potenciāls, V;

T – moments, Nm.

$$P_e = \int_V E \cdot \frac{\partial B}{\partial t} dV, \quad (4.16)$$

$$P_m = \int_V H \cdot \frac{\partial B}{\partial t} dV, \quad (4.17)$$

kur P_e – elektriskā jauda, J/s;

P_m – magnētiskā jauda, J/s.

Izteiksmes (4.18) – (4.21) parāda programmas robežnosacījumu aprēķinu. Lai atvieglotu aprēķinu gaitu, ir iespējams tās reducēt uz izteiksmi (4.22) [67].

$$n_2 \times (E_1 - E_2) = 0 \quad (4.18)$$

$$n_2 \times (D_1 - D_2) = \rho_s, \quad (4.19)$$

$$n_2 \times (H_1 - H_2) = j_s, \quad (4.20)$$

$$n_2 \times (B_1 - B_2) = 0, \quad (4.21)$$

kur n_2 – no virsmas ārēji vērsts perpendikulārs vektors;

ρ_s – virsmas lādiņa blīvums, C/m²;

j_s – virsmas strāvas blīvums, A/m².

$$n_2 \cdot (j_1 - j_2) = -\frac{\partial \rho_s}{\partial t}. \quad (4.22)$$

4.3. Transformatora magnētiskā lauka modeļa izveide

4.3.1. Programmatūras rīki transformatora magnētiskā lauka modeļa izveidei

Lai aprēķinātu radīto magnētisko lauku tā 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 ir 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 (skat. 4.1. tabulu) un ir pieejama Rīgas Tehniskā universitātē. *QuickField* programmatūrai, kas arī atbilst izvirzītajiem kritērijiem, ir pieejama tikai divdimensionāla versija un *Matlab* programmatūrai ir nepieciešams papildus palīgriks, lai iegūtu vajadzīgos elektromagnētiskā lauka rezultātus. *Matlab* programmatūra ir izmantota, lai ģenerētu lineārus skriptu algoritmus, ar kuru palīdzību ir iespējams veikt aprēķinus ar dinamiski mainīgu iterāciju daudzumu un kopējo apjomu, kuri sniegtu nepieciešamus rezultātus elektrodinamisko spēku aprēķināšanai. Turklāt, *Matlab* programmatūra ir galvenais elements, kas savieno un pārveda datus starp visām citām izmantotām programmām. Jāatzīmē, ka izstrādāto vibrāciju modeli var realizēt, izmantojot arī citas programmatūras, kuras atbilst visiem izvirzītajiem kritērijiem.

Aplūkotās programmatūras magnētiskā lauka aprēķina veikšanai

Programmatūra	3D modelēšana	Dinamiska magnētiskā lauka modelēšana	Datu eksportēšana	Programmatūras apraksts
<i>ANSYS</i>	Jā	Jā	Jā	Kā viena no paredzētām funkcijām ir magnetodinamisku modeļu veidošana. Ir iebūvēta materiālu bibliotēka un ir iespējams manuāli pievienot vai izveidot jaunus materiālus [45].
<i>COMSOL</i>	Jā	Jā	Jā	Piedāvā iespēju veidot laikā mainīgus elektromagnētiskos laukus. Tajā ir iebūvēta materiālu bibliotēka un liels skaits moduļu, kuru aktivizēšana nosaka magnētiskā lauka modeļa dimensiju skaitu, elektromagnētiskā lauka raksturlielumu aprēķinu un to izmaiņas laikā [21].
<i>ELMER</i>	Nē	Jā	Jā	Ir nepieciešams definēt modelējamās problēmas tipu un raksturlielumus, jo programmatūra nav modulāra, un ir vajadzīgs uzdot fizikālo procesu vienādojumus. Ir iekļauta materiālu bibliotēka [70].
<i>Finite Element Magnetics FEMM</i>	Nē	Jā	Jā	Paredzēta tieši elektrostātisku un magnetostatisku problēmu risināšanai. Ir ierobežota ar divdimensionālu telpu un tajā nav iebūvētas materiālu bibliotēkas [56].
<i>Matlab</i>	Jā	Jā	Jā	Dinamisku elektromagnētisko problēmu risināšanu atbalsta tikai noteikts programmatūras pievienojums, kurš var importēt un eksportēt datus no kopējas mainīgo raksturlielumu atmiņas kopas. Nav iebūvēta atsevišķa materiālu bibliotēka [49].
<i>MaxFEM</i>	Jā	Jā	Nē	Ir modulāra tipa, lietotājs var modificēt tās interfeisu, gan aprēķināmās problēmas gaitu. Nav iebūvēta materiālu bibliotēka [55].
<i>OpenFoam</i>	Jā	Jā	Nē	Ir paredzēta elektromagnētisko lauku modelēšanai, bet lietotājam ir nepieciešams iteratīvi ievadīt nepieciešamo informāciju par modelējamo problēmu pēc katra magnētiskā lauka modeļa soļa veikšanas. Nav atsevišķi iebūvētas materiālu bibliotēkas, bet lietotājs var tādu nodefinēt un izveidot [30].
<i>Opera Software</i>	Jā	Jā	Nē	Lietotāja interfeisā netiek dotas automātiskas opcijas, lai konfigurētu magnētiskā lauka modeli, tas ir jādara manuāli. Papildus, nav iekļauta materiālu bibliotēka. Katram izveidotam magnētiskā lauka modeļa domēnam ir nepieciešams manuāli piešķirt visus tā raksturlielumus [63].

Aplūkotās programmatūras magnētiskā lauka aprēķina veikšanai

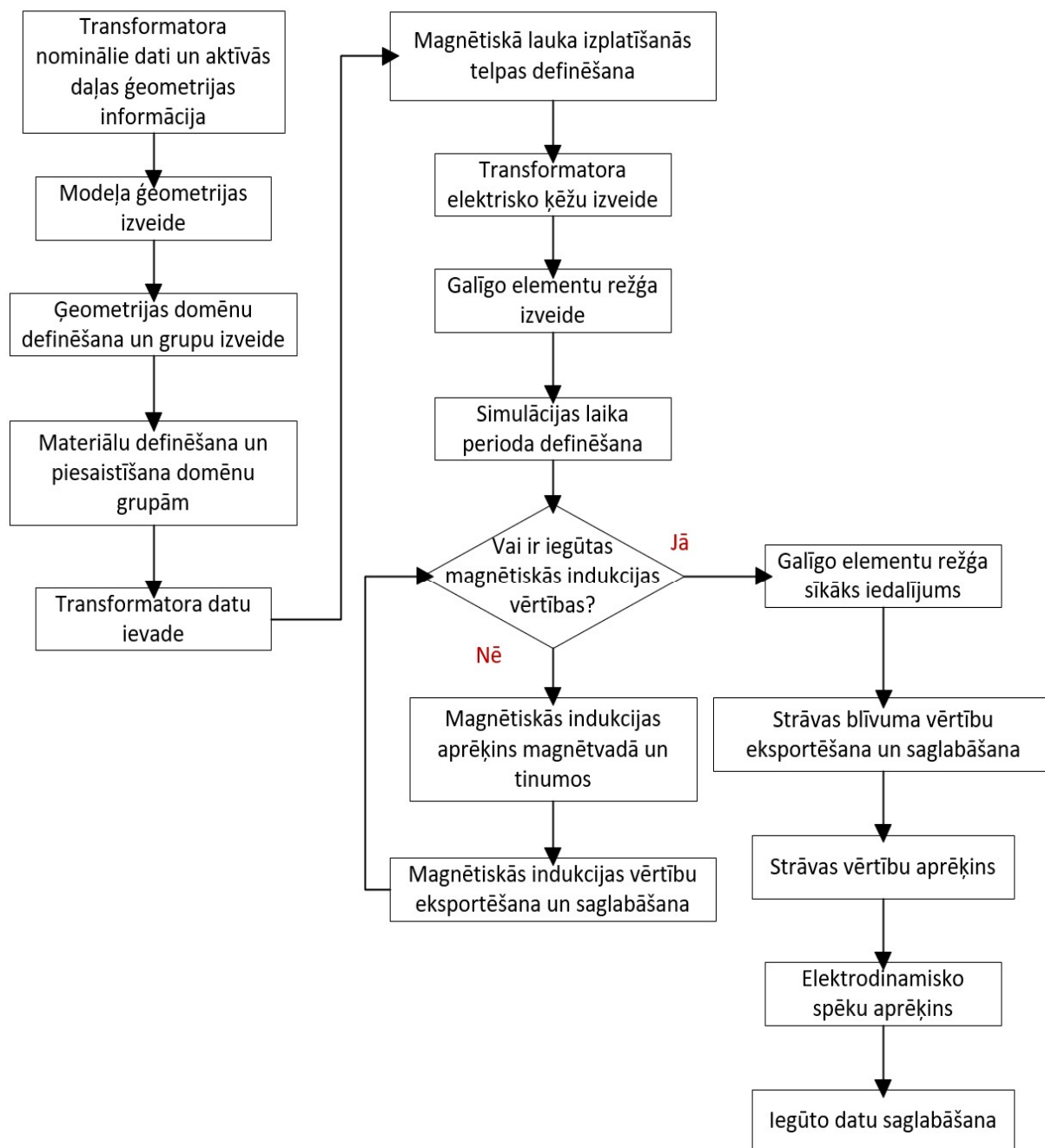
Programmatūra	3D modelēšana	Dinamiska magnētiskā lauka modelēšana	Datu eksportēšana	Programmatūras apraksts
<i>QuickField</i>	Jā	Jā	Jā	Paredzēta elektromagnētisku modeļu veidošanai, bet netiek atbalstīta augstfrekvenču modelēšana. Nav iekļauta materiālu bibliotēka [69].
<i>Solidworks</i>	Jā	Jā	Jā	Ir domāta priekš elektromagnētisku problēmu risināšanas. Ir iebūvēta materiālu bibliotēka [38].
<i>Vizimag</i>	Nē	Jā	Jā	Piedāvā elektromagnētiskā lauka modelēšanu, bet ir zināmi ierobežojumi, jo pastāv tikai divdimensionāla modelēšana, nav iebūvētas materiālu bibliotēkas un ir atbalsts tikai statiskām problēmām [8].

4.3.2. Transformatora magnētiskā lauka modeļa darbības kopsavilkums un veiktie pieņēmumi

4.1. attēls parāda transformatora magnētiskā lauka modelēšanas blokshēmu, kura ir pielāgota *COMSOL* programmatūras darbības īpatnībām un kur gala rezultāts ir tā radīto elektrodinamisko spēku rezultāti.

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 magnētiskā lauka aprēķina gaitā veiktie pieņēmumi ir:

- visi izveidotie domēni ir homogēni;
- magnētvars 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;
- magnētvara magnetizēšanās līkne tiek interpolēta lineāri;
- transformatora magnētiskā lauka modelī netiek ņemti vērā citi transformatora konstrukcijas elementi, kas var izraisīt magnētiskā lauka esamību;
- magnētvara materiāls ir izotropisks tā modelēšanas plaknē;
- transformatora elektriskā ķēde ir norobežota ar perfektiem izolatoriem.



4.1. att. Transformatora magnētiskā lauka un elektrodinamisko spēku aprēķina blokshēma.

Primārās puses fāzes spriegums V_{ac} tiek aprēķināts ar izteiksmi

$$V_{ac} = \frac{U_{p1}}{\sqrt{3}}, \quad (4.23)$$

kur U_{p1} – primārās puses līnijas spriegums, V.

Visu tinumu vijumu skaits (N_p un N_s) tiek pieņemts, balstoties uz transformācijas koeficienta vērtību. Primārās puses vienas fāzes pretestību R_p aprēķina ar izteiksmi (4.24), bet sekundārās puses pārveidotās ekvivalentās zvaigznes slēguma vienas fāzes pretestību R_s aprēķins ir parādīts izteiksmē (4.25).

$$R_p = 3 \frac{U_{pf}^2}{S}, \quad (4.24)$$

kur U_{pf} – primārās puses fāzes spriegums, V;

S – transformatora nominālā jauda, MVA.

$$R_s = 2 \frac{U_{sf}^2}{S}, \quad (4.25)$$

kur U_{sf} – sekundārās puses fāzes spriegums, V.

Primārā sprieguma pusē visas fāzes transformatora magnētiskā lauka modelī tiek pieslēgtas pie ideāla sprieguma avotiem ar uzdoto amplitūdu un frekvenci. Tām arī tiek uzdota attiecīga aktīvā pretestība. Sekundārā sprieguma puse arī ir jāizveido kā zvaigznes slēgums. Gadījumos, ja pārbaudāmais transformators ir trīstinumu, tad visu spriegumu pakāpju tinumiem ir jāizveido zvaigznes slēgums ar ekvivalentām tā pretestībām, lai transformatora magnētiskā lauka modeļa rezultātā transformatora tinumos nominālā darbības režīmā raksturlielumu vērtības neatšķirtos no pasēs datiem. Tas ir vajadzīgs, jo *COMSOL* programmatūra neatbalsta virknē slēgtus inducētā sprieguma avotus, kas ir nepieciešams trīsstūra slēguma gadījumā [67]. Līdz ar to, sekundārā sprieguma puse tiek pārveidota par trīs elektriskajiem lokiem ar kopīgu zemējumu pēc patērētāju pretestībām, lai izvairītos no šīs problēmas un simulēt nominālu vai mainīgu šī transformatora slēguma slodzes režīmu.

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 lieljaudas transformatora tinumos 40 reizes vienā avota sprieguma periodā, un no šiem datiem pēc tam var aprēķināt citus nepieciešamos mainīgos raksturlielumus ar tādu pašu iterāciju soļa lielumu.

4.3.3. Ģeometrijas izveide un domēnu un materiālu definēšana

Sākotnēji *COMSOL* programmatūrā tiek izvēlēts AD/DC modulis [67], kurš sevī iekļauj visus nepieciešamos aprēķinu blokus, lai būtu iespējams realizēt 4.1. attēla blokshēmu. Pēc tam, ir jāizveido pārbaudāmā lieljaudas transformatora aktīvās daļas ģeometriskie elementi:

- tinumi;
- magnētqvads;
- apkārtējā telpa, kurā ir iespējama magnētiskā lauka izplatība.

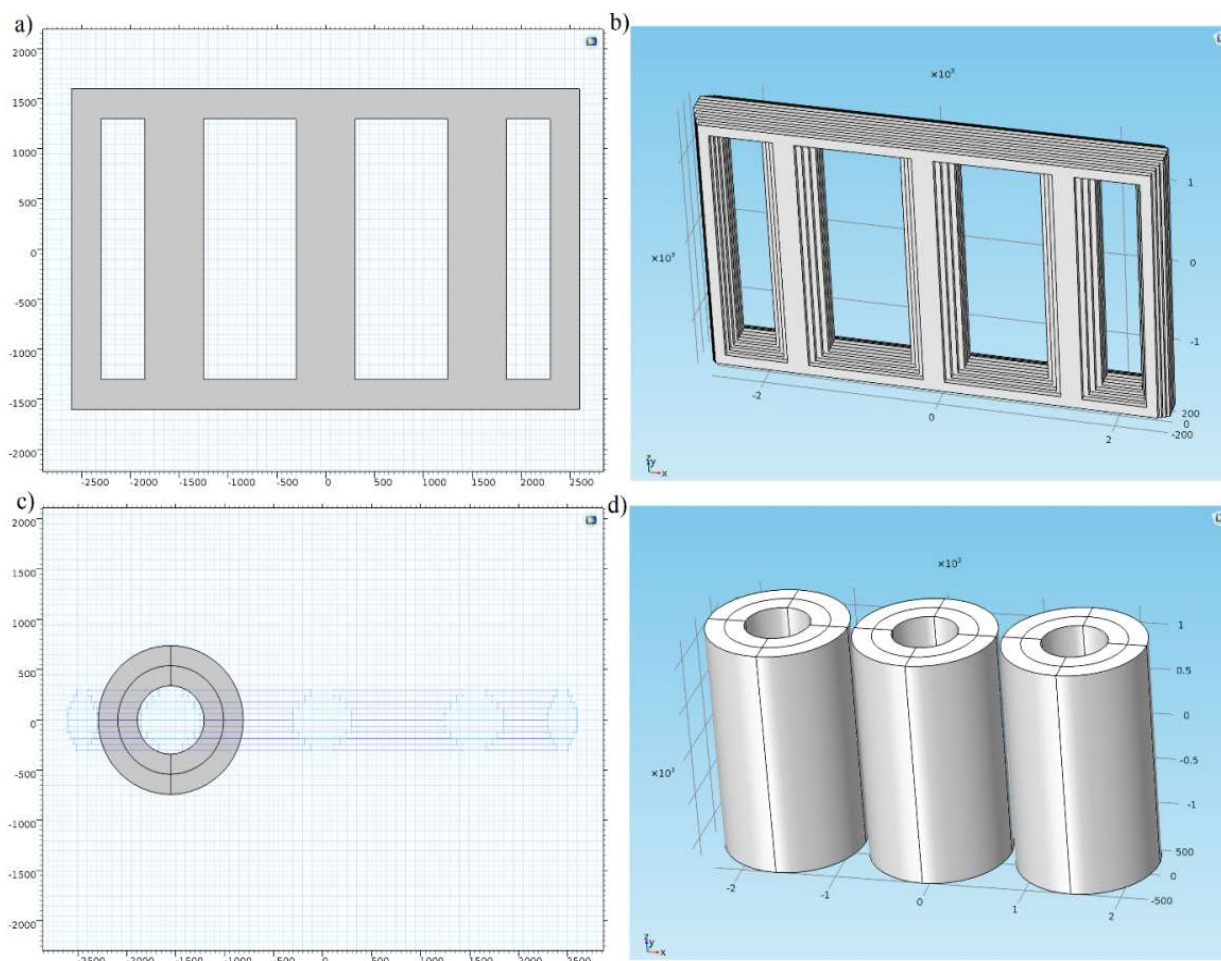
Kā minēts 2.2.2 apakšnodaļā, transformatora magnētqvada ģeometrijas konstrukcija tiek veidota no paralēlskalduiem. Ja magnētqvada stieniem vai jūgiem ir liekta virsma, kas to šķērsgriezumā ir aplis vai ovāla forma, šī forma tiek pielīdzināta ar atšķirīgu izmēru taisnstūriem. Līdz ar to, magnētqvads tiek izveidots no vairākām atšķirīga izmēra plāksnēm. 4.2. a) attēls ilustrē lieljaudas transformatora magnētqvada domēna izveidi vienā plaknē divtinumu transformatoram ar piecu stieņu magnētqvadu. Pēc tam šis domēns tiek projicēts trīs dimensiju telpā kā attēlā parādītās plaknes ģeometrija ar noteiktu biezumu. Šis paņēmiens atļauj

izveidotās domēnu projekcijas novietot ģeometrijas telpas vienā plaknē un nepieciešamības gadījumā veikt izmaiņas ģeometrijā, tikai modificējot domēnu projekcijas. 4.2. a) attēla parādītā ģeometrijā šis process tiek atkārtots vēl 9 reizes, lai tiktu iegūti 10 ģeometriskie domēni, kas raksturo izstrādātā vibrāciju modeļa transformatora magnēt vadu. Šī etapa rezultāts ir parādīts 4.2. b) attēlā, kur ir redzamas 10 plāksnes, kas, ļauj iegūt magnēt vada formu, kuras šķērsriezums ir līdzīgs šķērsriezuma formai realitātē. 10 plākšņu daudzums ir pietiekošs, lai būtu iespējams iegūt attiecīgu formu, lai nerastos magnētiskā lauka indukcijas rezultātu kļūdas neprecīza magnēt vada ģeometriskā modeļa dēļ [50].

Transformatora tinumi tiek definēti kā cilindri ar noteikta izmēra ārējo diametru un zināmu biezumu gan ārējām, gan iekšējam tinumam. Jāatzīmē, ka ir atsevišķi jāizveido visu sprieguma pakāpju tinumi katrai fāzei to attiecīgajās pozīcijās transformatora ģeometrijā, jo *COMSOL* programmatūrā katrs uzdotā transformatora tinums darbojas kā individuāla tā sastāvdaļa. Līdz ar to, nedrīkst vairāku sprieguma pakāpju tinumus apvienot vienā monolītā blokā. 4.2. c) attēls ilustrē lieljaudas transformatora augstākās un zemākās sprieguma puses vienas fāzes tinumu projekciju aksiālā plaknē. Šī projekcija tiek izmantota, lai izveidotu trīsdimensionālus transformatora tinumus visām sprieguma pakāpēm. Tai tiek piešķirts noteikts biezums, kas atbilst tinumu augstumam. Līdz ar to, tiek izveidoti cilindriski domēni, kuri sastāv no 1,571 radiānu sektoriem. Pēc tam šī ģeometrija tiek kopēta, lai izveidotu tinumu domēnus atlikušajām fāzēm. Šī attiecīgā procesa rezultāts ir redzams 4.2. d) attēlā. Atšķirīgu sprieguma pakāpju vai fāžu gadījumā, tinumu ģeometriskā modeļa izveide var tikt modificēta, izmainot tinumu kopēšanas daudzumu un katras projekcijas individuālo tinumu skaitu, kas ir brīvi pārveidojams. Tas ir skaidrojams, ar to, ka katrs tinums darbojas autonomi un ģenerē magnētisko lauku, kurš šķēļ apkārtējos ģeometrijas domēnus, kuriem visiem ir uzdota sava magnētiskā caurlaidība no tā pievienota materiāla datiem.

Tad tiek definēts, kuros domēnos plūdis strāva un kuros izplatīsies magnētiskais lauks. Šī iemesla dēļ ir nepieciešams, sākumā izvēloties *COMSOL* piedāvātos atšķirīgos fizikālos modeļus, aktivizēt laikā dinamiski mainīgo elektromagnētisko lauku aprēķināšanu, kas sevī ietver Maksvela vienādojumu veidošanu un atrisināšanu.

Pēc atsevišķo lieljaudas transformatora aktīvās daļas elementu domēnu izveides, tiek piešķirts telpas apgabals, kurš nosaka magnētiskā lauka aprēķina robežas. Tā kā transformatora aktīvas daļas tinumu un magnēt vada domēni nav fiziski savienoti un starp tiem atrodas transformatoru eļļa, šo apgabalu ir nepieciešams definēt, jo, lai tiktu precīzi modelēts transformatora radītais magnētiskais lauks, ir nepieciešams modelēt arī tā izkliedes komponenti, kura atrodas ārpus magnēt vada [44]. Tas tiek panākts kā paralēlskalda izveide, kurš sevī pilnībā ietver transformatora aktīvās daļas domēnus un ir noteikts minimāls attālums, par kuru ārējo robežu domēns ir lielāks par aktīvās daļas domēniem visu ģeometrijas asu virzienos.



4.2. att. Lieljaudas transformatora aktīvās daļas ģeometrijas elementi:

a) magnētveda sloksnes projekcija, b) magnētveds, c) tinumu projekcija, d) tinumi.

Jāatzīmē, ka dotajā materiālu bibliotēkā elektrotehniskais tērauds ir uzdots bez magnetizēšanās līknes, kas izsaka magnētiskās indukcijas atkarību no magnētiskās intensitātes materiālā. Līdz ar to, šī līkne $B=f(H)$ tabulas formā ir jāuzdod un jāpiesaista magnētveda domēnu materiālam, pielāgojot katram konkrētam gadījumam.

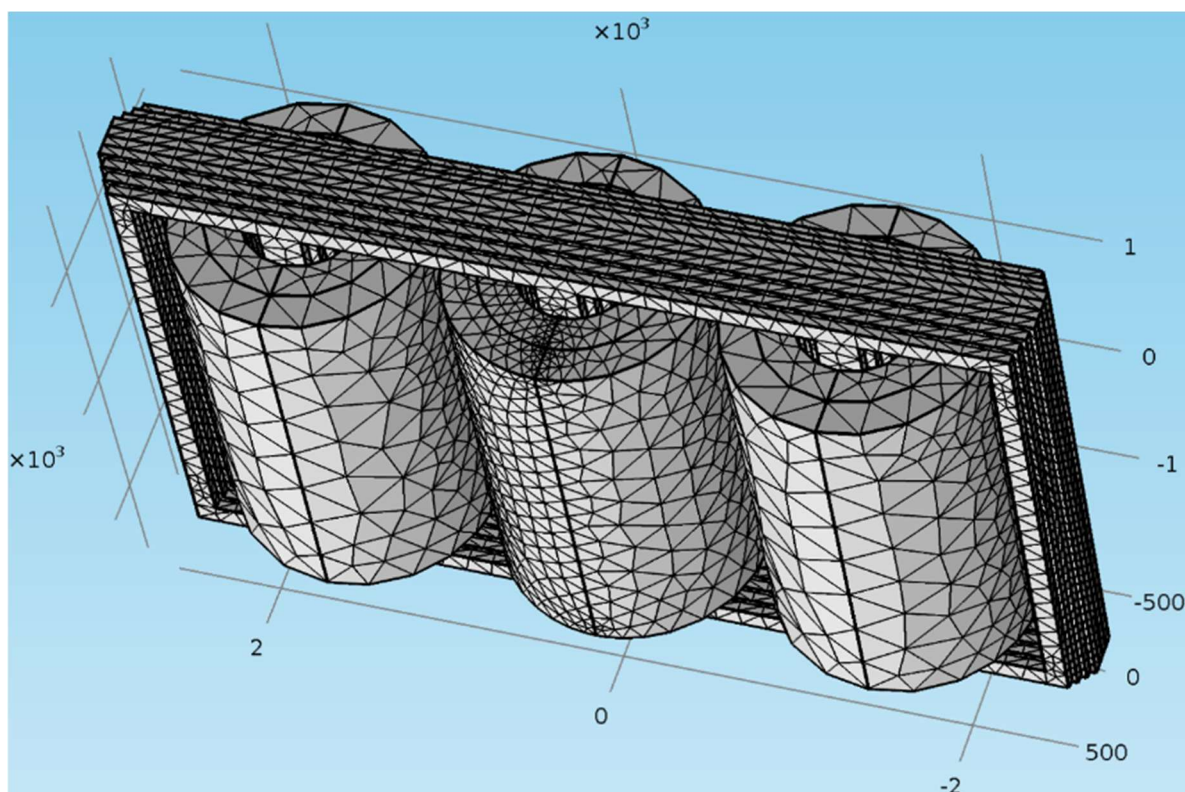
4.3.4. Galīgo elementu režģa definēšana un izveide

Kad definēti materiāli, veikti izteiksmju (4.23) – (4.25) aprakstītie aprēķini un veikta datu ievade, ir nepieciešams ģenerēt galīgo elementu metodes režģi. Elementu izmēri tiek definēti ar atšķirīgu precizitāti, lai iegūtu apmierinošu modelēšanas aprēķinu precizitāti transformatora ģeometriskā modeļa pozīcijās, kurās ir nepieciešams paaugstināts datu punktu blīvums telpā. Līdz ar to, galīgo elementu izmēri ir uzdoti ar atšķirīgām to izmēru robežām attiecīgajās transformatora ģeometriskā modeļa sastāvdaļās (skat. 4.2. tabulu). Jāatzīmē, ka GEM režģa fragmentu izmēri katram tā pielietojumam ir proporcionāli transformatora aktīvās daļas izmēriem, kuri tiek modelēti. Tāpēc nav iespējams uzdot režģa fragmentu izmērus, kuri ir atbilstoši visiem gadījumiem.

Transformatora ģeometriskā modeļa sastāvdaļu galīgo elementu režģa izmēri

Modeļa sastāvdaļa	Minimālais izmērs, mm	Maksimālais izmērs, mm
Transformatora eļļa	144	800
Magnētvars	560	4000
Primārie tinumi	144	800
Sekundārie tinumi	144	800
Tinuma šķēsgriezums strāvas blīvuma iegūšanai	1,6	160

Magnētvadam uzdotie limiti ir no 560 līdz 4000 milimetriem, proti, lielākais programmas GEM režģa izmērs, jo magnētvara konstrukcija nesatur liektas formas un tas ir jāaizstāj ar minimālu skaitu elementu, lai nepalēninātu programmatūras darbību. Jāatzīmē, lai noteiktu strāvas blīvuma rezultātus, ir nepieciešams iteratīvi atsevišķas fāzes tinuma šķēsgriezumu uzdot ar maksimāli detalizētu precizitāti. Šāda pieeja neapgrūtina aprēķinu gaitu, jo paaugstinātais galīgo elementu skaits ir tikai lokālā apgabalā. 4.3. attēls parāda vienu šādu GEM tīkla konfigurāciju, kad aprēķinu ietvaros B fāzes tinumiem tiek uzdota lielāka precizitāte.



4.3. att. Ģenerētais GEM tīkls turpmākai B fāzes modelēšanai.

Pēc šī soļa programmatūra ir pilnībā sagatavota magnētiskā lauka ainas un magnētiskās indukcijas vektoriālo vērtību iegūšanai.

4.4. Elektrodinamisko spēku aprēķins

Pēc magnētiskās indukcijas rezultātu ieguves, šie dati tiek eksportēti tālākai to izmantošanai, aprēķinot radītos elektrodinamiskos spēkus, ko raksturo izteiksme (4.1).

Tālākam aprēķinam ir nepieciešamas arī strāvas blīvuma vērtības transformatora tinumos tangenciālā virzienā. Tinumu ģeometriskajā modelī visas sastāvdaļas ir izveidotas kā domēni, līdz ar to, nav modelēts katrs vijums atsevišķi, bet tinuma šķērsriezuma kopējā strāva. Izteiksmē (4.1) nepieciešamo strāvas vērtības vektoru ir iespējams aprēķināt, izmantojot aprēķināto strāvas blīvuma vērtību un transformatora ģeometriskā modeļa tinuma šķērsriezuma laukumu, kuram šī vērtība tiek modelēta.

Pēc strāvas blīvuma datu ieguves tie tiek eksportēti, un tiek aprēķināta vidējā strāvas blīvuma vērtība:

$$j_{vid} = \frac{\sum_{i=1}^n j_i}{n}, \quad (4.26)$$

kur j_{vid} – vidējais tinuma strāvas blīvums, A/m²;

j_i – noteikta transformatora ģeometriskā modeļa telpas punkta strāvas blīvums, A/m²;

n – telpas punktu skaits, kuros ir izmērīts strāvas blīvums attiecīgajam tinumam.

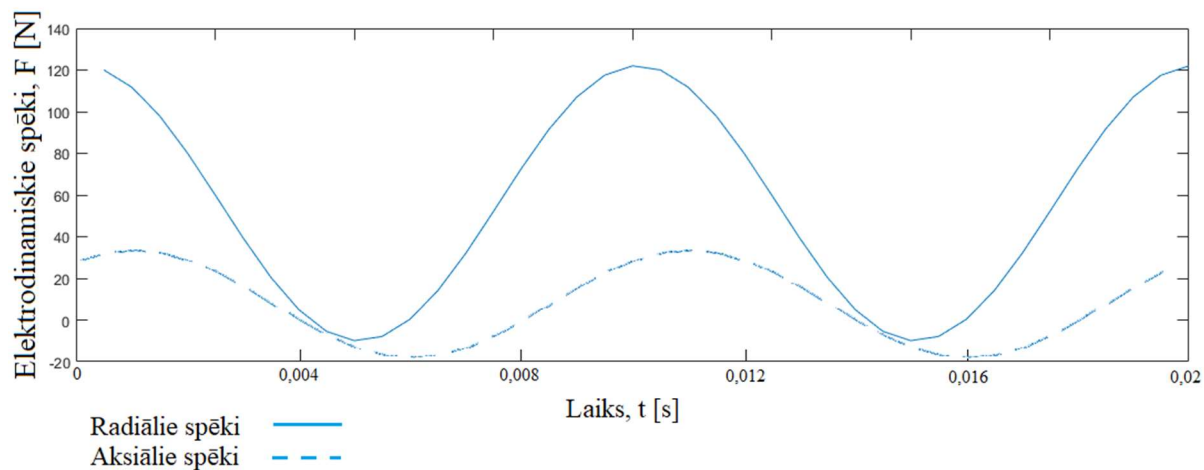
Ar izteiksmi (4.27) tiek aprēķināta strāvas vērtība tinumos, jo ir zināms to šķērsriezuma laukums

$$I = \frac{j_{vid}}{S_t}, \quad (4.27)$$

kur S_t – tinuma šķērsriezuma laukums, m².

Tā kā ir nepieciešams aprēķināt tinumu elektrodinamisko spēku aksiālās un radiālās vektoru komponentes, ir nepieciešams izmantot izteiksmi (4.1) divas reizes. Katrā no tām mainās magnētiskās indukcijas vektora komponente, jo ir nepieciešams izveidot 1,57 radiānu lielu leņķi starp magnētiskās indukcijas un strāvas komponentēm. Tāpēc tiek izmantotas magnētiskās indukcijas aksiālās un radiālās komponentes perpendikulāri vajadzīgajām elektrodinamisko spēku komponentēm. Jāatzīmē, ka visi transformatora magnētiskā lauka modeļa aprēķinu rezultātā iegūtie mainīgie raksturlielumi jau ir doti kā vektoru komponentes trīs dimensijās.

Līdz ar to, ir zināmi visi vajadzīgie raksturlielumi, lai iegūtu transformatora magnētiskā lauka modeļa radīto elektrodinamisko spēku aksiālās un radiālās komponentes. 4.4. attēls ilustrē šo spēku radiālās un aksiālās komponentes vērtības atkarībā no laika.



4.4. att. Aprēķinātie radiālie un aksiālie elektrodinamiskie spēki vienam tinumu fragmentam.

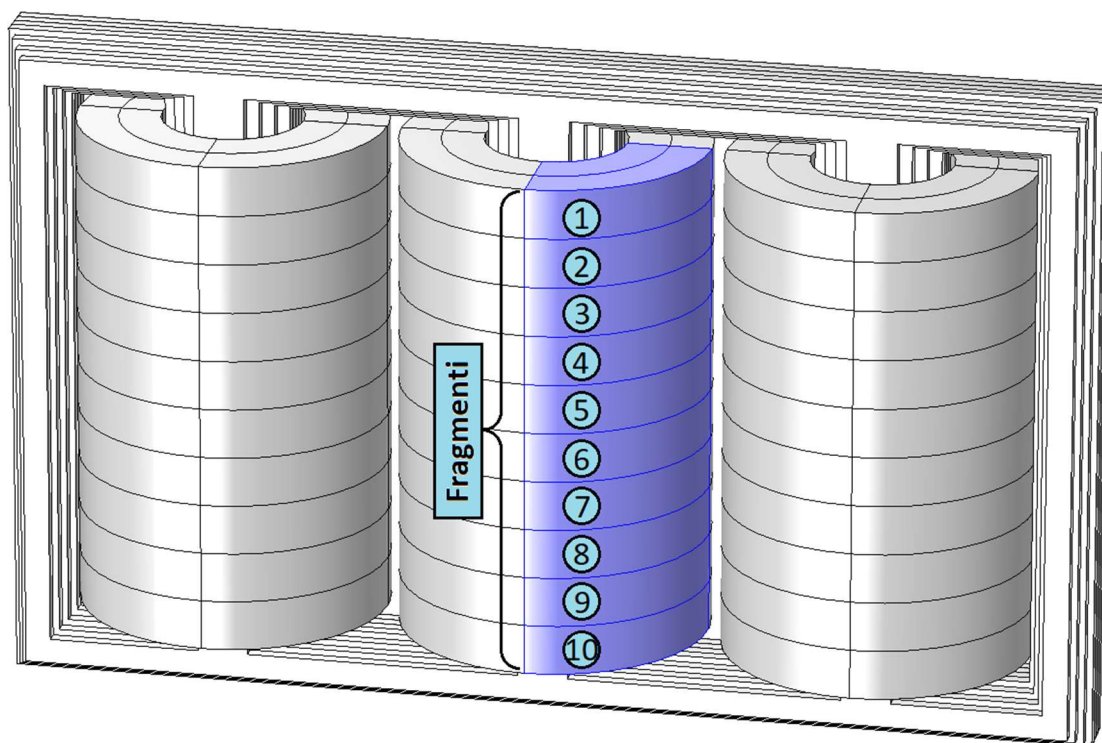
Ir redzams, ka 0,02 sekunžu laikā, kas ir viens dotā sprieguma un aprēķinātās strāvas periods, ir novērojami divi periodi elektrodinamisko spēku grafikam. Tas ir skaidrojams ar to, ka katra strāvas pusperioda laikā, tā sasniedz savu maksimālo vērtību divas reizes. Līdzīgs raksturs ir magnētiskās indukcijas vektoru vērtībām. Tā kā, stāvas un magnētiskās indukcijas vektori abi maina savu vektoriālo virzienu uz pretējo, bet saglabā savas maksimālās vērtības katrā pusperiodā, elektrodinamisko spēku vērtība paliek nemainīga.

5. VIBRĀCIJU SIMULĀCIJA AR MASU UN ATSPERU SISTĒMĀM

5.1. Tinumu masu un atsperu sistēma

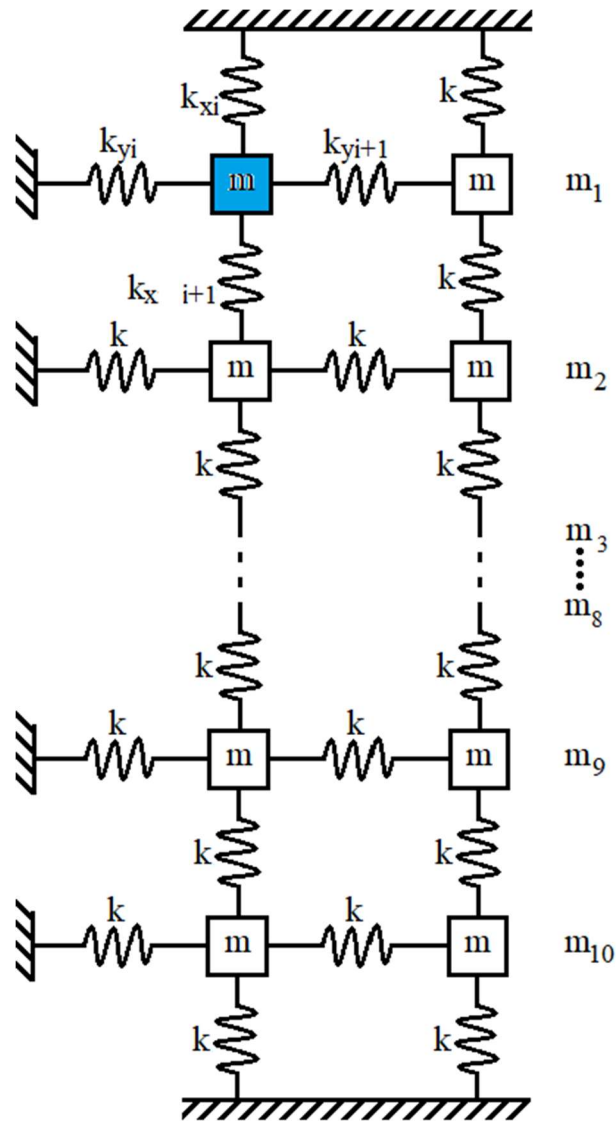
Transformatora tinumu vibrāciju simulācijai izstrādātā vibrāciju modeļa ietvaros tiek lietota masu un atsperu sistēma. Katram sistēmas elementam tiek definēta tā masa, blakus esošo atsperu stinguma koeficienti un tiek pievienoti iepriekš transformatora magnētiskā lauka un elektrodinamisko spēku aprēķina blokā 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.

Katras iterācijas laikā tiek aprēķinātas tinumu vibrāciju vērtības 1,57 radiānu sektoram no vienas transformatora tinumu fāzes, lai iegūtu tinumu vibrāciju vērtības visiem transformatora tinumu fragmentiem. 5.1. attēls parāda vienas iterācijas vizualizāciju, kur izcelts tinumu segments, kas tiek sadalīts 10 fragmentos, kuri ir identiska izmēra un masas un kuram tiek aprēķinātas tā radītās svārstības aksiālā un radiālā virzienā. Skaitļi no 1 līdz 10 ilustrē tinumu masu sadalījumu aksiālā virzienā.



5.1. att. Atzīmētais tinuma segments.

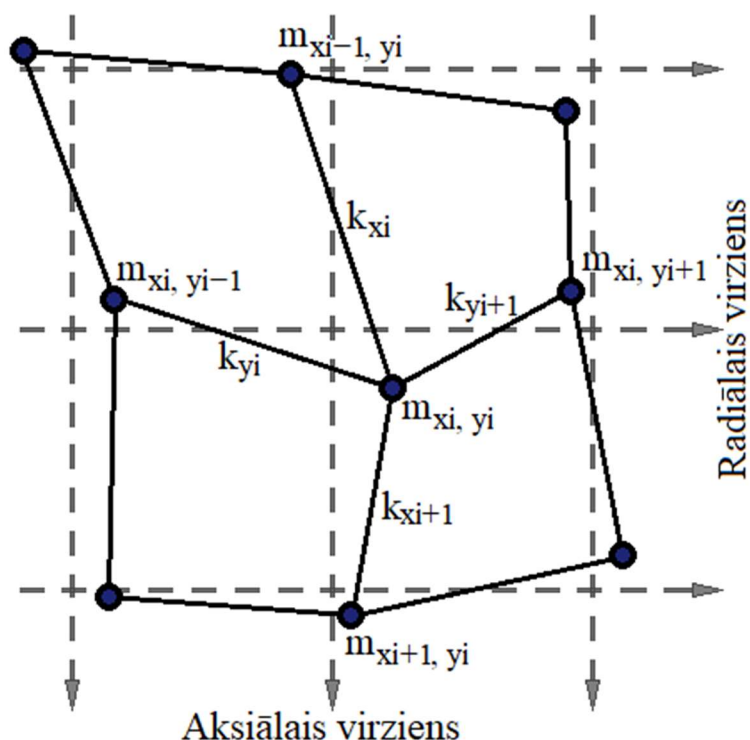
Šis process tiek veikts gan ar iekšējo, gan ar ārējo tinumu, līdz ar to tiek izveidoti 20 masu elementi.



5.2. att. Masu un atsperu sistēmas fragmenta šķērs griezums radiālā plaknē.

Kā var redzēt 5.2. attēlā, katrs masas elements ir savienots ar divām atsperēm radiālā virzienā un ar divām atsperēm aksiālā virzienā. Līdz ar to, pievienojot elektrodinamisko spēku ietekmi, šīs masas ir spējīgas kustēties divās asīs, kas ir nepieciešams, lai iegūtu transformatora masu un atsperu sistēmas matemātiskā modeļa tinumu ģenerētās vibrācijas radiālā un aksiālā virzienā visiem izveidotajiem masu un atsperu sistēmas elementiem.

Atsevišķa masas elementa $m_{xi,yi}$ kustība un tam pievienotās atsperes ir vizualizētas 5.3. 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 pietiekoši precīzi aprēķināt katra masas elementa koordinātas noteiktā laika intervālā un tā mijiedarbību ar blakus esošo masu elementu nobīdi no to sākotnējā līdzsvara stāvokļa.



5.3. att. Masu un atsperu sistēmas ilustrācija vienam masas elementam.

Šo masu kustību izsaka šādi:

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

kur m_i – masas elementa masa, kg;

x_{i-1} ; x_i ; x_{i+1} – masas elementa, tam sekojošā un iepriekšējā masas elementa radiālā virzienā pozīcija radiālā virzienā, m;

x_{j-1} ; x_j ; x_{j+1} – masas elementa, tam sekojošā un iepriekšējā masas elementa radiālā virzienā pozīcija aksiālā virzienā, m;

y_{i-1} ; y_i ; y_{i+1} – masas elementa, tam sekojošā un iepriekšējā masas elementa aksiālā virzienā pozīcija radiālā virzienā, m;

y_{j-1} ; y_j ; y_{j+1} – masas elementa, tam sekojošā un iepriekšējā masas elementa aksiālā virzienā pozīcija aksiālā virzienā, m;

k_{xi} ; k_{xi+1} – radiālā virziena atsperu stinguma koeficienti;

k_{yi} ; k_{yi+1} – aksiālā virziena atsperu stinguma koeficienti;

$F_{xi}(t)$ – elektrodinamiskais spēks radiālā virzienā;

$F_{yi}(t)$ – elektrodinamiskais spēks aksiālā virzienā.

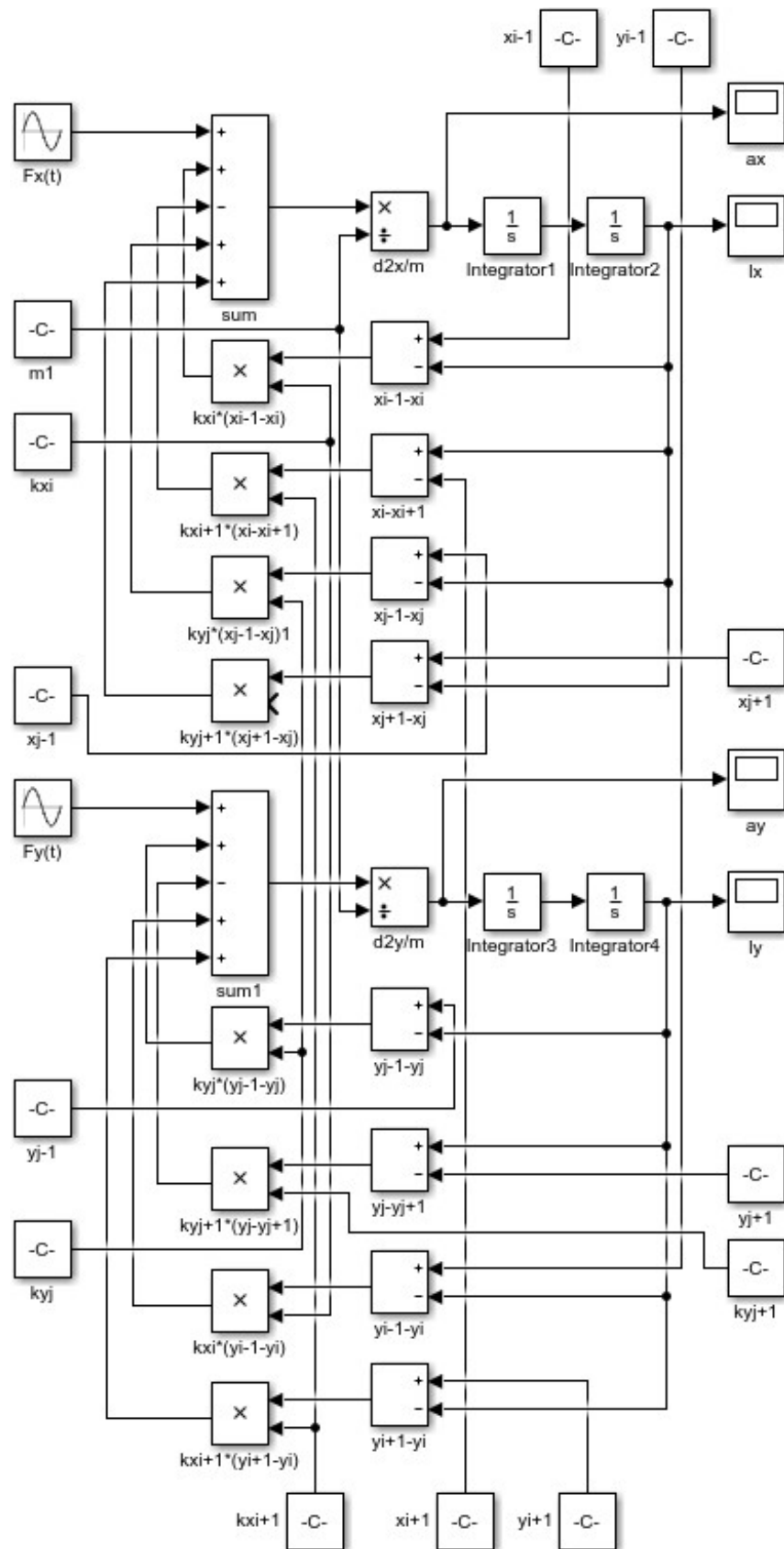
Jāatzīmē, ka šie brīvas kustības vienādojumi neiekļauj bremzēšanu, kas masu un atsperu sistēmā netika iekļauta, jo vibrāciju amplitūdas ir relatīvi mazas un bremzēšanas efekts būtiski neietekmē vibrāciju rezultātus.

Jāpiemin, ka noteiktam skaitam masas elementu pieslēgto atsperu konfigurācija ir atšķirīga. Masu un atsperu sistēmas matemātiskā modeļa iekšējā tinuma masu elementiem radiālā virziena atsperes, kas ir savienotas ar konstrukciju magnētvara virzienā, ir definētas kā savienotas ar nekustīgu objektu, jo šajā transformatora vibrāciju modeļa etapā magnētvara radītās vibrācijas netiek ņemtas vērā. Līdzīga situācija ir masu elementiem, kuri atrodas pašā tinuma augšā vai apakšā. Tiem pievienotās virsmas caur atsperēm aksiālā virzienā arī tiek uzskatītas par nekustīgiem objektiem. Savukārt, masu un atsperu sistēmas elementiem, kuri simulē ārējā tinuma fragmentus, pievienotās atsperes radiālā virzienā tiek savienotas ar transformatoru eļļu. Tāpēc, to stinguma koeficienti tiek definēti kā 0, jo tiek pieņemts, ka transformatoru eļļa relatīvi salīdzinājumā ar cieta materiāla konstrukcijām ir bezgalīgi elastīga.

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 gan importēt, gan 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 atspere, tāpēc visa signālu plūsmu shēma ir iekšēji savienota. 5.4. attēls ilustrē masu un atsperu sistēmas viena masas elementa shēmu *Matlab Simulink* vidē. Ilustrācijā ienākošās blakus esošo masu pozīciju vērtības ir konstantes, bet masu un atsperu sistēmas matemātiskā modeļa shēmā tās ir simulētās vērtības no cita shēmas elementa. Detalizētāks apraksts dots autora rakstā [53].

Tā kā brīvās kustības vienādojumi ir otrās pakāpes diferenciālvienādojumi, shēmā tiek izmantoti integrēšanas bloki, jo ir nepieciešams iegūt gan pārvietojuma l , gan paātrinājuma a vērtības katram masas elementam. Elektrodinamiskie spēki tiek pievadīti kā perfekti sinusoidāli signāla avoti, kuriem tiek automātiski pievienoti dati no iepriekš eksportētajiem elektrokinamisko spēku datiem gan aksiālā, gan radiālā virzienā. Vienādojumu matemātiskā vienādošana notiek summēšanas blokā, kur ir pievienoti visi vienādojumā esošie saskaitāmie, elektrokinamisko spēku signāli un iepriekšējās iterācijas vērtības.

Kā rezultātu, šī shēma aprēķina masu un atsperu sistēmas katra elementa pozīciju aksiālā un radiālā virzienā noteiktā laika posmā un ar definētiem laika intervāliem katrai atsevišķai iterācijai. Šie dati tiek saglabāti un no tiem tiek aprēķināta vibrāciju amplitūdas vērtība, atrodot masu elementu pozīciju globālos ekstrēmus noteiktā laika periodā. Jāatzīmē, ka vibrāciju amplitūdas aprēķins neizmanto vibrāciju informāciju no simulācijas sākuma, kad ir novērojams pārejas process, jo elektrokinamisko spēku funkcija nav simetriska abos pretējos kustību virzienos. Turklāt masu un atsperu sistēmas visi elementi sākotnēji atrodas to līdzsvara stāvokļos. Līdz ar to, ir nepieciešams laika intervāls, kas ir uzstādīts kā 2 sekundes, lai šis pārejas process noritētu pietiekoši daudz, un tā ietekmi varētu neņemt vērā.

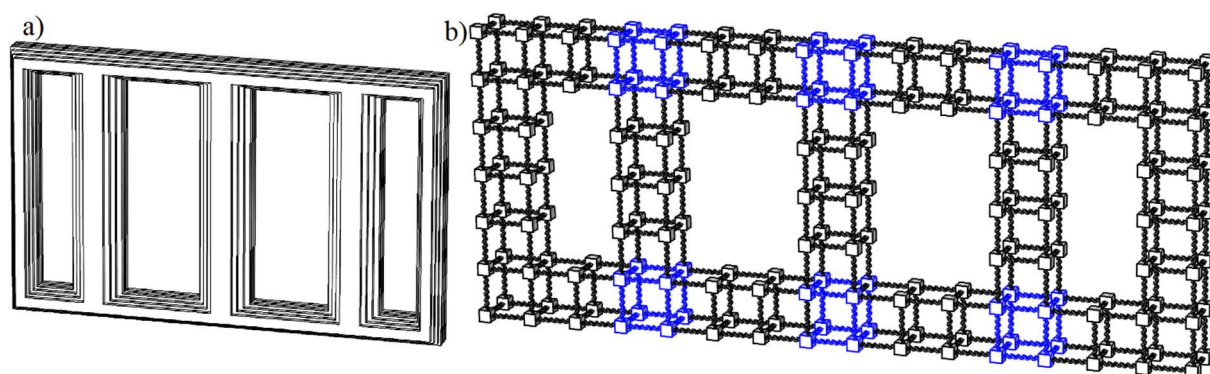


5.4. att. Masu un atsperu sistēmas matemātiskā modeļa viena masas elementa shēma
Matlab Simulink vidē.

5.2. Magnētvida masu un atsperu sistēma

Masu un atsperu sistēma vibrāciju modelēšanai lieljaudas transformatora magnētavadā ir izpildīta līdzīgi kā transformatora tinumos. Visizteiktākā atšķirība magnētvida masu un atsperu sistēmas izveidei ir papildus pievienotā dimensija. Transformatora tinumiem vibrāciju modelēšana tiek veikta aksiālos un radiālos virzienos, tāpēc ir iespējams noteikt radītās vibrācija trīsdimensionālā telpā. Savukārt, magnētvida radīto vibrāciju modelēšanai nav iespējams pielietot radiālus vibrāciju virzienus, jo šis transformatora aktīvās daļas elements nav simetrisks polārās koordinātās nevienā asī. Līdz ar to, masu un atsperu sistēma ir jāveido ar trešo dimensiju. Šis transformatora ģeometriskā modeļa aspekts tiek panākts ar vismaz 2 masu elementiem jebkuras ass virzienā, jo šādā gadījumā ir iespējama transformatora ģeometriskā modeļa konstrukcijas liece jebkurā no 3 dimensijām (sīkāk skat. autora rakstā [51]). Turklāt, jāņem vērā, ka transformatora radītais magnētiskais lauks tā magnētavadā ir vērsts visintensīvāk tā garuma un augstuma virzienos. Magnētiskās indukcijas vektora komponentes magnētvida platuma virzienā ir vairākkārt mazākas nekā pārējo asu virzienos. Savukārt, magnetostrikcijas, pašsvārstību frekvenču un iekšējās rezonanses ietekmē ir iespējama magnētvida kustība tā platuma virzienā.

Transformatora magnētvida (5.5. a) attēls) aizvietošanu ar masu un atsperu sistēmu ilustrē 5.5. b) attēls, kurā katrs masas elements ir savienots ar divām atsperēm katrā ass virzienā. Jāatzīmē, ka 5.5. attēlā nav parādītas visas transformatora ģeometriskā modelī izveidotās atsperes. Tā kā katrs masu elements ir modelēts, to savienojot ar 6 blakus esošiem masu elementiem, katram masu elementam eksistē 6 savienošās atsperes. Savukārt, gadījumos, kad savienošā atspere ir virzīta prom no magnētvida konstrukcijas, tās stinguma koeficients ir 0, jo magnētvida ģeometrija šajā pozīcijā vairs neatrodas. Masu un atsperu sistēmas matemātiskā modelī šie koeficienti eksistē, bet uzskatāmības dēļ to attiecīgās atsperes ir izņemtas no magnētvida masu un atsperu sistēmas ilustrācijas.



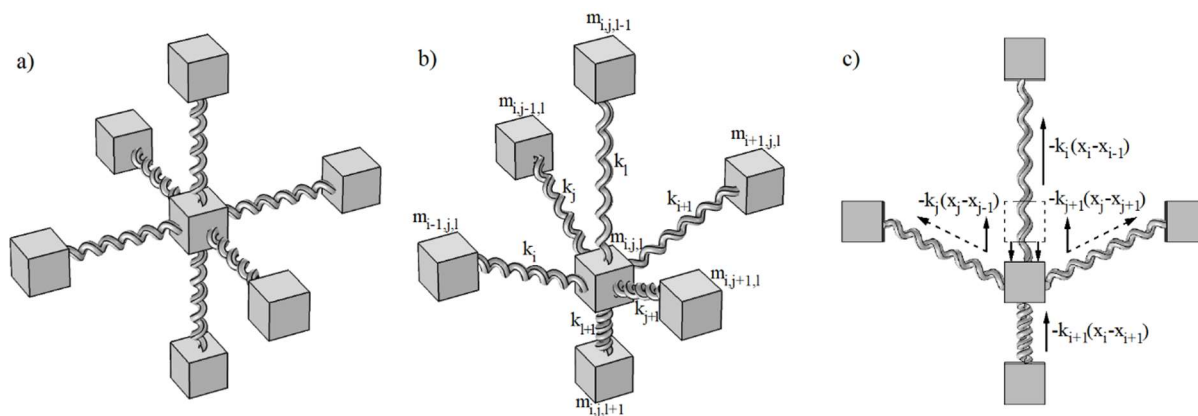
5.5. att. Transformatora magnētvida aizvietošanas ar masu un atsperu sistēmu ilustrācija:

a) magnēta konstrukcija, b) aizvietotā masu un atsperu sistēma.

Iekrāsotie masu elementi un to savienošās atsperes tiek uzskatīti par nekustīgiem objektiem, jo konstrukcijā attiecīgie punkti transformatora magnētavadam ir savienoti ar

stiprinājumiem. Šie nekustīgie masu elementi palīdz vienkāršot magnētvasda masu un atsperu sistēmas matemātiskā modeļa un to padarīt efektīvāku, jo šādā gadījumā ir iespējams modelēt transformatora magnētvasda atsevišķus stieņus vai jūkus, un ir mazāks nezināmo atsperu stinguma koeficientu skaits. Kā arī, ja ir nepieciešams ģenerēt vibrāciju vērtības tikai noteiktā magnētvasda fragmentā, nav jāveic to modelēšanu arī citās pozīcijās. Līdz ar to, gadījumos, kad ir nepieciešams uzzināt magnētvasda radītās vibrācijas magnētvasda stieņos, ap kuriem atrodas tinumi, ir nepieciešams modelēt vismaz 12 masu elementus un 52 atsperes ar mainīgiem stinguma koeficientiem. Jūgu gadījumā – tādu pašu masu un atsperu skaitu ar izmainītām asu koordinātām, jo jūgi ir perpendikulāri stieņiem. Savukārt, magnētvasda sānu stieņa un jūgu gadījumā 44 masu elementus ar 180 mainīgiem atsperu stinguma koeficientiem

Katra individuāla masu un atsperu sistēmas matemātiskā modeļa masas elementa pozīcija un kustības virziens ir parādīts 5.6. attēlā. Masas elementa pozīcija tā līdzsvara stāvoklī ir parādīta 5.6. a) attēlā, kur redzams, ka visi blakus esošie masu elementi atrodas perpendikulāri – uz nevienu masu elementu neiedarbojas ārēji radīts spēks. 5.6. b) attēls ilustrē masas elementa lineāru kustību vienas ass virzienā. Tā rezultātā visas pievienotās atsperes rada kopīgu pretēji vērstu spēka vektoru. Atsperes, kuru ass sakrīt ar masas elementa kustību, izstieptas vai saraujas. Tāpēc, šo atsperu individuāli radītie elastības spēki sakrīt ar kustības asi. Savukārt, 4 atsperes, kuras ir novietotas perpendikulārās asīs, tiek izstieptas un saliektas. Šī iemesla dēļ, atsperu rezultējošo spēku vektoru aprēķins ir atkarīgs no visu trīs asu kustības vienādojumiem. 5.6. c) attēls ilustrē modelēto elastības spēku virzienus vienā plaknē ar to komponentēm, kuras ir vērstas pretēji kustības virzienam.



5.6. att. Masu un atsperu sistēma:

a) masu elementu savienojums, b) elementu nosaukumi izteiksmēs, c) deformācijas rezultējošie spēki.

Lai eksponenciāli samazinātu masu un atsperu sistēmas matemātiskā modeļa aprēķina procesa ilgumu, tiek pieņemts, ka atsperēm ir divi stinguma koeficienti, kas tiek izmantoti stiepes un lieces deformācijām. Tas ļauj izvairīties no trīskārša atsperu skaita pieauguma masu un atsperu sistēmā, kuras diagonāli savienotu blakus esošos masu elementus. Šis pieņēmums būtiski neietekmē precizitāti, jo ar katru atsperi tiek simulēta materiāla iekšējā mehāniskā situācija tikai vienā noteiktā ģeometrijas pozīcijā. Līdz ar to, tiek pieņemts, ka modelētajām

atsperēm ir stiepes un lieces stinguma koeficienti, kuriem ir spēkā noteikta stinguma proporcija, lai izpildītos sekojošā izteiksme

$$k_{yj}(x_j - x_{j-1}) = k_{lyj} \sqrt{(x_j - x_{j-1})^2 + (y_j - y_{j-1} + y_{0j} - y_{0j-1})^2} \sin(\alpha_{j,j-1}), \quad (5.2)$$

kur k_{yj} ; k_{lyj} – atsperu stinguma koeficienti stiepes un lieces deformācijām;

x_{j-1} ; x_j ; – masas elementa un iepriekšējā masas elementa pozīcija horizontālā magnētvara garuma virzienā, magnētvara augstuma asī, m;

y_{j-1} ; y_j ; – masas elementa un iepriekšējā masas elementa pozīcija horizontālā magnētvara garuma virzienā, magnētvara garuma asī, m;

y_{0j-1} ; y_{0j} ; – masas elementu sākotnējās pozīcijas magnētvara garuma asī, m;

$\alpha_{j,j-1}$ – leņķis starp atsperes sākotnējo un rezultējošo pozīcijas virzienu.

Izdarot šo modelēšanas pieņēmumu, ir iespējams abus koeficientus izmantot kā vienu atsperes raksturlielumu. Līdz ar to, katra masu un atsperu sistēmas masas elementa kustību ir iespējams izteikt kā vektoriālu summu no tā kustībām visu telpas dimensiju asu virzienos. Šīs kustības raksturo diferenciālvienādojumu sistēma

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

kur m_i – masas elementa masa, kg;

x_{i-1} ; x_i ; x_{i+1} – masas elementa, tam sekojošā un iepriekšējā masas elementa pozīcija vertikālā virzienā, magnētvara augstuma asī, m;

x_{j-1} ; x_j ; x_{j+1} – masas elementa, tam sekojošā un iepriekšējā masas elementa pozīcija horizontālā magnētvara garuma virzienā, magnētvara augstuma asī, m;

x_{l-1} ; x_l ; x_{l+1} – masas elementa, tam sekojošā un iepriekšējā masas elementa pozīcija horizontālā magnētvara platuma virzienā, magnētvara augstuma asī, m;

y_{i-1} ; y_i ; y_{i+1} – masas elementa, tam sekojošā un iepriekšējā masas elementa pozīcija horizontālā magnētvara garuma virzienā, magnētvara augstuma asī, m;

y_{j-1} ; y_j ; y_{j+1} – masas elementa, tam sekojošā un iepriekšējā masas elementa pozīcija horizontālā magnētvara garuma virzienā, magnētvara garuma asī, m;

y_{l-1} ; y_l ; y_{l+1} – masas elementa, tam sekojošā un iepriekšējā masas elementa pozīcija horizontālā magnētvara platuma virzienā, magnētvara garuma asī, m;

$z_{i-1}; z_i; z_{i+1}$ – masas elementa, tam sekojošā un iepriekšējā masas elementa pozīcija vertikālā virzienā, magnētvasda platuma asī, m;

$z_{j-1}; z_j; z_{j+1}$ – masas elementa, tam sekojošā un iepriekšējā masas elementa pozīcija horizontālā magnētvasda garuma virzienā, magnētvasda platuma asī, m;

$z_{l-1}; z_l; z_{l+1}$ – masas elementa, tam sekojošā un iepriekšējā masas elementa pozīcija horizontālā magnētvasda platuma virzienā, magnētvasda platuma asī, m;

$k_{xi}; k_{xi+1}$ – magnētvasda vertikālā virziena atsperu stinguma koeficienti;

$k_{yj}; k_{yj+1}$ – magnētvasda horizontālā garuma virziena atsperu stinguma koeficienti;

$k_{zl}; k_{zl+1}$ – magnētvasda horizontālā platuma virziena atsperu stinguma koeficienti;

$F_{xi}(t)$ – ekvivalentais magnetostrīkijas spēks magnētvasda vertikālā virzienā;

$F_{yj}(t)$ – ekvivalentais magnetostrīkijas spēks magnētvasda horizontālā garuma virzienā;

$F_{zl}(t)$ – ekvivalentais magnetostrīkijas spēks magnētvasda horizontālā platuma virzienā.

Lai ar šo diferenciālvienādojumu sistēmu varētu simulēt magnetostrīkijas efektu, ir nepieciešams aprēķināt ekvivalentos magnetostrīkijas spēkus $F_{xi}(t)$, $F_{yj}(t)$ un $F_{zl}(t)$. Vīenkārša masas elementa kustība magnetostrīkijas īespaīdā nav īespējama, jo šīm deformācijas procesam ir vairāki vektoriāli virzieni vērsti pretēji savā starpā. Tas ir skaidrojams ar to, ka masu elementi magnetostrīkijas īespaīdā nepārvīetojas, bet gan saraujas vai īzplešas (skat. 1.1. apakšnodaļu). Tāpēc masu elementu centri palīek nekustīgi, bet to ārējās robežas pārvīetojas. Tāpēc, magnetostrīkijas radītās deformācijas nav īespējams simulēt ar vīena virziena ārējiem spēkiem, un tiek lietots īdinamiskais elastības modulis, ko aprēķīna kā

$$E = \frac{Fl_0}{S\Delta l}, \quad (5.4)$$

kur F – īievadītais spēks, N;

l_0 – sākotnējais materiāla garums, m;

S – vīrsmas laukums, kur spēks tiek īievadīts, m²;

Δl – materiāla deformācijas garums, m.

Tā kā īdinamiskā elastības moduļa vērtības magnētvasda materiāliem [26] ir zināmas un īr īzteiktas procentuāli no īmonotona tērauda īdinamiskā elastības moduļa vērtībām [7]. Šīs vērtības īr uzrādītas 5.1. tabulā, īr īespējams īzteikt un aprēķināt spēka F vērtību.

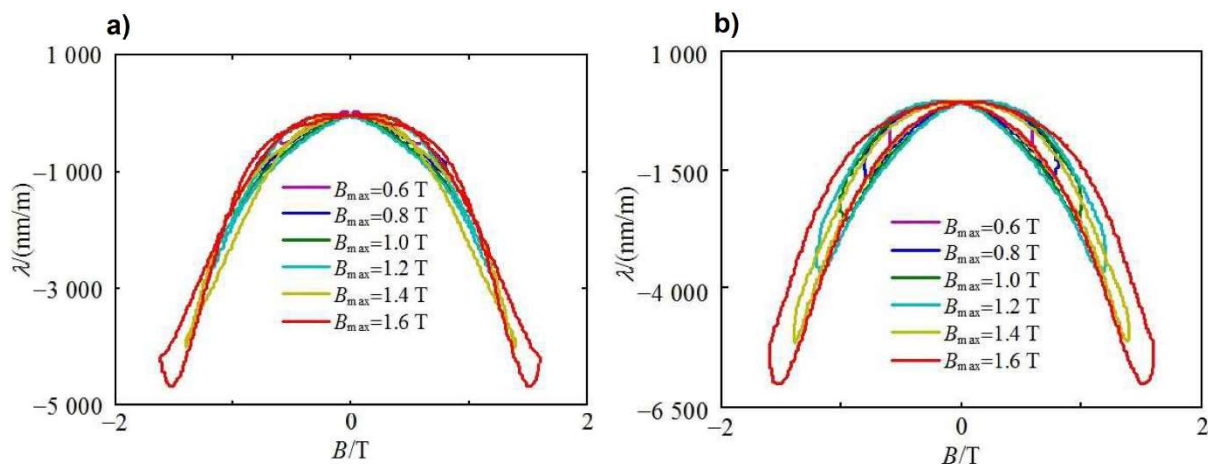
5.1. tabula

Dīnamiskā elastības moduļa absolūtās un relatīvās vērtības īproporcionāli tēraudam

Virziens	E vērtība, Pa	Relatīvā E vērtība attīecībā pret tēraudu, %
Paralēli magnētiskam laukam	$157 \cdot 10^9$	78,5
Perpendīkulāri magnētiskam laukam	$104 \cdot 10^9$	52
Perpendīkulāri laminācijai	$176 \cdot 10^9$	88

Spēka F aprēķīnāšana īr īespējama, jo materiāla deformācijas garumu Δl magnetostrīkijas efekta dēļ īr īespējams īzteikt kā funkciju no ārēji īievadītā magnētiskā lauka magnētiskās

indukcijas vērtības [40]. Šī funkcija parasti ir atspoguļota kā grafiks, kurš ilustrē magnētiskās indukcijas vērtības un deformācijas proporciju gan virzienā, kas ir paralēls magnētiskās indukcijas vektora virzienam (skat. 5.7. a) attēlu), gan perpendikulārā virzienā tam (skat. 5.7. b) attēlu).



5.7. att. Materiāla deformācijas garums atkarībā no magnētiskās indukcijas vērtības [99]:
a) paralēli laminācijas slāņiem, b) perpendikulāri laminācijas slāņiem.

Tā kā šie grafiki ir simetriski, ir iespējams tos aproksimēt un izteikt kā funkcijas:

$$\Delta l_d = \frac{346.23B^6 - 1410.6B^4 - 420.71B^2 - 79.301}{10^9}, \quad (5.5)$$

$$\Delta l_p = \frac{-86.659B^6 + 84.198B^4 - 2027.6B^2 - 105.9}{10^9}, \quad (5.6)$$

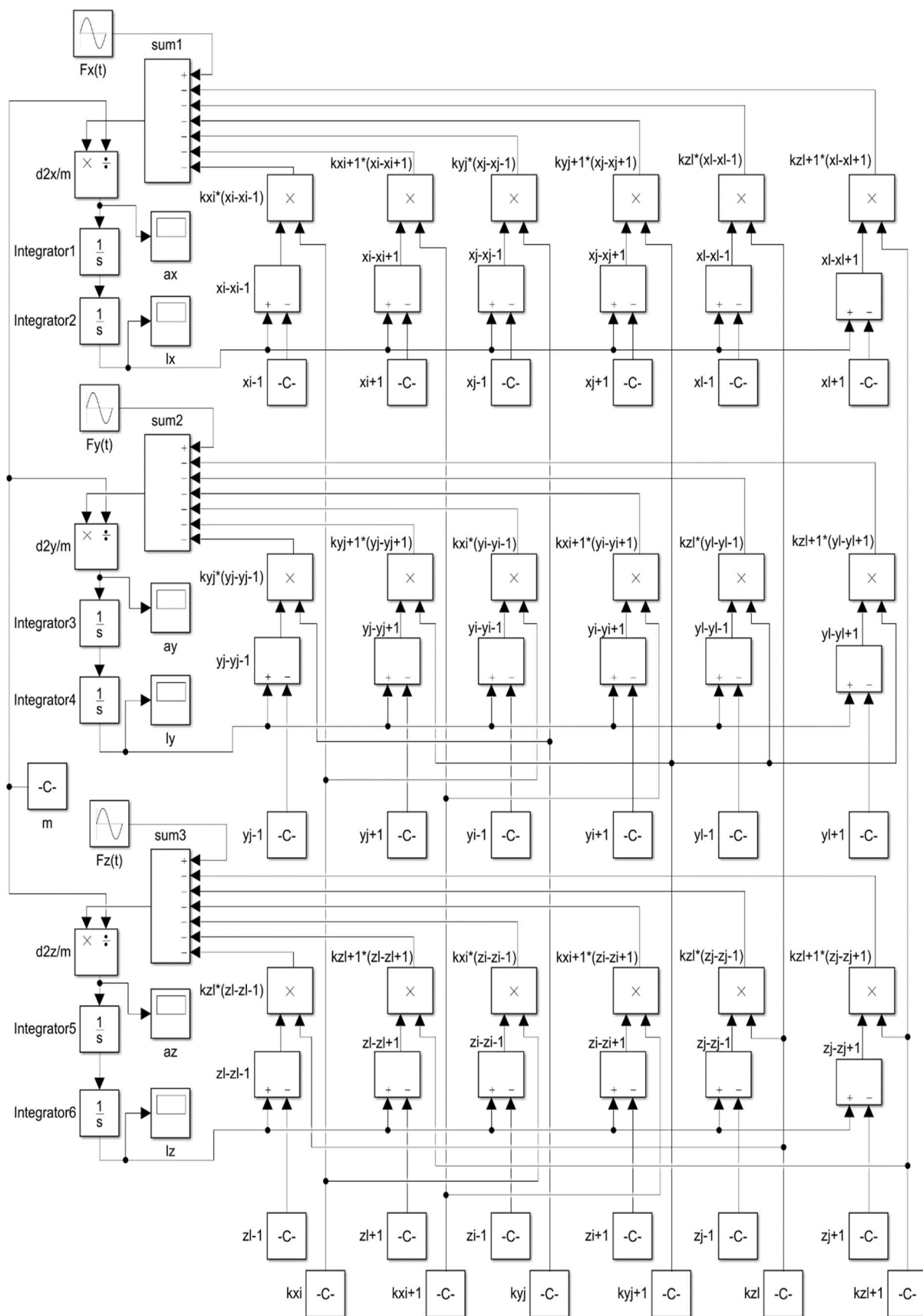
kur Δl_d – materiāla garuma izmaiņa paralēlā virzienā, m;

Δl_p – materiāla garuma izmaiņa perpendikulārā virzienā, m;

B – magnētiskā indukcija, T.

Izmantojot dinamisko elastības moduli, ir iespējams aprēķināt ekvivalentos magnetostrīcijas spēkus $F_{xi}(t)$, $F_{yj}(t)$ un $F_{zl}(t)$, jo, izsakot spēku, ir zināmi visi pārējie izteiksmes (5.4) raksturlielumi. Sekojoši, vienādojumu sistēmā (5.3) vienīgie nezināmie raksturlielumi ir masas elementu pozīcijas visās dimensiju asīs.

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. 5.8. attēls ilustrē viena masas elementa savstarpējo mijiedarbību ar blakus esošajiem elementiem un vizualizē vienādojumu sistēmas (5.3) darbību. Jāatzīmē, ka liels daudzums mainīgo raksturlielumu vērtību tiek iegūts no kaimiņu masu elementu pozīcijām. Šī iemesla dēļ, 5.8. attēlā tie ir ilustrēti kā konstantu lielumu elementi, kuru nosaukumi sākas ar kādu no kustības asu simboliem x , y vai z .



5.8. att. Magnētņvada viena masas elementa matemātiskā modeļa shēma.

Šī masu un atsperu sistēmas matemātiskā modeļa shēma ir paredzēta, lai modelētu masu elementu kustību, kas ir vienīgais nezināmais tās aizstāto diferenciālvienādojumu sistēmā, bet iegūtās masu elementu kustības sniedz rezultātu tikai konkrētai atsperu stinguma koeficientu konfigurācijai. Tāpēc stinguma koeficientu vērtības tiek iteratīvi mainītas, izmantojot dinamisku ģenētisku algoritmu, lai šī masu un atsperu sistēmas matemātiskā modeļa shēma iegūtu masu elementu kustības ar nepieciešamo amplitūdas vērtībām, kustības ātrumu un paātrinājumu.

Tāpēc kā 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

5.3.1. Ģenētisko algoritmu struktūra un darbības principi

Mūsdienās, zinātniskām problēmām paliekot arvien sarežģītākām, rodas nepieciešamība veikt vajadzīgos aprēķinus un atrast piemērotus risinājumus ar jaunām un alternatīvām aprēķinu metodēm. Daudzos gadījumos rodas problēma, ka matemātiskā modeļa konfigurāciju vai tā raksturlielumus vērtību ir nepieciešams optimizēt, bet iespējamo iznākumu kopējais skaits ir pārāk liels, lai būtu iespējams racionāli aprēķināt visus iespējamus rezultātus un atrast vispiemērotāko starp tiem, kurš dod vistuvāko vērtību nepieciešamai vai pieļaujamās novirzes kļūdas diapazonā [28].

Līdzīgas aprēķinu un optimizācijas problēmas rodas, modelējot fizikālu objektu un procesu savstarpējo mijiedarbību. Piemēram, lai atrastu nepieciešamo konfigurāciju materiāla iekšējai struktūrai, kas mijiedarbotos ārējā magnētiskā lauka ietekmē un izraisītu magnetostrikcijas efekta vai elektrodinamisko spēku rašanos materiāla ģeometrijas ietvaros, ir nepieciešams pārbaudīt lielu skaitu iespējamo konfigurāciju. Tāpēc ģenētisko algoritmu pielietošana šādu problēmu risināšanā ir optimālāka par visu iespējamo konfigurāciju aprēķināšanu un savstarpējo salīdzināšanu, jo ģenētiskais algoritms veic aprēķinus tikai mazai daļai no visām iespējamām konfigurācijām [80].

Ģenētisko algoritmu darbības pamats ir balstīts uz bioloģiskiem evolūcijas procesiem. Tikai šajā gadījumā reāli organismi tiek aizstāti ar matemātiskiem modeļiem ar to noteiktām iekšējām konfigurācijām. Tāpēc ir iespējams tos uztvert kā atsevišķus indivīdus ar saviem unikāliem raksturlielumiem un īpašībām, un veikt meklēšanas un optimizācijas procesu, lai izveidotu indivīdu ar raksturīpašībām, kuras ir nepieciešamas attiecīgajam matemātiskam modelim, lai tas būtu spējīgs dod nepieciešamo rezultātu.

Ģenētisko algoritmu darbības rezultātā rodas melnās kastes princips, proti, nav iespējams izskaidrot, kāpēc tieši šādas optimizācijas procesā atrastās modeļa konfigurācijas sniedz vajadzīgo rezultātu. Tas ir tāpēc, ka matemātiskā modeļa iekšējā raksturlielumu mijiedarbība ir

sarežģīts process un daudzos gadījumos bez vēl apjomīgāku metožu izveides nav iespējams izprast tā konfigurācijas iekšējo darbību [11].

Papildus iepriekš minētajam, ģenētisko algoritmu uzbūvi un iekšējo darbību padara komplicētāku tas, ka tie ir balstīti uz nejaušības principa [20]. Tātad šie algoritmi meklē un optimizē matemātiskā modeļa konfigurāciju vai individuālus raksturlielumus, izmantojot nejaušu skaitļu ģenerēšanu. Savukārt šī ģenerēšana ir noteiktās robežās, un pozitīva rezultāta iegūšana palielina attiecīgā nejaušā skaitļa īpatsvaru un atkārtotās iespējas daudzumu. Un, tieši pretēji, negatīva rezultāta gadījumā, attiecīgā nejaušā skaitļa vērtība tiek izmantota mazāk un tās ietekme uz algoritma kopējo darbību tiek samazināta.

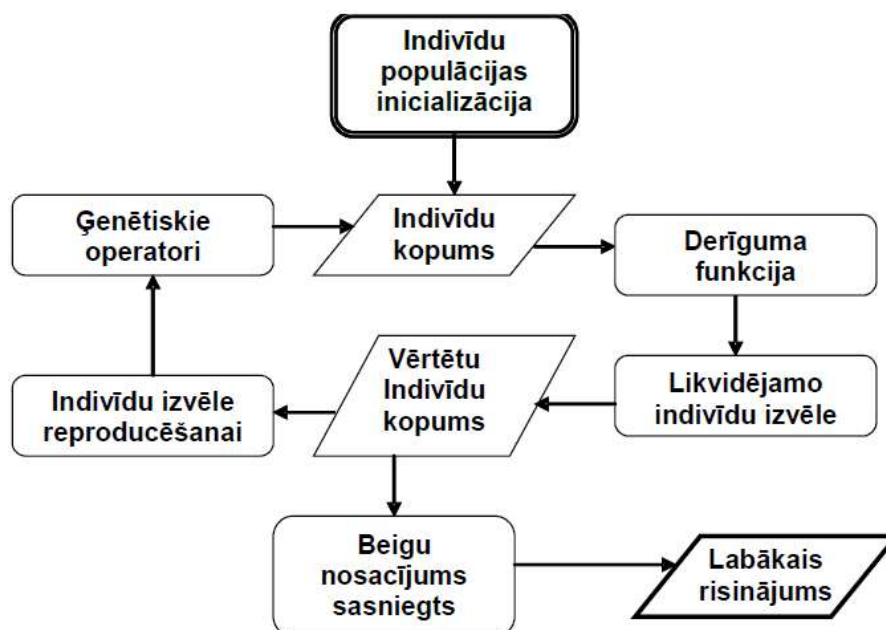
Ģenētisko algoritmu struktūra ir veidota, sākot ar tās vismazākajiem elementiem – gēniem. Matemātisko modeļu struktūras aprēķinos gēni raksturo raksturlielumu individuālās vērtības, kuras ģenētiskā algoritma gadījumā var tikt mainītas. Katras gēnu grupas kopējais sastāvs veido indivīdu vai hromosomu [58]. Matemātisko modeļu gadījumā ar indivīdu tiek raksturotas aprēķināmā matemātiskā modeļa visas konfigurācijas, un indivīda atbilstība vajadzīgajam rezultātam tiek raksturota ar fizikālo derīguma funkciju, kas ir kas ir starpība starp iegūto un vajadzīgo rezultātu [80].

Kā nākošais ģenētiskā algoritma struktūras posms ir populācija vai indivīdu kopums, kas ir viens no galvenajiem elementiem, kas nodrošina algoritma veiksmīgu darbību. Šos indivīdu kopumus veido noteikts indivīdu skaits. Savstarpējā algoritma struktūra ir parādīta 5.9. attēlā. Lai būtu iespējams veikt pareizu ģenētiskā algoritma darbību, ir nepieciešams liels skaits indivīdu katrā izveidotā indivīdu kopumā. Tas skaidrojams ar to, ka ir vajadzīga daudzveidība, lai varētu gan simulēt matemātisko modeļu konfigurāciju izmaiņas, gan saglabāt informāciju jau par atrastiem indivīdu gēniem, kuri sniedz pagaidu labākos rezultātus.

Kā nākošais solis gadījumos, kad atrasto indivīdu fizikālās derīguma funkcijas ir neapmierinošas, ir indivīdu dzēšana un aizstāšana ar jauniem indivīdiem, kuriem ir veiktas mutācijas. Mutācijas ir izmaiņas indivīdu gēnos, kas var būt mazas izmaiņas kāda gēna raksturlieluma vērtībā vai arī lielas izmaiņas, kas izmaina kopējo gēnu skaitu. Jāatzīmē, ka to ietekme ir nejauša rakstura, kas ir ģenētisko algoritmu principa pamatā [11]. Turklāt, jaunu indivīdu veidošana ir atkarīga no iepriekšējās populācijas izdzīvojušo indivīdu gēniem. Tas ir nepieciešams, lai jaunās izveidotās mutācijas mijiedarbotos ar gēniem, kuri dod maksimāli labu pagaidu rezultātu. Šāda pieeja nodrošina ģenētiskā algoritma populācijas fizikālās derīguma funkciju uzlabošanas evolūcijas gaitā.

Šāds iteratīvs process turpinās, kamēr tiek izveidota populācija, kurā eksistē vismaz 1 indivīds, kura fizikālās derīguma funkcija ir pietiekoši laba, lai attiecīgā indivīda matemātiskā modeļa konfigurācija sniegtu aprēķinu rezultātu, kurš ir atbilstošs vajadzīgām izvērztām vērtībām, kuras ir jāiegūst.

Tā kā ģenētisko algoritmu darbības pamatā ir vairākas unikālas pieejas, lai atrastu vajadzīgo rezultātu un veiktu nepieciešamo matemātiskā modeļa konfigurācijas optimizāciju, šādai aprēķinu pieejai pastāv vairākas īpašības, kurām ir gan pozitīva, gan negatīva ietekme.



5.9. att. Ģenētiska algoritma iekšējā struktūra un darbība.

Vislielākais pozitīvais ieguvums no ģenētisko algoritmu pielietošanas ir to spēja darboties ar sistēmām, kurām pastāv liels skaits iekšējo konfigurāciju, kuras visas nav iespējams aprēķināt, lai atrastu visoptimālāko rezultātu. Papildus, šo algoritmu iekšējā darbība ir absolūti autonoma, jo tās pamatā ir nejaušības princips, kurš tiek izmantots, lai meklētu fizikālās derīguma funkcijas lokālos un globālos maksimumus. Jāatzīmē, ka ir iespējama ģenētiska algoritma dinamiska darbība, kad simulēta matemātiskā modeļa konfigurāciju evolūcija tiek mainīta, balstoties uz iepriekšējo paaudžu rezultātiem, lai izvairītos no situācijas, ka tiek atrasts fizikālās derīguma funkcijas lokālais maksimums un nav iespējams evolūciju novirzīt globālā maksimuma atrašanai.

Savukārt, pastāv arī zināmas negatīvas īpašības. Ģenētiskā algoritma darbības pamatā esošais nejaušības princips rada nenoteiktību, cik ilgā laikā ir iespējams aprēķināt vajadzīgo rezultātu. Turklāt, melnās kastes princips ir vislabāk pielietojams gadījumos, kad ir nepieciešams iegūt kopējo matemātiskā modeļa konfigurācijas rezultātu, bet neizskaidrot, kāds iemesls ir katra konfigurācijas mainīgā lieluma – gēna vērtībai [80].

5.3.2. Dinamiskā ģenētiskā algoritma izveide

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. Piemēram, ja tiek uzdots stinguma koeficients robežās no 0 līdz 10^7 N/m, tad katra atspere var radīt 10 miljonus atšķirīgu konfigurāciju. Ja šo limitu pielieto 42 atspērēm kopā, eksistē aptuveni 10^{294} atšķirīgas individuālas masu un atsperu sistēmas konfigurācijas. Šāds skaitlis ir pārāk liels, lai būtu iespējams pārbaudīt visus

iespējamos variantus, un atrast konfigurāciju, kas vislabāk atbilst izmērīto vibrāciju situācijai realitātē. 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.

Nejausības princips ir ģenētisko algoritmu svarīga īpašība, kas var dot atšķirīgus rezultātus vienas un tās pašas konfigurācijas meklēšanā. Pat atrodot ļoti līdzīgus rezultātus, ir iespējams, ka individuālie atsperu stinguma koeficienti radikāli atšķirsies. Tas ir skaidrojams ar to, ka šāda tipa konfigurācijām ir liela pašsvārstību frekvenču maiņa un rezonanses ietekme. Tas nozīmē, ka konfigurācijas izmaiņas vienā sistēmas apgabalā var izsaukt neparedzamas rezultātu izmaiņas jebkurā kopējā sistēmas pozīcijā.

Dinamiskam ģenētiskam algoritmam ir sekojoša darbības secība:

- 1) Pirmās paaudzes indivīdu izveide, izmantojot nejaušības principu.
- 2) Simulācijas veikšana katram indivīdam, lai iegūtu tā attiecīgo derīguma funkcijas vērtību.
- 3) Populācijas indivīdu sakārtošana pēc to derīguma funkcijas vērtībām.
- 4) Indivīdu dzēšana atkarībā no to pozīcijas pēc to sakārtošana, pielietojot gradientu, lai indivīdiem ar vislabāko derīguma funkcijas vērtību ir proporcionāli lielāka varbūtība izdzīvot.
- 5) Populācijas skaita atjaunošana, aizstājot izdzēstos indivīdus ar jauniem, kuru stinguma koeficientu vērtības ir ņemtas no indivīdiem, kuri ir izdzīvojuši dzēšanas procesu.
- 6) Mutāciju pielietošana jaunajiem indivīdiem atkarībā no simulētās evolūcijas efektivitātes.
- 7) Pārbaude, vai vismaz vienam indivīdam pašreizējās paaudzes populācijā ir derīguma funkcijas vērtība, kas rada vidējo kvadrātisko novirzi mazāku par 5, iegūtās vibrāciju vērtības salīdzinot ar simulācijas rezultātiem.
- 8) Iepriekšējo punktu iteratīva atkārtošana, kamēr septītā punkta ietvaros tiek pozitīvs rezultāts.

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 . Jāatzīmē, ka, pārbaudot augstāku vērtību stingumu koeficientus, rezultātā tika iegūtas vibrāciju amplitūdas, kuras par vairākām kārtām atšķiras no vibrāciju mērījumu rezultātiem.

Pēc pirmās paaudzes populācijas indivīdu izveides, visi indivīdi tiek simulēti un tiek aprēķinātās to radīto vibrāciju amplitūdas. Tad tiek pielietota derīguma funkcijas, lai tos sakārtotu secībā no visatbilstošākā līdz visneatbilstošākajam indivīdam. Šajā gadījumā derīguma funkcija ir vidējā relatīvā kļūda starp simulētajām vibrāciju vērtībām un izmērītajām vērtībām realitātē:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|a_{mi} - a_{ci}|}{a_{mi}}}{n}, \%, \quad (5.7)$$

kur E – vidējā relatīvā kļūda, %;

a_{mi} – izmērītā vai aproksimētā vibrāciju vibropaātrinājuma vērtība i -tajam masas elementam;

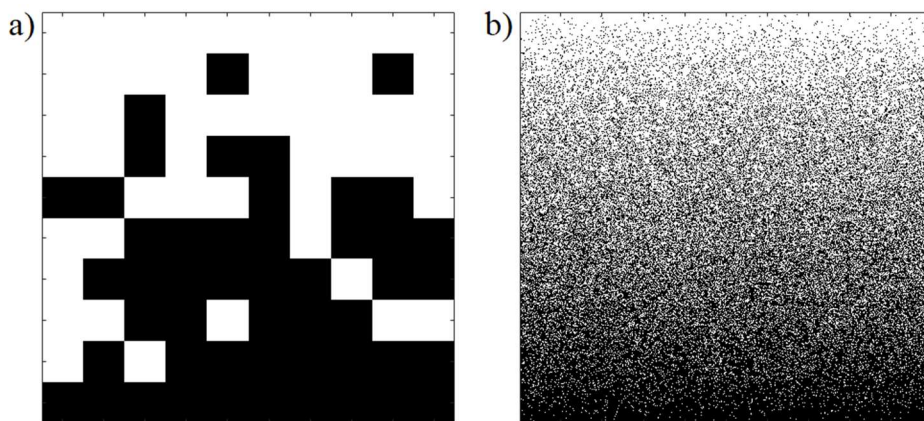
a_{ci} – aprēķinātā vibrāciju vibropaātrinājuma vērtība i -tajam masas elementam;

n – kopējais masu elementu skaits.

Pēc tam notiek indivīdu dzēšana, izdzēstos indivīdus vēlāk aizstājot ar jauniem un tādā veidā mainot populāciju. Šajā procesā tiek izdzēsti 50 % indivīdu. Izvēle, kurš no populācijas tiks izdzēsts notiek, balstoties uz tā konkrēto pozīciju pašreizējās populācijas ierindā un uz nejaušības principu. Tātad, izdzēšana notiek ar gradientu. Jo labāka konkrēta indivīda pozīcija populācijas paaudzē, jo mazāka iespēja ka šis indivīds tiks izdzēsts.

5.10. attēls ilustrē izdzēšanas procesu ar gradienta pieeju, kur tas ir ticis pielietots alternatīvu atšķirīgu indivīdu daudzumu populācijām. Ar baltu krāsu ir iezīmēti pikseļi, kuri ir izdzīvojušie populācijas indivīdi, bet ar melno – neizdzīvojušie indivīdi. Pieaugot populācijas indivīdu daudzumam, ir vieglāk saskatīt gradienta ietekmi uz katra indivīda izdzīvošanas varbūtību.

Šāds populāciju maiņas instruments ir izveidots, lai ir iespējams nomainīt indivīdus ar relatīvi sliktu derīguma funkciju pret labākās atspere stingumu koeficientu konfigurācijām. Gradients tiek pielietots, lai netiktu uzkrāti indivīdi ar relatīvi mazām atšķirībām derīguma funkcijas rezultātā, samazinot populācijas daudzveidību un palēninot mākslīgās evolūcijas attīstības ātrumu, jo tajā eksistē mazāk individuālu konfigurāciju, kuras, šīs evolūcijas gaitā, tiecas uz, iespējams, atšķirīgiem derīguma funkcijas minimumiem.



5.10. att. Populāciju izdzīvošanas vizualizācija:

a) 10^2 indivīdiem, b) 10^6 indivīdiem.

Pēc populācijas indivīdu izdzēšanas ir nepieciešams to atjaunot, lai tiktu izveidota jaunā paaudze. Tas tiek panākts, izmantojot funkciju (5.8), kas izvēlas kādu no izdzīvojušajiem indivīdiem, kurš tiks kopēts, lai iegūtu tā jauno pēcteci.

$$y = x^{\frac{1}{g}} p, \quad (5.8)$$

kur y – slēdziens par kopēšanu;

x – nejaušs skaitlis intervālā no 0 līdz 1;

g – koeficients, kas nosaka derīguma funkcijas ietekmi;

p – indivīda pozīcija populācijas sakārtotajā sarakstā.

Pēc šī soļa ir nepieciešams jaunajiem indivīdiem veikt izmaiņas to atsperu stingumu koeficientu vērtībās. Tas tiek panākts ar nejauša rakstura izmaiņām – mutācijām. Šajā matemātiskā modelī tās ir vairāku veidu, jo izveidotais dinamiskais ģenētiskais algoritms ir dinamisks. Tas nozīmē, ka tā darbība var tikt regulāri mainīta atkarībā no tā, kā norit indivīdu populāciju evolūcija.

Kopā eksistē trīs atšķirīgi mutāciju veidi. Pirmais tiek pielietots relatīvi visbiežāk, jo tam ir 10 % iespējamība notikt ar jebkuru indivīda atsperu stinguma koeficientu. Šis mutācijas veids izmaina stinguma koeficientu robežās no $-2,5\%$ līdz $+2,5\%$, bet šīs robežas ne vienmēr tiek sasniegtas, jo katras mutācijas intensitātes pamatā ir nejaušs koeficients, kas nosaka reālo izmaiņu. Šādi ir iespējamās mutācijas arī ar mazāku izmaiņu diapazonu, un lielāka iespēju zona sekmē kopējo evolūcijas ātrumu, jo, tieši palielinot vai samazinot kādu koeficientu par mazāku vērtību, var atrast labāku sistēmas kopējo konfigurāciju nekā fiksēta soļa tipa mutācijas.

Otrais mutācijas veids ir intensīvāks, bet vidēji notiek retāk. Tam ir tikai 1 % iespējamība notikt, bet maksimālie stinguma koeficienta izmaiņu limiti ir no -10% līdz $+10\%$. Šāda tipa mutācijas ir nepieciešamas, lai meklētu stinguma koeficientu konfigurācijas lielākā diapazonā, jo savādāk populācija var lielā tās indivīdu daļā attīstīt relatīvi līdzīgas tendences un apstāties pie daudzdimensionālas funkcijas lokālā minimuma. Līdz ar to, ir nepieciešams relatīvi mazā indivīdu daudzumā pārbaudīt iespējamās konfigurācijas ar relatīvi radikāli izmainītās koeficientu vērtībām.

Trešais mutāciju veids nodrošina dinamiska ģenētiskā algoritma dinamisku darbību. Šīs mutācijas notiek 100 % gadījumu, bet to maksimālās izmaiņas limiti ir no $-0,05\%$ līdz $+0,05\%$. Jāatzīmē, ka šis mutāciju veids aktivizējas tikai noteiktā evolūcijas gadījumā, kad konkrētas populācijas paaudze nav sasniegusi labāku rezultātu ar tās visatbilstošāko indivīdu nekā iepriekšējā paaudze, proti, ir atrasts lokāls minimuma apgabals. Tāpēc ir nepieciešams veikt populācijas indivīdu izmaiņas relatīvi mazās robežās, lai atrastu precīzu šī ekstrēma novietojumu daudzdimensiju telpā.

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.

6. FAZILOGIKAS IZMANTOŠANA TRANSFORMATORA VIBRĀCIJU MODEĻA REZULTĀTU ĢENERĒŠANAI

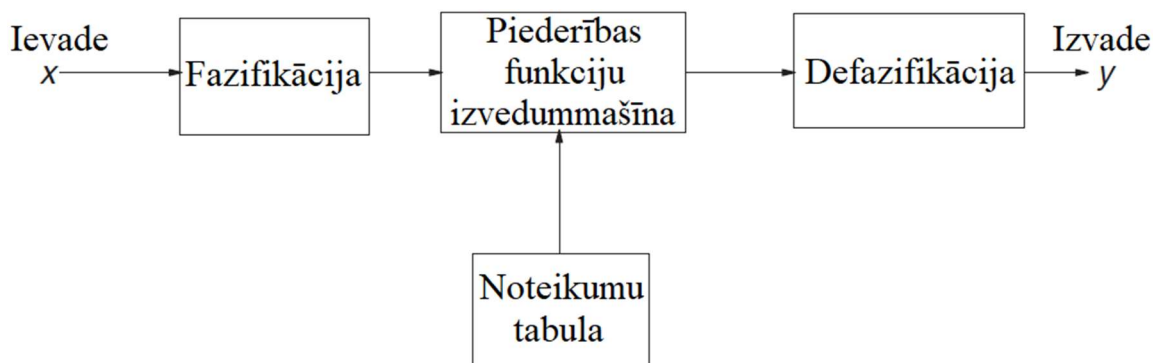
6.1. Fazilōģikas struktūra un darbības pamatprincipi

Līdzīgi kā iepriekš apskatītie ģenētiskie algoritmi, fazilōģika ir alternatīva pieeja, lai iegūtu aprēķinu rezultātu noteiktos, sarežģītos gadījumos, precīzāk, kad tas nav iespējams, izmantojot bināro loģiku, jo ir var rasties pretrunas slēdzienu ģenerēšanā. Šāda situācija visbiežāk rodas, kad tiek aprēķināta sistēma ar vairākiem mainīgiem raksturlielumiem, kuriem visiem ir zināms īpatsvars rezultāta slēdziena veidošanai, un daži mainīgie raksturlielumi sniedz informāciju par labu vienam noteiktam rezultātu slēdzienam, bet citi – atšķirīgam rezultātu slēdzienam.

Papildus, fazilōģika tiek pielietota gadījumos, kad noteikts raksturlielums signalizē par vairāku rezultātu iespējamību, un ir nepieciešams atrast to rezultātu, kurš atbilst vislabāk – precīza rezultāta iegūšana nav nepieciešama un pietiek ar vistuvāko vērtību [72]. Līdz ar to fazilōģika darbojas kā dedukcijas metode, kas sniedz tikai visatbilstošāko rezultātu no esošām iespējām.

Jāatzīmē, ka fazilōģika arī var tikt pielietota aprēķinu sistēmās, kad pati sistēmas darbība netiek mainīta, bet ir nepieciešams konfigurēt tās iegūtos rezultātus attiecībā pret tās parametru vērtībām. Šādā veidā izmainot sistēmas darbību, lai tā sniedz izteikti sliktākus vai labākus rezultātus, vai izmainītu sistēmas jutību tās iekšējo raksturlielumu izmaiņas gadījumā. Līdz ar to, ir iespējams konfigurēt rezultātu ieguves procesu, neizmainot izveidoto matemātisko modeli.

Fazilōģikas darbība sākas ar tās ievades parametriem. Kopējā modelēšanas sistēmā tie ir raksturlielumi, kuri nosaka gala rezultāta slēdziena iznākumu. Pēc tam tiek pielietotas fazilōģikas piederības funkcijas [17] jeb t.s. fazifikācijas process. Šīs funkcijas atšķiras no binārās loģikas nosacījumiem ar striktām robežām ar to, ka tām eksistē pārejas periods, kura ietvaros konkrētais sistēmas raksturlielums var veicināt vairāku rezultātu īpatsvaru.



6.1. att. Vienkāršota fazilōģikas darbības principa diagramma.

Kā redzams 6.1. attēlā [89], pēc fazifikācijas procesa tiek izmantota izvedummašīna. Lai tā darbotos, ir nepieciešams pielietot noteikumu tabulu, kas sevī ietver visas iespējamās rezultātu vērtības un attiecīgos gala slēdzienus. Vairāku raksturlielumu gadījumā, noteikumu tabulā ir nepieciešams ietvert visas kombinācijas, ko veido katra sistēmas raksturlieluma rezultāti, lai nerastos situācija, kurā sistēmas raksturlielumi dod savus individuālos rezultātus, kuru kombinācijai nav definēts galējais rezultāts.

Pēc tam, izmantojot visu sistēmas raksturlielumu vērtības, to attiecīgos piederības funkciju rezultātus, piederību vērtības un noteikumu tabulu, ir iespējams izveidot sistēmas gala slēdziena funkciju, kuras visas iespējamās vērtības sastāda raksturlielumu rezultāti no noteikumu tabulas, kuru piederība ir lielāka par 0. Jāatzīmē, ka katras noteikumu tabulas rezultātu kombinācijas ietekmi nosaka tieši piederības funkciju konkrēto piederības koeficientu vērtību reizinājumi. Tas skaidrojams ar to, ka noteikumu tabulas kombinācijai, kurā katra sistēmas raksturlieluma rezultātam ir maza piederība, kas tuvojas 0, ir ģeometriski samazināta rezultējošā piederības vērtība. Šāda pieeja ir nepieciešama, jo visu izmantoto noteikumu tabulas kombināciju piederības summai ir jābūt 1, lai netiktu izjaukta katra raksturlieluma ietekme uz gala slēdzieniem.

Kā nākošais solis ir rezultātu piederības funkcijas defazifikācijas process, kas pārvērš gala rezultātu piederības funkciju par noteiktu vērtību, kas ir viena no iespējamām noteikumu tabulā. Tā darbība balstās uz rezultātu piederības funkcijas grafika gravitācijas centra pozīcijas atrašanos. Šī pozīcija parāda, kuras rezultāta slēdziena vērtības robežās ir vislielākā sakritība ar izvirzītajiem noteikumiem to tabulā, jo var rasties situācija, kurā rezultātu piederības funkcijā dominē pretrunīgas un ekstrēmas vērtības, bet viduvējiem iznākumiem ir maza piederība. Līdz ar to, lai vislabāk stabilizētu līdzvērtības trūkumu, ir jāizvēlas vērtība, kura ir līdzvērtīgi tuvu visām atrastajām slēdziena vērtībām proporcionāli to piederību vērtībām. Defazifikācijas procesa beigu rezultāts ir faziloģikas gala slēdziens konkrētai sistēmai, kura vērtība vislabāk atspoguļo sistēmas raksturlielumu vērtību un noteikumu tabulas situāciju.

Faziloģikas pielietošana ir nepieciešama, kad sistēmas rezultāta ieguves procesā rodas pretrunas starp vairākām iespējamām vērtībām, turklāt, faziloģika sniedz iespēju izmainīt aprēķināmās sistēmas gala rezultāta slēdzienus, neietekmējot tās matemātisko darbību. Tas ir iespējams, izmainot noteikumu tabulas jebkuras raksturlielumu rezultātu kombinācijas vai vairāku kombināciju rezultāta slēdziena vērtības, jo tas arī neizmaina ne sistēmas, ne faziloģikas darbību, bet gan palīdz kalibrēt rezultātu, lai tas maksimāli atbilstu vajadzīgai vērtībai, kas ir faziloģikas galvenā priekšrocība.

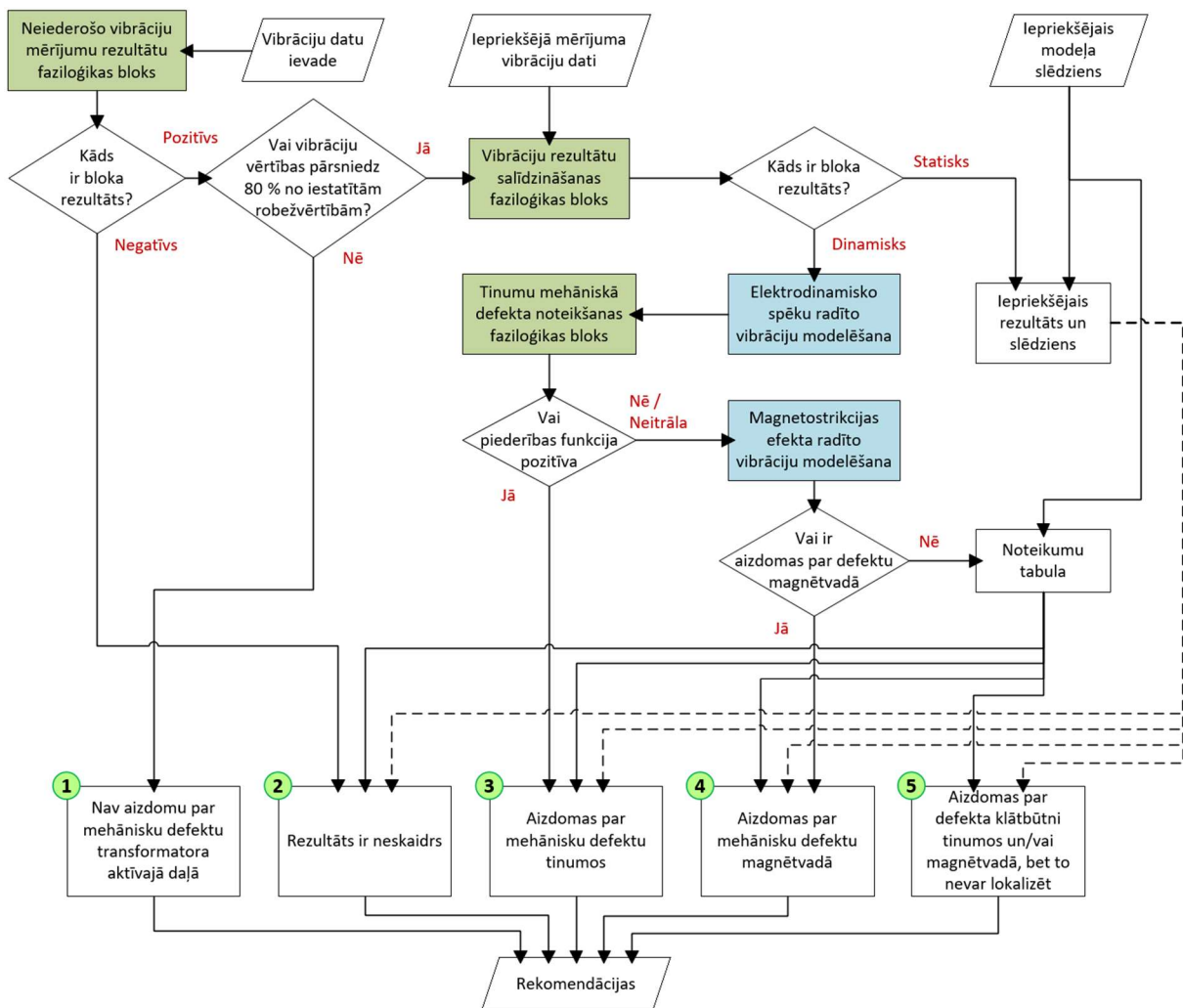
Faziloģikas galvenie trūkumi ir tās deduktīvā būtība, kuras rezultātā tiek iegūta slēdziena vērtība, kas vislabāk apmierina visu vērtību piederību īpatsvarus. Savukārt, pārējo slēdziena vērtību ietekme pēc faziloģikas darbības beigām vairs netiek ņemta vērā. Turklāt, faziloģiku ir nepieciešams kalibrēt, izveidojot noteikumu tabulu ar nepieciešamām slēdziena vērtībām, lai tā sniegtu pareizus rezultātus, jo tās darbības pamatā nav sakara ar jebkādiem fizikāliem procesiem, bet gan tikai matemātiskām mijiedarbībām.

6.2. Transformatora vibrāciju modeļa slēdziena ģenerēšanas bloks

6.2.1. Slēdziena iegūšanas pamatprincipi

Transformatora vibrāciju modelī izmantoti trīs fazilōģikas bloki (skat. 6.2. attēlu), kuru galvenie uzdevumi ir:

- meklēt tvertnes virsmas vibrāciju mērijumu rezultātu datus, kuru vērtība neiederas citu konkrētā transformatora diagnostikas rezultātu vidū;
- salīdzināt un novērtēt divus secīgus viena transformatora tvertnes virsmas vibrāciju diagnostikas reižu datus, lai izvērtētu informāciju par to izmaiņām;
- izvērtēt rezultātus transformatora tinumos, lai noteiktu nepieciešamību veikt magnetostrīcijas efekta radīto vibrāciju modelēšanu.



6.2. att. Transformatora vibrāciju modeļa rezultātu ģenerēšanas bloka darbības principa diagramma.

Faziloģikas blokos katra raksturlieluma piederības funkcijas ir definētas ar vairākiem reģioniem:

- pilnīgas piederības;
- daļējas piederības;
- tukšas piederības.

Papildus, funkcijas iedalās raksturlieluma vērtību diapazona sākuma, vidus un beigu funkcijās. Katra izveidotā faziloģikas bloka raksturlieluma attiecīgā piederības funkcija ir atzīmētā kā:

- Z – zema riska funkcija;
- V – vidēja riska funkcija;
- A – augsta riska funkcija.

Izstrādātajā vibrāciju modelī ir izmantotas laužas faziloģikas piederības funkcijas, kuras var definēt, izmantojot tikai to lūzumu punktu koordinātas. Tas sniedz iespējas, piemēram, var izmainīt jebkura reģiona attiecīgā raksturlieluma vērtību un veikt modifikācijas. Sekojošo faziloģikas bloku ietvaros tiek izmantota grafika gravitācijas centra pozīcijas atrašana, lai noteiktu rezultātu piederības funkcijas gala rezultātu.

6.2.2. Neiederošo vibrāciju mērījumu rezultātu bloks

Šis faziloģikas bloks, kura uzdevums ir pārbaudīt vibrāciju mērījumu rezultātus pirms tālāku aprēķinu veikšanas, izmanto četrus raksturlielumus:

- maksimālās mērījumu vērtības koeficientu kvb_{\max} ;
- minimālās mērījumu vērtības koeficientu kvb_{\min} ;
- trūkstošo mērījumu punktu skaitu n_p ;
- blakus esošu nezināmu mērījumu punktu skaitu n_{kp} .

Koeficients kvb_{\max} dod informāciju par vibrāciju mērījumu rezultātu maksimālās vērtības vb_1 attiecību pret otro lielāko vibrāciju mērījumu vērtību vb_2 , lai gadījumos, kad ievades datus ir kļūda, proti, kāda vibrāciju datu punkta vērtība vairākas reizes pārsniedz visu citu mērījumu punktu vērtību, turpmākie aprēķini transformatora vibrāciju modelī tiktu apturēti. Tā aprēķins ir parādīts izteiksmē

$$kvb_{\max} = \frac{vb_1}{vb_2}, \quad (6.1)$$

kur vb_1 – vibrāciju mērījumu maksimālā vērtība;

vb_2 – vibrāciju mērījumu otrā lielākā vērtība.

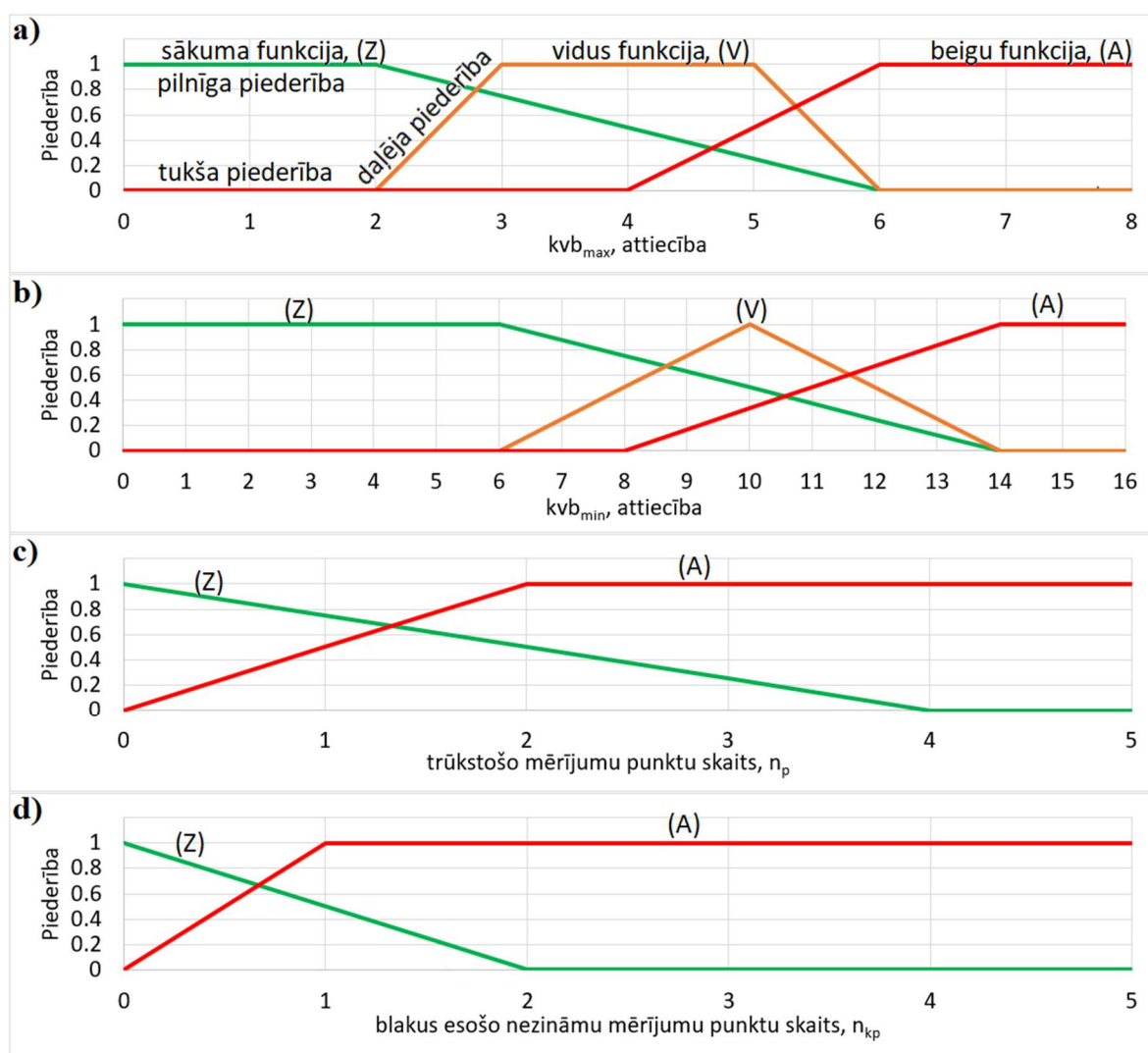
Koeficientam kvb_{\max} ir trīs piederības funkcijas (skat. 6.3. a) att.), kurām daļējas piederības reģioni lielākajā daļā gadījumu pārklājas. Tas ir skaidrojams ar to, ka pastāv iespējamība, ka vibrāciju mērījumu vērtības ir pareizas, proti, pareizi ir atrasti datu punkti ar izteikti palielinātām vibrāciju amplitūdu vērtībām, bet pastāv arī iespēja, ka šie rādījumi var būt kļūdaini. Līdz ar to, faziloģikas bloks risina iespējamu pretrunu un darbojas atbilstoši.

Gluži pretēji raksturlielums kvb_{\min} ir attiecība, lai pārbaudītu, vai vibrāciju mērījumos ir datu punkti, kuriem kļūdas iespaidā ir neraksturīgi maza vērtība. Arī šādā gadījumā datus nevar izmantot par pamatu tālākiem aprēķiniem izstrādātajā vibrāciju modelī. Koeficientu kvb_{\min} aprēķina šādi:

$$kvb_{\min} = \frac{vb_{i-1}}{vb_i}, \quad (6.2)$$

kur vb_i – vibrāciju mērījumu minimālā vērtība;

vb_{i-1} – vibrāciju mērījumu otrā mazākā vērtība.



6.3. att. Neiederošo vibrāciju mērījumu rezultātu bloka piederības funkciju diagramma:

- a) maksimālās mērījumu vērtības koeficients kvb_{\max} , b) minimālās mērījumu vērtības koeficients kvb_{\min} ,
c) trūkstošo mērījumu punktu skaits n_p un d) blakus esošu nezināmu mērījuma punktu skaits n_{kp} .

Arī raksturlielumam kvb_{\min} ir izmantotas 3 piederības funkcijas (skat. 6.3. b) att.), jo pastāv iespēja, ka vibrāciju datus ir kļūda, vai pastāv izteikti neregulāras vibrāciju amplitūdu izmaiņas

mērījumu rezultātu datus. Jāatzīmē, ka šajā gadījumā piederības funkciju daļējas piederības reģioni ir nobīdīti pie lielākām kvb_{\min} attiecību vērtībām, proti, tiek apstrādātas mērījumu mazākās vērtības, jo vibrāciju mērījumu rezultāti normālas ekspluatācijas apstākļos var uzrādīt zemas vibrāciju amplitūdas.

Trešais šī faziloģikas bloka raksturlielums ir iztrūkstošo vibrāciju mērījumu datu punktu skaits n_p , kam izmantotas tikai 2 piederības funkcijas (skat. 6.3. c) att.), jo nav jāveic papildu aprēķini.

Ceturtais izmantotais raksturlielums ir blakus esošo nezināmo punktu skaits n_{kp} mērījumā. Atšķirībā no trešā raksturlieluma, nezināmiem blakus esošiem datu punktiem ir daudz lielāka negatīva ietekme, jo tie veido apgabalus, kuros nav zināmas to izmērīto vibrāciju amplitūdu vērtības. Tāpēc tiek izmantotas 2 piederības funkcijas, bet to daļējās piederības reģioni ir nobīdīti pie mazāka punktu skaita, kas ir ilustrēts 6.3. d) attēlā.

Nākošais attiecīgā faziloģikas bloka elements ir noteikumu tabula, kas sevī ietver visas iespējamās piederības funkciju kombinācijas ar to definētiem rezultātiem. Visas tabulas kombinācijas, kuru rezultāts ir negatīvs, attiecas uz gadījumu, ka vibrāciju mērījumu datus ir neiederīgas vērtības – dati nav ticami. Savukārt, kombinācijas ar pozitīvu rezultātu liecina, ka nav aizdomu par nepareiziem vibrāciju datiem.

6.1. tabula

Faziloģikas bloka noteikumu tabula vibrāciju mērījuma datu izvērtēšanai.

Raksturlieluma piederības funkcija				Rezultāts	Raksturlieluma piederības funkcija				Rezultāts
kvb_{\max}	kvb_{\min}	n_p	n_{kp}		kvb_{\max}	kvb_{\min}	n_p	n_{kp}	
Z	Z	Z	Z	pozitīvs	Z	Z	Z	A	negatīvs
V	Z	Z	Z	pozitīvs	V	Z	Z	A	negatīvs
A	Z	Z	Z	negatīvs	A	Z	Z	A	negatīvs
Z	V	Z	Z	pozitīvs	Z	V	Z	A	negatīvs
V	V	Z	Z	pozitīvs	V	V	Z	A	negatīvs
A	V	Z	Z	negatīvs	A	V	Z	A	negatīvs
Z	A	Z	Z	pozitīvs	Z	A	Z	A	negatīvs
V	A	Z	Z	pozitīvs	V	A	Z	A	negatīvs
A	A	Z	Z	negatīvs	A	A	Z	A	negatīvs
Z	Z	A	Z	negatīvs	Z	Z	A	A	negatīvs
V	Z	A	Z	negatīvs	V	Z	A	A	negatīvs
A	Z	A	Z	negatīvs	A	Z	A	A	negatīvs
Z	V	A	Z	negatīvs	Z	V	A	A	negatīvs
V	V	A	Z	negatīvs	V	V	A	A	negatīvs
A	V	A	Z	negatīvs	A	V	A	A	negatīvs
Z	A	A	Z	negatīvs	Z	A	A	A	negatīvs
V	A	A	Z	negatīvs	V	A	A	A	negatīvs
A	A	A	Z	negatīvs	A	A	A	A	negatīvs

Kā redzams 6.1. tabulas uzrādītos rezultātos, lielākajā daļā iespējamo rezultātu tiek iegūts negatīvs rezultāts, kas nozīmē, ka ir atrasta transformatora tvertnes virsmas mērījumu datu

klūda, kas liedz turpmāku pareizu izstrādātā vibrāciju modeļa darbību. Gadījumos, kad koeficientu kvb_{\max} un kvb_{kp} piederības funkcijas ir zema riska vai vidēja riska, faziloģikas bloks signalizē, ka vibrāciju mērījumu vērtības ir ticamas.

Papildus, tā kā šis faziloģikas bloks ir izveidots, lai tas sniegtu tikai pozitīvu vai negatīvu rezultātu, nav nepieciešams veikt defazifikācijas procesu un meklēt rezultātu piederības funkcijas grafika gravitācijas centru, jo tikai divu iespējamu rezultātu gadījumā gravitācijas centrs vienmēr atrodas tā rezultāta reģionā, kuram ir vislielākā piederība.

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. Tāpēc pēc visu raksturlielumu datu pārbaudes, šis faziloģikas bloks dod pozitīvu rezultātu tikai gadījumos, ja visiem 3 raksturlielumiem ir iegūts pozitīvs rezultāts. Pretējā gadījumā, ja vismaz 1 raksturlielums dod negatīvu rezultātu, tiek iegūts slēdziens “Rezultāts ir neskaidrs” (skat. 2.1. apakšnodaļu).

6.2.3. Vibrāciju rezultātu salīdzināšanas faziloģikas bloks

Šis 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 attiecīgā transformatora situācija nav mainījusies.

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 virsmas, un to aprēķina piemērs transformatora A fāzes apgabalam ir parādīts izteiksmē (6.3).

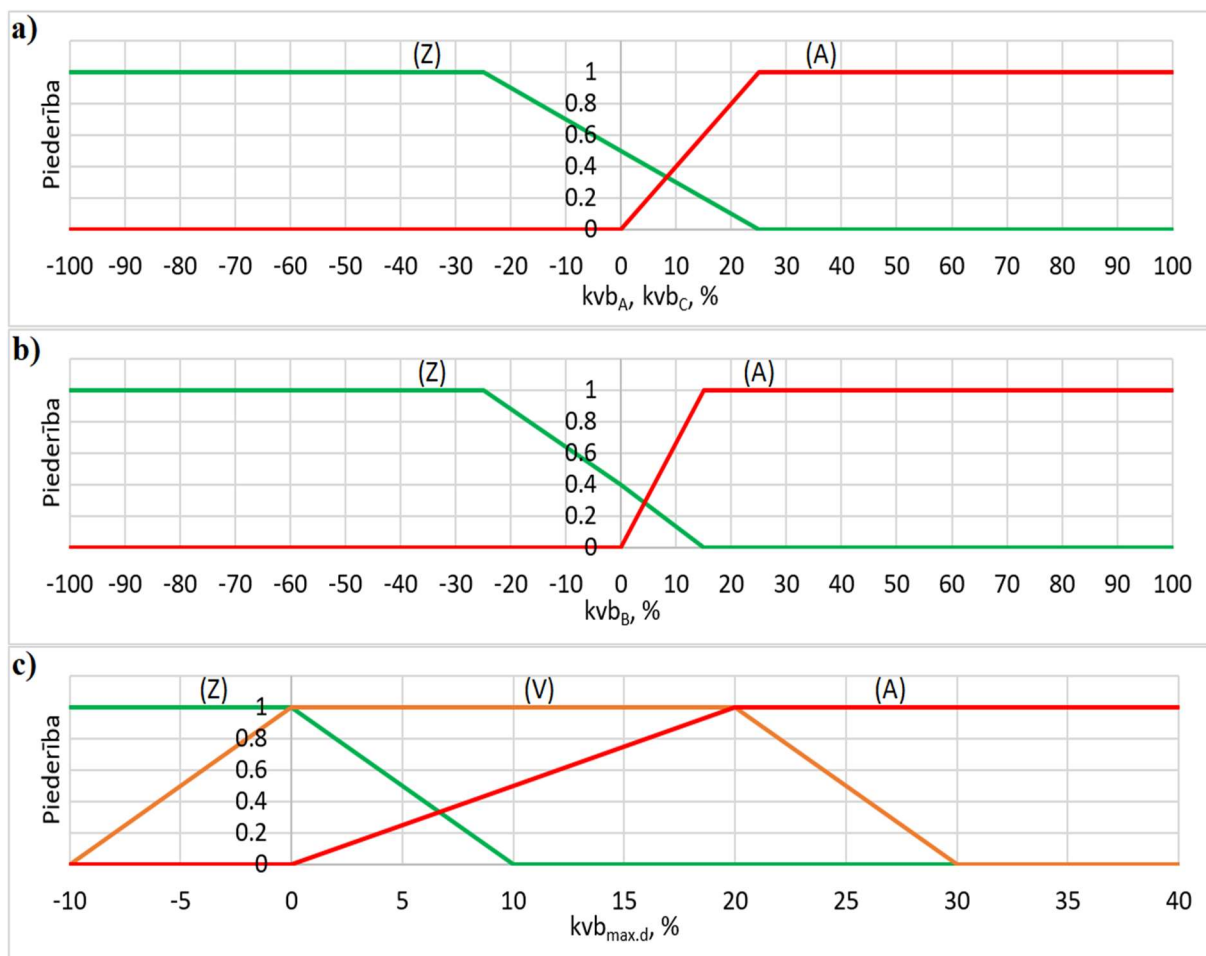
$$kvb_A = \frac{\max(vb_{A2.i}) - \min(vb_{A1.i})}{\max(vb_{A1.i})}, \%, \quad (6.3)$$

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.

Jāatzīmē, ka koeficienti kvb_A , kvb_B un kvb_C tiek aprēķināti tikai vibrāciju vērtībām, kuras pārsniedz 60 % no uzstādītām robežvērtībām, lai izvairītos no gadījumiem, kad relatīvi mazu vērtību izmaiņa rada lielu procentuālo pieaugumu.

Koeficientiem kvb_A , kvb_B un kvb_C tiek izmantotas augsta riska un zema riska piederības funkcijas (skat. 6.4. a) un b) attēlus), jo šim faziloģikas blokam ir iespējams tikai pozitīvs vai negatīvs rezultāts, kam nav vajadzīga vidēja riska piederības funkcijas. Jāatzīmē, ka B fāzes koeficienta kvb_B piederības funkcijas atšķiras, jo B fāzes reģions ir konstruktīvi stabilāks un tādejādi vibrāciju vērtību amplitūdu izmaiņas rada lielāku ietekmi, nekā izmaiņas transformatora konstrukcijas fāžu A un C reģionos.



6.4. att. Izstrādātā vibrāciju modeļa vibrāciju rezultātu salīdzināšanas bloka piederības funkciju diagramma:

a) vibrāciju vērtību izmaiņas koeficienti A fāzei un C fāzei, %, b) vibrāciju vērtību izmaiņas koeficients B fāzei, %, c) vibrāciju maksimālās vērtības izmaiņas koeficients, %.

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

$$kvb_{max.d} = \frac{kvb_{max.d2} - kvb_{max.d1}}{kvb_{max.d1}} \cdot 100, \quad (6.4)$$

kur $kvb_{max.d1}$ – vibrāciju mērījumu maksimālā vērtība pēdējā diagnostikas reizē;

$kvb_{max.d2}$ – vibrāciju mērījumu maksimālā vērtība iepriekšējā diagnostikas reizē.

Koeficienta $kvb_{max.d}$ piederības funkcijas ir parādītas 6.4. d) attēlā. Šajā gadījumā, ir izveidotas 3 piederības funkcijas, kur zema riska funkcija raksturo maksimālās vērtības samazinājumu, bet augsta riska piederības funkcija – maksimālās vērtības pieaugumu. Līdz ar to, ir iespējams iestatīt 3 atšķirīgus gadījumus, ieskaitot, kad vibrāciju amplitūdu vērtības ir palikušas nemainīgas.

Vibrāciju rezultātu salīdzināšanas faziloģikas bloka noteikumu tabula ir parādīta 6.2. tabulā. Gadījumos, kad tiek iegūts dinamisks rezultāts, tas nozīmē, ka transformatora tvertnes virsmas vibrāciju mērījumu rezultātu amplitūdas ir pieaugušas vismaz kādā no transformatora fāžu apgabaliem. Līdz ar to, izstrādātais vibrāciju modelis turpina savu darbību. Bet, ja rezultāts ir statisks, tad vibrāciju vērtības transformatora tvertnes virsmas divās diagnostikas reizēs ir palikušas praktiski nemainīgas vai pat samazinājušās. Tāpēc transformatora vibrāciju modeļa simulācija netiek veikta, bet kā papildus informācija tiek izmantots iepriekšējā transformatora vibrāciju modeļa iegūtais slēdziens. Tā kā vibrāciju mērījumu dati nav mainījušies, iepriekš iegūtais modeļa slēdziens tiek atkārtots.

6.2. tabula

Vibrāciju rezultātu salīdzināšanas faziloģikas bloka noteikumu tabula

Raksturlieluma piederības funkcija				Rezultāts	Raksturlieluma piederības funkcija				Rezultāts
k_{vB_A}	k_{vB_B}	k_{vB_C}	$k_{vB_{max,d}}$		k_{vB_A}	k_{vB_B}	k_{vB_C}	$k_{vB_{max,d}}$	
Z	Z	Z	Z	Statisks	Z	Z	A	V	Dinamisks
A	Z	Z	Z	Dinamisks	A	Z	A	V	Dinamisks
Z	A	Z	Z	Dinamisks	Z	A	A	V	Dinamisks
A	A	Z	Z	Dinamisks	A	A	A	V	Dinamisks
Z	Z	A	Z	Dinamisks	Z	Z	Z	A	Statisks
A	Z	A	Z	Dinamisks	A	Z	Z	A	Dinamisks
Z	A	A	Z	Dinamisks	Z	A	Z	A	Dinamisks
A	A	A	Z	Dinamisks	A	A	Z	A	Dinamisks
Z	Z	Z	V	Statisks	Z	Z	A	A	Dinamisks
A	Z	Z	V	Dinamisks	A	Z	A	A	Dinamisks
Z	A	Z	V	Dinamisks	Z	A	A	A	Dinamisks
A	A	Z	V	Dinamisks	A	A	A	A	Dinamisks

Jāatzīmē, ka līdzīgi kā iepriekš paskaidrotā faziloģikas blokā, ir iespējami tikai 2 atšķirīgi rezultāti. Tāpēc faziloģikas rezultātu piederības funkcijai nav nepieciešams meklēt tās grafika gravitācijas centru, bet gan pietiek ar lielākā rezultāta piederības atrašanu.

Papildus, arī šajā izveidotā faziloģikas blokā ir nepieciešams veikt vibrāciju datu pārbaudi, izmantojot vibropārvietojumu l , vibroātrumu v un vibropaātrinājumu a . Tā kā šo parametru skaitliskās vērtības ir krasi atšķirīgas, ir nepieciešams veikt faziloģikas bloka darbību 3 reizes, pārbaudot visu raksturlielumus. Rezultāts vienmēr tiek izvēlēts kā sliktākais no trim raksturlielumu rezultātiem. Tas nozīmē, ka statisks rezultāts ir iespējams tikai gadījumā, ja visi trīs vibrāciju raksturlielumu rezultāti ir iegūti kā statiski.

6.2.4. Tinumu mehāniskā defekta noteikšanas faziloģikas bloks

Šis faziloģikas bloks ir paredzēts, lai noteiktu, kurā pārbaudāmā transformatora aktīvās daļas sastāvdaļā ir aizdomas par mehānisko defektu. Iespējamie rezultāti ir, pozitīvs rezultāts attiecībā uz mehānisko defektu transformatora tinumos, neitrāls rezultāts un negatīvs rezultāts. Faziloģikas bloks izmanto 3 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:

$$k_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_v} (a_{sl,i} - a_{t,i})^2}{n_v}} \cdot 100, \quad (6.5)$$

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

$a_{t,i}$ – vibropaātrinājuma i -tā vērtība no tukšgaitas diagnostikas 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 (skat. 7.1. apakšnodaļu, 7.13. attēlu).

Pēc tam tiek lietota lineāra vismazāko kvadrātu metode [61], lai ekstrapolētu modelēto vibrāciju amplitūdu vērtības tukšgaitas režīmā, izmantojot aprēķinātās vibrāciju vērtības no 100 % līdz 30 % no nominālās jaudas. Šīs metodes ietvaros modelēto vibrāciju amplitūdu vērtības, kuras ir aprēķinātas pie atšķirīgām transformatora slodzes vērtībām, tiek izmantotas, lai radītu regresīvu taisnes vienādojumu, kurš lineāri aproksimē aprēķināto vibrāciju datus atkarībā no transformatora procentuālās jaudas. Šo vienādojumu visiem trim vibrāciju raksturlielumiem var izteikt sekojoši kā:

$$y_{LLS} = z_{LLS} \cdot x_{LLS} + w_{LLS}, \quad (6.6)$$

kur y_{LLS} – aproksimētā vibrāciju vērtības amplitūda pie attiecīgās slodzes;

x_{LLS} – attiecīgā slodze, %;

z_{LLS} – vismazāko kvadrātu metodes koeficients;

w_{LLS} – vismazāko kvadrātu metodes koeficients.

Vismazāko kvadrātu metodes taisnes vienādojuma koeficientus z_{LLS} un w_{LLS} var aprēķināt sekojoši:

$$z_{LLS} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_{LLS,i} \cdot y_{LLS,i}) - \sum_{i=1}^n x_{LLS,i} \cdot \sum_{i=1}^n y_{LLS,i}}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_{LLS,i}^2 - (\sum_{i=1}^n x_{LLS,i})^2}, \quad (6.7)$$

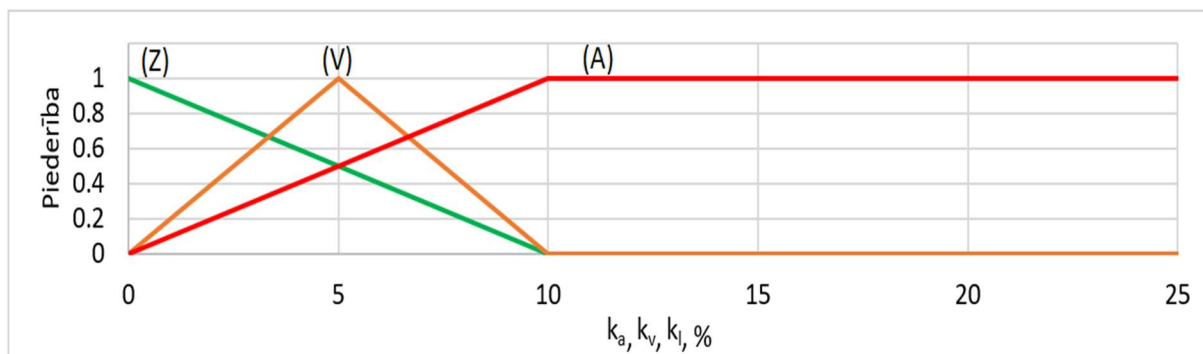
$$w_{LLS} = \frac{1}{n} \cdot (\sum_{i=1}^n y_{LLS,i} - z_{LLS} \cdot \sum_{i=1}^n x_{LLS,i}), \quad (6.8)$$

kur $y_{LLS,i}$ – i -tā attiecīgā vibrāciju raksturlieluma vērtības amplitūda;

$x_{LLS,i}$ – i -tā attiecīgā slodze, %;

n – vismazāko kvadrātu metodes koeficients.

Raksturlielumu k_a , k_v un k_l piederības funkcijas ir ilustrētas 6.5. attēlā, un tiek izmantotas zema, vidēja un augsta riska piederības funkcijas, jo iepriekšējās nodaļās paskaidroto masu un atsperu sistēma melnās kastes principa dēļ var rasties pretrunas atšķirīgu bloka raksturlielumu rezultātos.



6.5. att. Tinumu mehāniskā defekta esamības noteikšanas un lokalizēšanas faziloģikas bloka piederības funkciju diagramma.

Nākošais šī faziloģikas bloka elements ir tā noteikumu tabula. Pozitīva rezultāta gadījumā iegūst slēdzienu, ka ir aizdomas par mehānisko defektu transformatora tinumos, jo lielākajā daļā raksturlielumu vērtību dominē zema riska līmeņa piederības funkcijas, un pastāv laba sakritība starp vibrāciju rezultātiem no slodzes režīmu simulācijas un tukšgaitās mērījumu rezultātiem.

6.3. tabula

Faziloģikas bloka noteikumu tabula mehānisku defektu vietas noteikšanai

Raksturlieluma piederības funkcija			Rezultāts	Raksturlieluma piederības funkcija			Rezultāts
$k_{paātr.}$	$k_{ātr.}$	$k_{pārv.}$		$k_{paātr.}$	$k_{ātr.}$	$k_{pārv.}$	
Z	Z	Z	Pozitīvs	Z	A	V	Neitrāls
V	Z	Z	Pozitīvs	V	A	V	Negatīvs
A	Z	Z	Neitrāls	A	A	V	Negatīvs
Z	V	Z	Pozitīvs	Z	Z	A	Neitrāls
V	V	Z	Pozitīvs	V	Z	A	Neitrāls
A	V	Z	Neitrāls	A	Z	A	Neitrāls
Z	A	Z	Neitrāls	Z	V	A	Neitrāls
V	A	Z	Neitrāls	V	V	A	Negatīvs
A	A	Z	Neitrāls	A	V	A	Negatīvs
Z	Z	V	Pozitīvs	Z	A	A	Neitrāls
V	Z	V	Pozitīvs	V	A	A	Negatīvs
A	Z	V	Neitrāls	A	A	A	Negatīvs
Z	V	V	Pozitīvs				
V	V	V	Neitrāls				
A	V	V	Negatīvs				

Negatīva rezultāta negatīva gadījumā ir aizdomas par mehānisko defektu transformatora magnētavadā, tāpēc tiek darbināts nākamais izstrādātā vibrāciju modeļa bloks un tiek aprēķinātas vibrācijas no magnetostrikcijas efekta. Šajā gadījumā pēc slodzes režīmu simulācijas vibrāciju rezultātu salīdzināšanas ar tukšgaitas režīma diagnostikas mērījumu rezultātiem ir redzama izteikta atšķirība, ko nevar izskaidrot ar vibrācijām transformatora tinumos.

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. Šādā gadījumā izstrādātais vibrāciju modelis arī veic magnetostrikcijas efekta vibrāciju aprēķinu.

Šī faziloģikas bloka ietvaros ir nepieciešams atrast tā rezultātu piederības funkcijas grafika gravitācijas centra pozīciju, jo ir iespējami trīs atšķirīgi faziloģikas bloka rezultāti, un var izveidoties līdzsvars starp ekstrēmo rezultātu piederībām, bet rezultāts atrodas vidējā rezultāta apgabalā ar vismazāko piederību. Rezultātu piederības funkcijas gravitācijas centru aprēķina šādi:

$$R_{\text{fuzi}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{it}}} x_{f,i} y_{f,i}}{\sum_{i=1}^{n_{\text{it}}} y_{f,i}}, \quad (6.9)$$

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

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

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

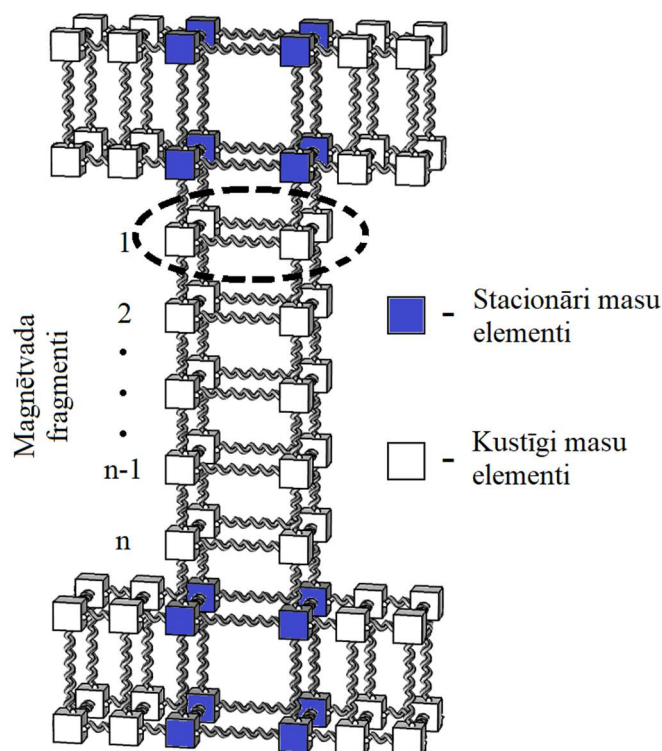
Aprēķinot piederības funkcijas gravitācijas centru, ir jāizvēlas izvēlēties pietiekoši lielu n_{it} vērtību, jo tas tieši ietekmē gravitācijas centra atrašanās precizitāti. Līdz ar to, relatīvi sarežģīta rakstura piederības funkciju gadījumā ir nepieciešama n_{it} vērtība, kura ir pietiekoša, lai tādā daudzumā sadalot rezultātu piederības funkcijas grafiku, to varētu aproksimēt ar šāda platuma paralēlskaldaņiem un būtiski neietekmēt tās precizitāti. Izstrādātā vibrāciju modeļa ietvaros n_{it} vērtība ir 10000, kura ļauj noteikt gravitācijas centra atrašanās vietu ar kļūdu 0.01 %.

Jāatzīmē, ka šis faziloģikas bloks izmanto visus 3 vibrāciju raksturlielumus un to ir nepieciešams darbināt tikai 1 reizi.

6.2.5. Mehānisko defektu noteikšana magnētavadā

Gadījumos, kad tinumu mehāniskā defekta noteikšanas faziloģikas bloks sniedz negatīvu vai neitrālu rezultātu, tiek veikta magnetostrikcijas efekta radīto vibrāciju modelēšana [52]. 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. 6.6. attēlu). Katrā fragmentā ir divas atsperes, kas ir novietotas perpendikulāri transformatora tvertnes virsmai, uz kuras tika iegūtas vibrāciju mērījumu vērtības. Līdz ar to, tieši šo atsperu stinguma koeficienti visvairāk nosaka, ar kādu vibropārvietojumu pārvietosies šī transformatora magnētavada fragmenta masu elementi. Tāpēc šie 2 stinguma koeficienti tiek

izmantoti, lai noteiktu, vai attiecīgā magnētvara fragmenta reģionā ir aizdomas par mehānisku defektu.



6.6. att. Transformatora magnētvara ģeometrijas fragmenta ilustrācija.

Izdalot lielāko no šiem koeficientiem ar mazāko, tiek iegūts proporcijas koeficients k_r . Šī koeficienta vērtība attiecībā pret citu tā paša magnētvara stieņa vai jūga fragmentu proporciju koeficientiem nosaka, vai ir aizdomas par mehānisku defektu tieši attiecīgajā fragmentā. Šāda pieeja tiek pielietota, jo k_r vērtības ir iegūtas, izmantojot melnās kastes principu, līdz ar to absolūtās vērtības nevar izmantot, jo starp tām nepastāv savstarpēja sakarība. Savukārt, ja noteikta fragmenta proporcijas koeficienta k_r relatīvi liela vērtība signalizē, cik atšķirīga ir šī magnētvara fragmenta mehāniskā stiprība. Tāpēc, ja tiek atrasti fragmenti, kuru k_r ir relatīvi lielāka par citu fragmentu attiecīgiem rezultātiem, izstrādātais vibrāciju modelis nonāk pie slēdziena, ka ir aizdomas par mehānisku defektu magnētavadā. Attiecīgā izstrādātā vibrāciju modeļa bloka darbības piemērs ir parādīts aprēķina piemērā (skat. 7.1. apakšnodaļu) un autora rakstā [52].

6.2.6. Papildu izvērtēšana slēdziena ģenerēšanai

Gadījumos, kad transformatora tinumu un magnētvara 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. Šai izvērtēšanai ir nepieciešams arī iepriekšējais izstrādātā vibrāciju modeļa slēdziens ar papildus informāciju, vai slēdziens ir ticams, proti, vai ir veikti rekomendētie papildus testi un to rezultāti apstiprina iegūto slēdzienu.

Noteikumu tabula slēdziena ģenerēšanai

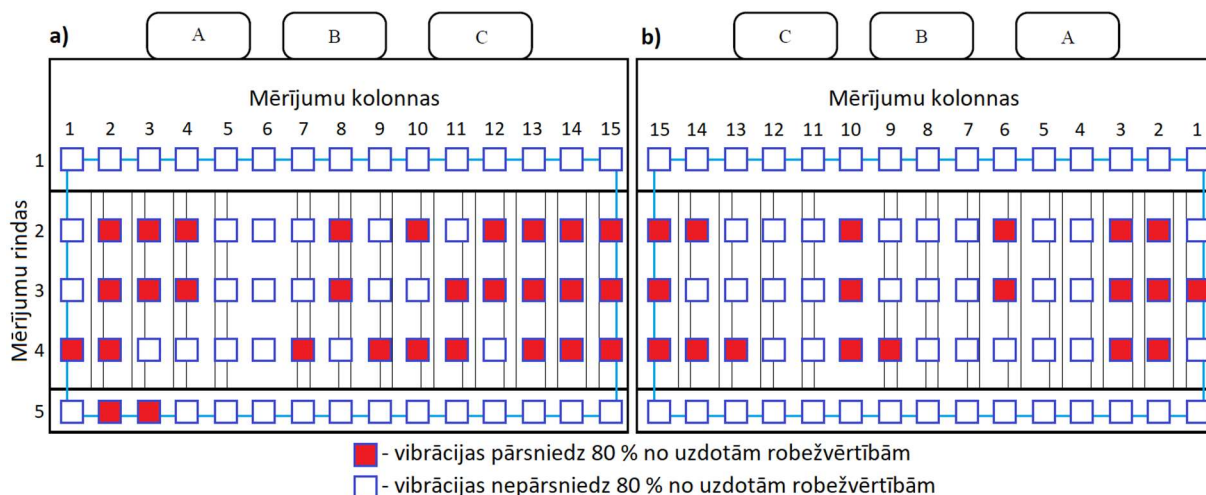
Iepriekšējais modeļa slēdziens	Vai slēdziens ir ticams	Tinumu mehāniskā defekta noteikšanas faziloģikas bloka rezultāts	Slēdziena numurs (skat. 2.1. apakšnodaļu)
2	Jā vai nē	Neitrāls vai negatīvs	2
3	Jā	Neitrāls vai negatīvs	3
3	Nē	Neitrāls vai negatīvs	2
4	Jā	Neitrāls vai negatīvs	4
4	Nē	Neitrāls vai negatīvs	2
5	Jā vai nē	Neitrāls	5
5	Jā vai nē	Negatīvs	2
Nav	–	Neitrāls	5
Nav	–	Negatīvs	2

Jāatzīmē, ka ar 6.4. tabulu ir iespējams iegūt visus slēdzienus, izņemot gadījumu, kad nav aizdomu par mehānisko defektu.

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).



7.1. att. Vibrāciju sensoru uzrādītie dati uz transformatora:

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

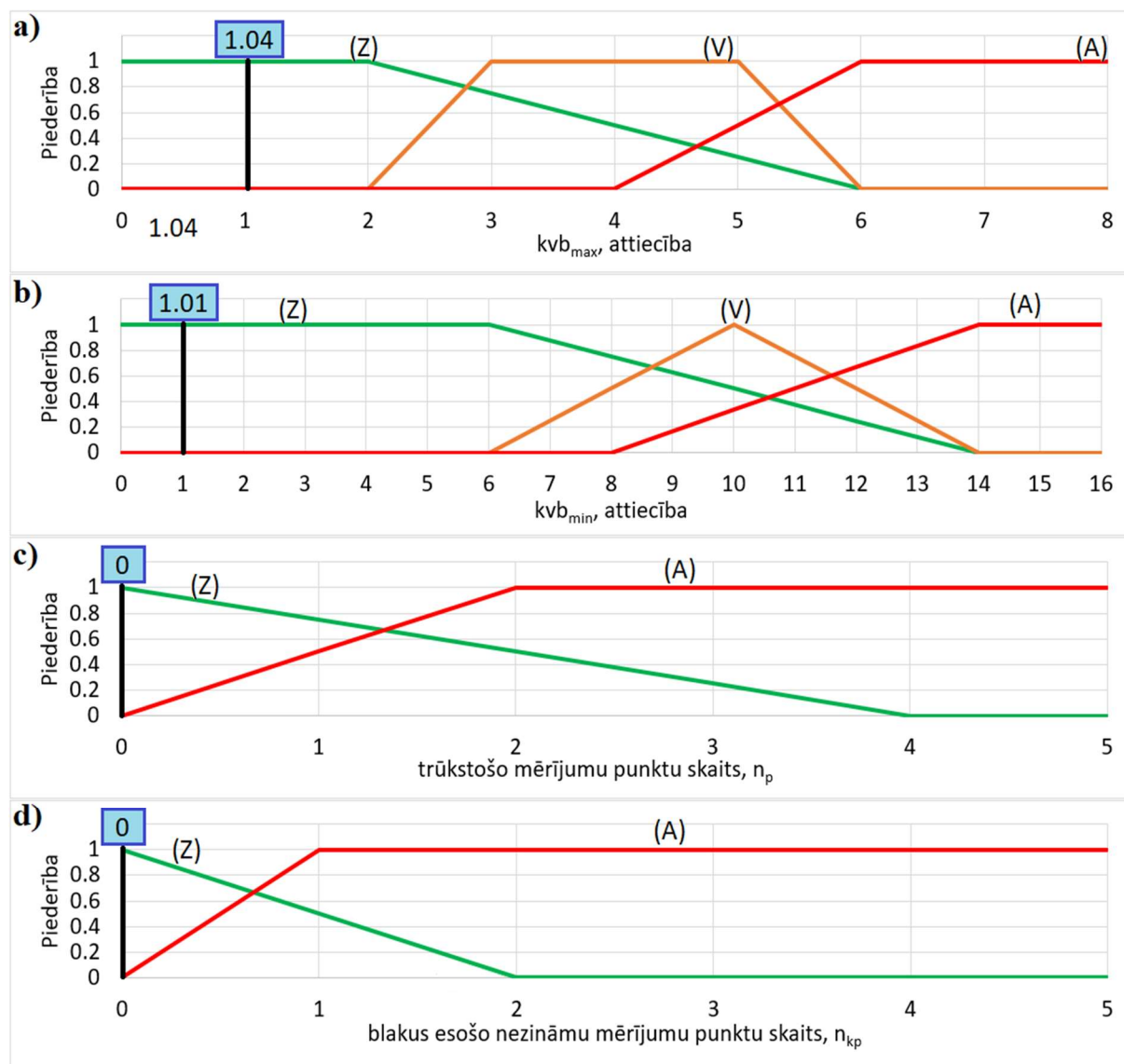
Lai pārliecinātos par šī transformatora radīto vibrāciju datu pareizību, tie visi tiek apstrādāti ar neiederošo vibrāciju mērījumu faziloģikas bloku (skat. 6.2.2. apakšnodaļu).

7.1. tabula

Neiederošo vibrāciju mērījumu rezultātu bloka rezultāti

Darbības režīms	Tvertnes sprieguma puse	Vibrāciju raksturlielums	Raksturlielums				Pozitīva rezultāta piederība	Negatīva rezultāta piederība	Rezultāts
			kvb_{max}	kvb_{min}	n_p	n_{kp}			
100 % slodze	AS	a	1,04	1,01	0	0	1	0	Pozitīvs
		v	1,03	1,08	0	0	1	0	Pozitīvs
		l	1,03	1,08	0	0	1	0	Pozitīvs
	ZS	a	1,20	1,27	0	0	1	0	Pozitīvs
		v	1,19	1,20	0	0	1	0	Pozitīvs
		l	1,18	1,72	0	0	1	0	Pozitīvs
tukšgaita	AS	a	1,51	1,23	0	0	1	0	Pozitīvs
		v	1,56	1,13	0	0	1	0	Pozitīvs
		l	1,62	2,06	0	0	1	0	Pozitīvs
	ZS	a	1,22	1,04	0	0	1	0	Pozitīvs
		v	1,20	1,03	0	0	1	0	Pozitīvs
		l	1,20	1,38	0	0	1	0	Pozitīvs

Šīs pārbaudes ietvaros tiek pārbaudītas 12 vibrāciju datu grupas, kuru rezultāti ir parādīti 7.1. tabulā. Kā piemērs sīkāk izvērsti tiek apskatītas vibrāciju vērtības 100 % slodzes gadījumā tvertnes augstākā sprieguma pusē vibropaātrinājumam, kas ir pirmā vibrāciju datu grupa 7.1. tabulā.



7.2. att. Neiederošo vibrāciju mērījumu rezultātu bloka piederības funkciju piemēra rezultāti.

Šajā gadījumā neiederošo vibrāciju mērījumu rezultātu bloka 4 raksturlielumu aprēķinātās vērtības ir $kvb_{max}=1,04$; $kvb_{min}=1,01$; $n_p=0$ un $n_{kp}=0$ (izteiksmes (6.1) un (6.2)). Šīs vērtības tiek ievietotas neiederošo vibrāciju mērījumu rezultātu bloka piederības funkciju diagrammā (skat. 7.2. attēlu), lai aktivizētu attiecīgās kombinācijas faziloģikas bloka noteikumu tabulā (skat. 6.1. tabulu). Tā kā katram faziloģikas raksturlielumam pie šīm konkrētām vērtībām pastāv tikai viena piederības funkcija, kuras piederība nav tukša, tad šī

faziloģikas bloka noteikumu tabulā eksistē tikai viena kombinācija, kura tiek aktivizēta (skat. 7.2. tabulu). Tā kā aktīva ir tikai viena šī faziloģikas bloka noteikumu tabulas kombinācija, tā dod piederību tikai vienam rezultātam, kas šajā konkrētajā gadījumā ir pozitīvs. Tādā pašā veidā rezultāti no šī faziloģikas bloka tiek iegūti visām pārējām vibrāciju datu grupām.

7.2. tabula

Neiederošo vibrāciju mērījumu rezultātu bloka noteikumu tabulas fragments ar aktivizēto kombināciju.

Raksturlieluma piederības funkcija				Rezultāts
kvb_{\max}	kvb_{\min}	n_p	n_{kp}	
Z	Z	Z	Z	pozitīvs

Šī transformatora gadījumā visiem tā datiem tiek iegūts pozitīvs rezultāts, kas liecina, ka vibrāciju mērījumu dati ir ticami un izstrādātais vibrāciju modelis turpina savu darbību, kur pārbaudot vai starp datiem ir vibrāciju vērtības, kuras pārsniedz 80 % no uzdotām robežvērtībām. Šim transformatoram tādas vērtības ir gandrīz visas tā tvertnes malu diapazonā (skat. 7.1. attēlu), kur lielākā daļa paaugstināto vibrāciju vērtību ir reģistrētas, mērot vibropaātrinājuma vērtības gan 100 % slodzes, gan tukšgaitas režīmā.

Līdz ar to transformatora vibrāciju modelis nonāk tālāk pie vibrāciju rezultātu salīdzināšanas faziloģikas bloka, kura darbības veikšanai ir jāveic vibrāciju vērtību aproksimāciju, jo sensoru izvietojums divos secīgos mērījumos ir bijis atšķirīgs.

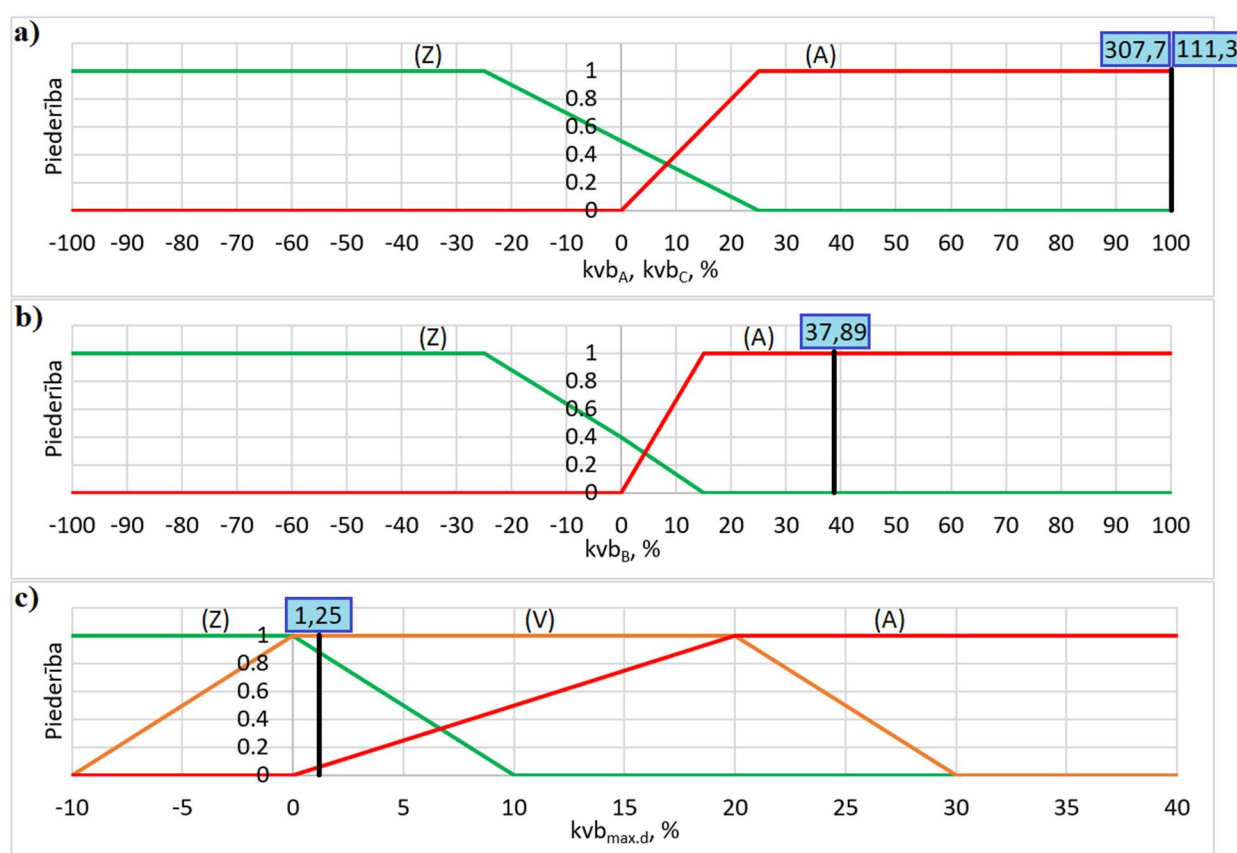
7.3. tabula

Vibrāciju rezultātu salīdzināšanas faziloģikas bloka rezultāti

Darbības režīms	Tvertnes sprieguma puse	Vibrāciju raksturlielums	Raksturlielums, %				Statiska rezultāta piederība	Dinamiska rezultāta piederība	Rezultāts
			kvb_a	kvb_b	kvb_c	$kvb_{\max,d}$			
100 % slodze	AS	<i>a</i>	307,7	37,89	111,3	1,250	0	1,93	Dinamisks
		<i>v</i>	828,4	146,4	211,3	-39,08	0	1	Dinamisks
		<i>l</i>	482,4	196,9	11,22	50,28	0	0,73	Dinamisks
	ZS	<i>a</i>	103,1	43,42	30,17	59,45	0	1	Dinamisks
		<i>v</i>	297,4	450,9	234,1	42,72	0	1	Dinamisks
		<i>l</i>	350,4	611,8	63,46	79,78	0	1	Dinamisks
tukšgaita	AS	<i>a</i>	40,70	88,21	79,70	32,71	0	1	Dinamisks
		<i>v</i>	224,4	131,2	292,7	2,840	0	1,86	Dinamisks
		<i>l</i>	39,00	0	56,38	65,55	0	0,50	Dinamisks
	ZS	<i>a</i>	70,40	66,01	167,7	37,33	0	1	Dinamisks
		<i>v</i>	150,6	304,4	315,4	8,700	0	1,57	Dinamisks
		<i>l</i>	0,900	144,3	46,34	67,39	0	0,52	Dinamisks

Iepriekšējā mērījumā datu punkti iegūti no četrām mērījumu rindām un 12 mērījumu kolonnām, tāpēc tiek izmantota gan Ņūtona polinomu, gan modificētā Ņūtona polinomu metode, jo mērījumu kolonnu skaits pārsniedz 5. Vibrāciju datu aproksimācijas mērķis ir iegūt vibrāciju vērtības, kas atbilst pēdējā mērījuma sensoru pozīcijām, un veiktu izvērtēšanu ar vibrāciju rezultātu salīdzināšanas faziloģikas bloku. Jāatzīmē, ka iepriekšējā mērījuma datu aproksimācija ir jāveic atsevišķi visiem vibrāciju raksturlielumiem.

Kā vibrāciju rezultātu salīdzināšanas faziloģikas bloka darbības piemērs tiek izvērtēti apskatītas vibrāciju vērtības 100 % slodzes gadījumā tvertnes augstākā sprieguma pusē vibropaātrinājumam, kas ir pirmā vibrāciju datu grupa 7.3. tabulā. Šajā gadījumā neiederošo vibrāciju mērījumu rezultātu bloka 4 raksturlielumu ar izteiksmēm (6.3) un (6.4) aprēķinātās vērtībās ir : $kvb_A=307,7\%$; $kvb_B=37,89\%$; $kvb_C=111,3\%$ un $kvb_{\max,d}=1,25\%$.



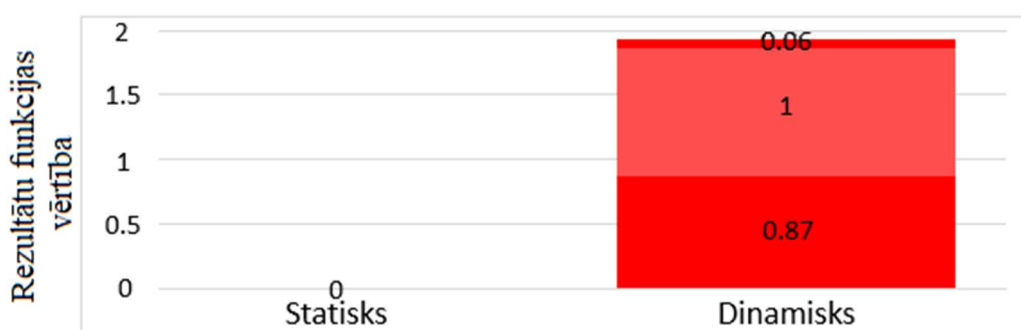
7.3. att. Vibrāciju rezultātu salīdzināšanas bloka piederības funkciju piemēra rezultāti.

Šīs vērtības tiek ievietotas vibrāciju rezultātu salīdzināšanas bloka piederības funkciju diagrammā (skat. 7.3. attēlu), lai aktivizētu attiecīgās kombinācijas faziloģikas bloka noteikumu tabulā (skat. 6.2. tabulu). Šī piemēra gadījumā 7.3. attēla a), b) un c) grafikos konkrētām vērtībām atbilst tikai augsta riska piederības funkcijas, bet d) grafikā visām trim piederības funkcijām vērtības ir lielākas par nulli. Līdz ar to, pastāv 3 kombinācijas, kuras tiek aktivizētas (skat. 7.4. tabulu).

Vibrāciju rezultātu salīdzināšanas bloka noteikumu tabulas fragments ar aktivizētajām kombinācijām

Raksturlieluma piederības funkcija				Rezultāts
kvb_{\max}	kvb_{\min}	n_p	n_{kp}	
A	A	A	Z	Dinamisks
A	A	A	V	Dinamisks
A	A	A	A	Dinamisks

Tā kā visām rezultātu tabulas aktivizētajām kombinācijām rezultāts ir dinamisks, tas ir vienīgais rezultāts, kurš rezultātu piederības funkcijā ir ar vērtību, kas lielāka par nulli. Šī rezultāta ilustrācija ir parādīta 7.4. attēlā.



7.4. att. Vibrāciju rezultātu salīdzināšanas faziloģikas bloka rezultātu funkcija.

Līdzīgi iegūst vibrāciju rezultātu salīdzināšanas faziloģikas bloka rezultātus visu pārējo vibrāciju raksturlielumu, tvertnes pušu un transformatora darbības režīmu vibrāciju datiem.

Šī 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, to veicot 12 tinumu segmentiem, proti, 4 segmentiem katrā fāzē (skat. 7.8. attēlu). Jāatzīmē, ka atsevišķo transformatora tinumu segmentu individuālā numerācija ir izveidota, lai nākošajos izstrādātā vibrāciju modeļa soļos šie tinumu segmenti pareizi attiektos pret iespējamo magnētvasda radīto vibrāciju simulāciju un rezultātu vērtējumu.

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. Šī darbība ir ilustrēta 4.2. un 4.3. attēlos.

Ģeometriskā modeļa izveidē visi transformatora aktīvās daļas elementi tiek definēti kā monolīti domēni, kuriem katram tiek piešķirts materiāls no *COMSOL* programmas materiālu bibliotēkas. Jāatzīmē, ka šos materiālus ir iespējams modificēt un arī izveidot jaunus iepriekš nedefinētus materiālus. Šī transformatora gadījumā magnētvasda materiāls tiek uzdots kā 1151 markas elektrotehniskais tērauds [102], līdz ar to, materiālu bibliotēkā jau esošs

elektrotehniskais tērauds tiek modificēts, kur tam tiek pievienota materiāla magnetizēšanās līkne.

Pārējie nepieciešamie materiāli transformatora magnētiskā lauka iegūšanai ir atrodami *COMSOL* programmas materiālu bibliotēkā. Tos sastāda varš, ar kuru tiek definēti transformatora magnētiskā lauka tinumu domēni, un transformatoru eļļa, ar kuru tiek definēts domēns, kurš sevī ietver visus aktīvās daļas domēnus.

Nākošais solis ir nepieciešamo parametru definēšana šim attiecīgajam transformatoram (skat. 7.5. tabulu), kas tiek aprēķināti ar izteiksmēm (4.23), (4.24) un (4.25) un tiek ievadīti *COMSOL* programmā.

7.5. tabula

Pārbaudāmā transformatora ievades parametru dati

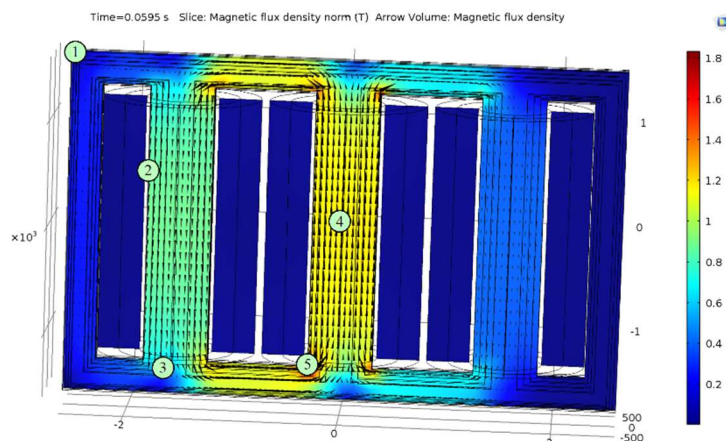
Parametra nosaukums	Vērtība	Mērvienība	Apraksts
ν	50	Hz	Sprieguma frekvence
N_p	20	-	Primāro tinumu vijumu skaits
N_s	871	-	Sekundāro tinumu vijumu skaits
R_p	0,952	Ω	Primārās puses aktīvā pretestība
R_s	1203	Ω	Sekundārās puses aktīvā pretestība
V_{ac}	7967	V	Primārais fāzes spriegums

Kā nākošais solis ir domēnu definēšana, kuros var eksistēt magnētiskais lauks. Šajā gadījumā tas ir visos transformatora aktīvās daļas domēnos un transformatora eļļas domēnā. Tas ir nepieciešams, jo tiek modelēta transformatora magnētiskā lauka plūsmas izkliedes komponente, kas plūst caur tā tinumu domēniem.

Pēc tam tiek definēta šī attiecīgā transformatora elektriskā ķēde. Jāatzīmē, ka var būt vajadzīgas vairākas iterācijas magnētiskā lauka modelēšanā, ja nākošajos izstrādātā vibrāciju modeļa blokos tiek aprēķināts, kādas vibrāciju vērtības tiek radītas transformatora tinumos, ja transformatora slodze tiek samazināta ar noteiktu soli, attiecīgi transformatora radītais magnētiskais lauks ir atšķirīgs.

Kā pēdējais solis ir simulācijas kopējā laika perioda un tās iekšējo iterāciju laika intervālu definēšana. Šajā gadījumā simulācijas kopējais laika periods ir 0,1 s, bet iterāciju laika intervāli tiek uzdoti kā $5 \cdot 10^{-4}$ s.

Pēc transformatora magnētiskā lauka modeļa aprēķinu veikšanas iegūtie magnētiskās indukcijas B transformatora tinumos un magnētiskā un strāvas blīvuma j tinumos rezultāti tiek eksportēti uz .txt dokumentu tālākai to apstrādei. Ja nepieciešams, ir iespējams programmā vizuāli apskatīt magnētiskās indukcijas vērtības jebkuram izstrādātā vibrāciju modeļa domēnam. Piemēram, 7.5. attēls parāda aprēķinātā magnētiskā lauka magnētiskās indukcijas vērtības modelētā transformatora magnētiskā un tinumu šķēsgriezumā, kas ir novietots aktīvās daļas vidū laika momentā 0,0595 sekundes no modelēšanas sākuma brīža.



7.5. att. Magnētiskās indukcijas magnētvida šķēsgriezuma rezultātu vizualizācija laika momentam 0,0595 sekundes.

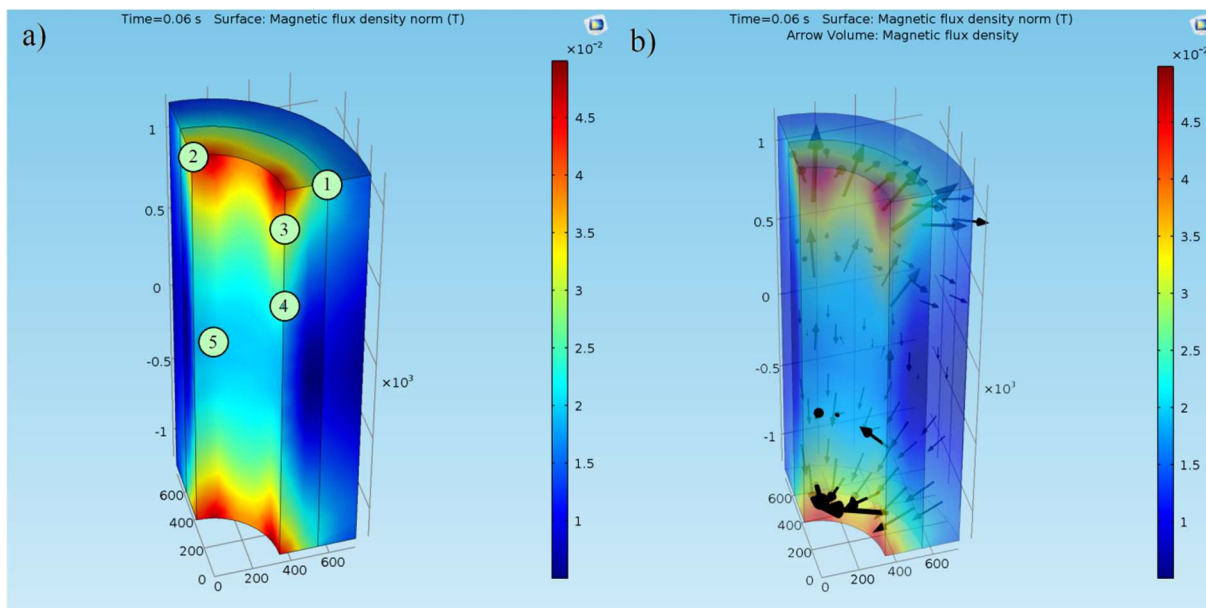
Uzskatāmības dēļ 7.6. tabula parāda iegūtos magnētiskās indukcijas rezultātus 5 punktiem, kuri ir redzami 7.5. attēlā. Rezultāti tiek parādīti magnētvida šķēsgriezuma pozīcijās, kurās magnētiskai indukcijai ir gan salīdzinoši mazākas, gan lielākas vērtības attiecībā pret maksimāli iegūto vērtību šajā laika momentā. Jāatzīmē, ka 7.6. tabula ir tikai fragments no visiem $n_{m.B}=13981$ rezultātu punktiem, kuri ļauj iegūt informāciju par transformatora modelī simulēto magnētisko lauku trīsdimensionālā telpā.

7.6. tabula

Magnētiskās indukcijas magnētavadā rezultātu fragments 7.5. attēla punktiem

Nr.	Pozīcija x ass virzienā, mm	Pozīcija y ass virzienā, mm	Pozīcija z ass virzienā, mm	Magnētiskās indukcijas x ass komponente, T	Magnētiskās indukcijas y ass komponente, T	Magnētiskās indukcijas z ass komponente, T
1	-2600	0	1600	0,05264	0,000964	0,01783
2	-1850	0	536,7	0,005719	0,000867	-0,8626
3	-1681	0	-1485	0,005585	0,000574	-0,1928
4	66,09	0	-13,29	-0,000365	-0,000623	1,185
5	-300	0	-1300	1,197	0,003999	1,025
...						
$n_{m.B}$						

Tālākai apstrādei šajā izstrādātā vibrāciju modeļa blokā tiek izmantotas tieši magnētiskā lauka izkliedes komponentes, kas šķērso modelējamā lieljaudas transformatora tinumus. 7.6. a) attēls ilustrē magnētiskās indukcijas vērtības transformatora B fāzes abu spriegumu pušu tinumu 90 grādu segmentā, kas atbilst visam tinumu vertikālajam garumam. Kā redzams, relatīvi lielākas magnētiskās indukcijas vērtības ir novērojamas tieši tinumu daļās, kuras atrodas to iekšienē un vistuvāk transformatora magnētvida jūgiem. Tas skaidrojams ar to, ka magnētiskā lauka izkliedes komponente samazinās, palielinoties attālumam no magnētvida (skat. 7.6. b) attēlu).



7.6. att. Magnētiskās indukcijas rezultāti transformatora B fāzes tinuma segmentā:
a) vektoru amplitūdu vērtības uz tā virsmas, b) vektoru virzieni tā iekšienē.

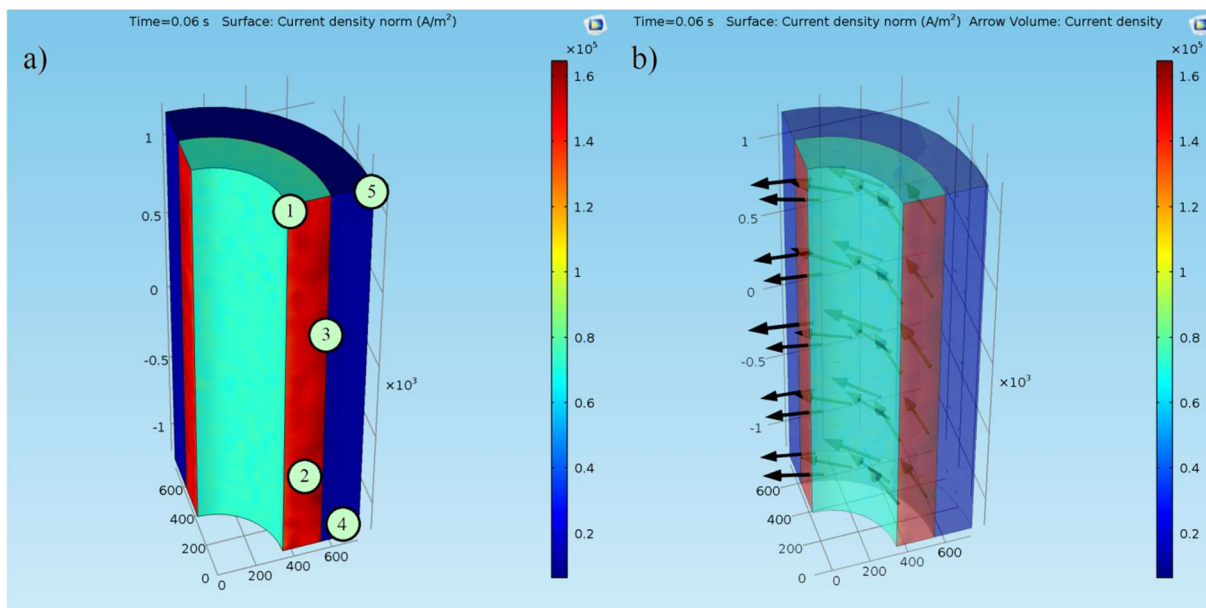
7.7. tabula parāda iegūtos magnētiskās indukcijas rezultātus 5 punktos, kuri ir redzami 7.3. attēlā, un ir izvēlēti tā, lai tie parādītu datu vērtības tinumu fragmenta ģeometrijas pozīcijās, kurās magnētiskā indukcijai ir vienas no vislielākajām vērtībām. Jāatzīmē, ka arī tinumu gadījumā kopējais rezultātu punktu skaits ir ievērojami lielāks, proti, $n_{w.B}=7842$.

7.7. tabula

Magnētiskās indukcijas tinumos rezultātu fragments

Nr.	Pozīcija x ass virzienā, mm	Pozīcija y ass virzienā, mm	Pozīcija z ass virzienā, mm	Magnētiskās indukcijas x ass komponente, T	Magnētiskās indukcijas y ass komponente, T	Magnētiskās indukcijas z ass komponente, T
1	540	0	1200	-0,02189	-0,0000632	0,00274
2	0	340	1200	-0,000407	-0,03701	-0,01455
3	340	0	972,4	-0,02826	-0,000642	-0,01634
4	340	0	518,6	-0,01338	-0,000425	-0,01627
5	112,8	320,7	-0,1332	0,000112	-0,000109	-0,01695
...						
$n_{w.B}$						

7.7. a) attēls parāda transformatora magnētiskā lauka modeļa aprēķinātās strāvas blīvuma tangenciālās komponentes transformatora B fāzes augstākās un zemākās sprieguma puses tinumu segmentam. Un to vērtības var tikai tinumu šķērsgriezumos. 7.7. b) attēls ilustrē tādu pašu situāciju, bet ar caurskatāmu domēnu attēlojumu un ar strāvu blīvuma vektoriem, kuri attiecīgi atspoguļo tā virzienu un relatīvo vērtību.



7.7. att. Strāvas blīvuma rezultāti transformatora B fāzes tinuma segmenta šķērsgriezumā:
a) vektoru amplitūdu vērtības uz tā virsmas, b) vektoru virzieni tā iekšienē.

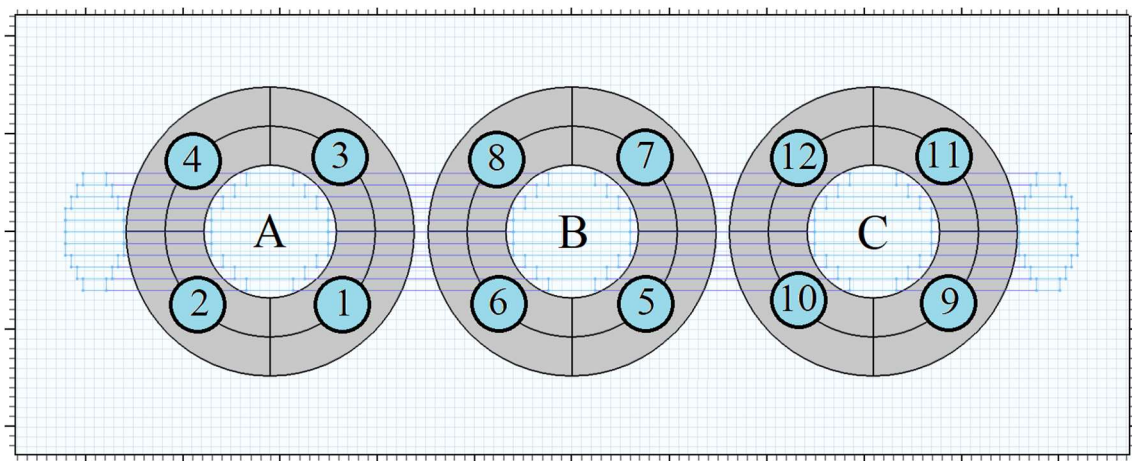
7.8. tabulā parādīti iegūtie rezultāti strāvas blīvumam transformatora tinumu fragmenta punktiem, kuru atrašanās vietas ir ilustrētas 7.7. attēlā. Punkti atrodas gan ārējā, gan iekšējā tinuma pozīcijās, lai būtu iespējams novērot strāvas blīvuma atšķirību atsevišķos tinumos. Turklāt, strāvas blīvuma rezultāti arī tiek iegūti lielākā skaitā punktu, kas ir atšķirīgs katras attiecīgās fāzes iekšējam un ārējam tinumam. Katra tinuma ietvaros šis skaits ir robežās no 123 līdz 621 rezultātu punktiem.

7.8. tabula

Strāvas blīvuma vērtības tinumos rezultātu fragments

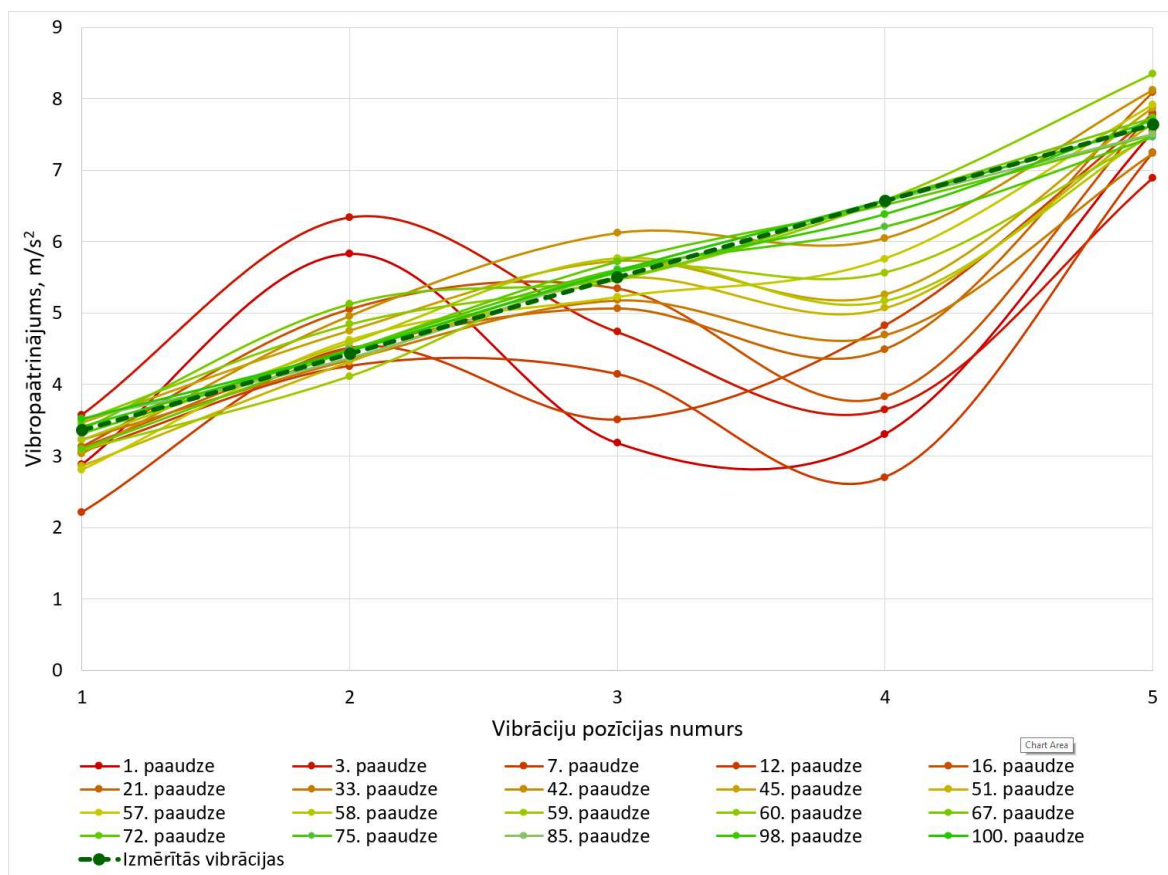
Nr.	Pozīcija x ass virzienā, mm	Pozīcija y ass virzienā, mm	Pozīcija z ass virzienā, mm	Strāvas blīvuma z ass komponente, A/m ²
1	340	0	1200	135863
2	402	0	-871	169939
3	540	0	453	147346
4	694	0	-1167	-13748
5	740	0	1200	-14540

Pēc transformatora magnētiskā lauka modeļa magnētiskās indukcijas B magnētavadā un tinumos un strāvas 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, izmantojot izteiksmi (4.1).



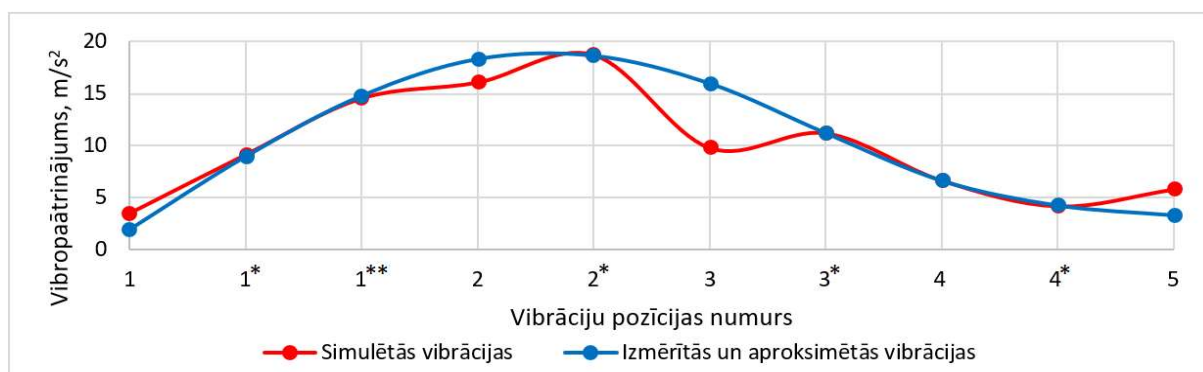
7.8. att. Transformatora tinumu segmentu numerācija.

Nākamajā solī katrā tinumu segmenta (skat. 7.8. attēlu) simulācijai tiek lietots dinamisks ģenētisks algoritms, ar kuru tiek atrasti masu un atsperu sistēmas atsperu stinguma koeficienti (skat. 5.3.2. apakšnodaļu). Katra tinumu segmenta radīto vibrāciju iegūšanai lietotā DGA evolūcijas simulācija norit atšķirīgu skaitu paaudzē, tādējādi to skaits ir mainīgs katrā simulācijas reizē to haotiskā rakstura un melnās kastes principa dēļ. Piemēram, 7.9. attēls ilustrē DGA rezultātu gadījumu ar 100 simulētām paaudzēm.

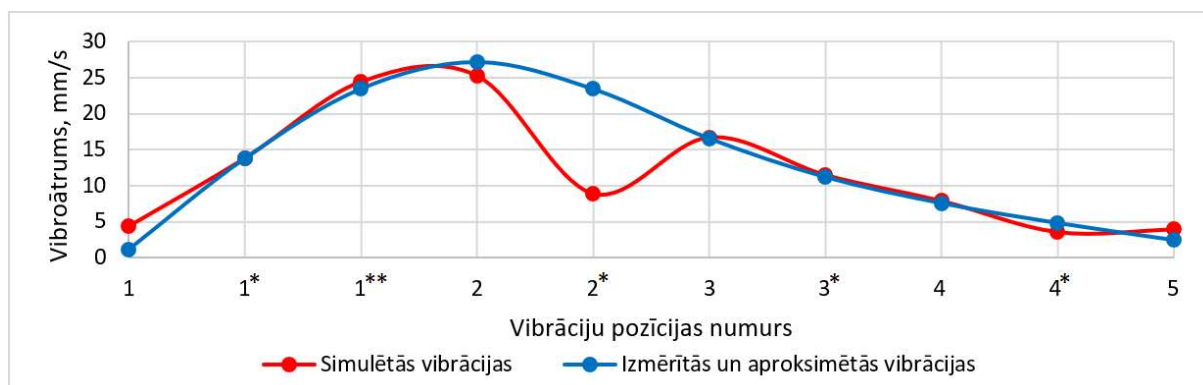


7.9. att. DGA iegūto rezultātu vizualizācija.

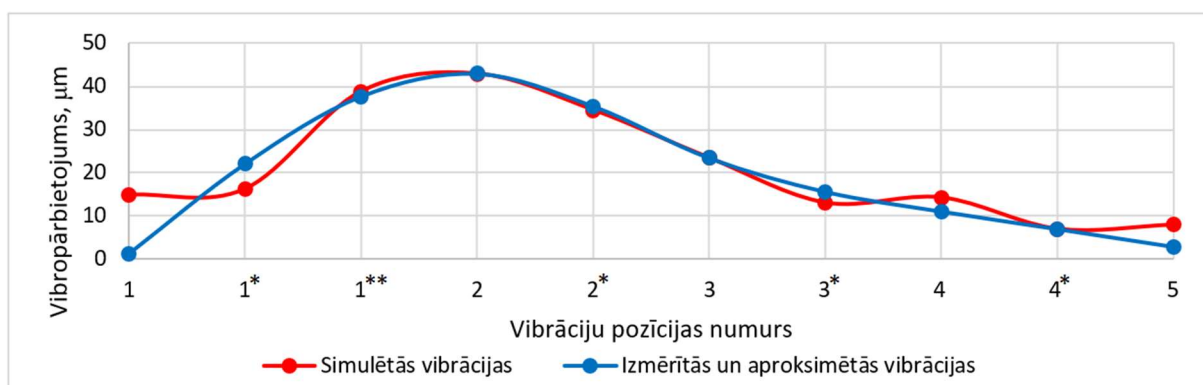
Kā redzams 7.9. attēlā, pirmajās DGA simulētajās paaudzēs iegūto vibrāciju vērtībām ir haotisks raksturs, bet tas tiecas uz izmērīto vibrāciju vērtībām, pieaugot simulēto paaudžu skaitam. Papildus jāatzīmē, ka 7.9. attēlā ilustrētās DGA paaudzes ir izvēlētas, jo tieši šajās paaudzēs ir atrastas masu un atspere sistēmas konfigurācijas, kas sniedz labāku rezultātu, salīdzinot ar attiecīgo iepriekšējo paaudzi. 7.9. attēlā neparādītajās DGA paaudzēs nav novērots uzlabojums, un to labākie indivīdi uzrāda vienādu rezultātu ar attiecīgo iepriekšējo paaudzi – šajā paaudzē nav atrasti uzlabojumi indivīdu struktūrās un evolūcijas simulācija nav notikusi.



7.10. att. Tinumu 1. segmenta vibropaātrinājuma rezultāti.



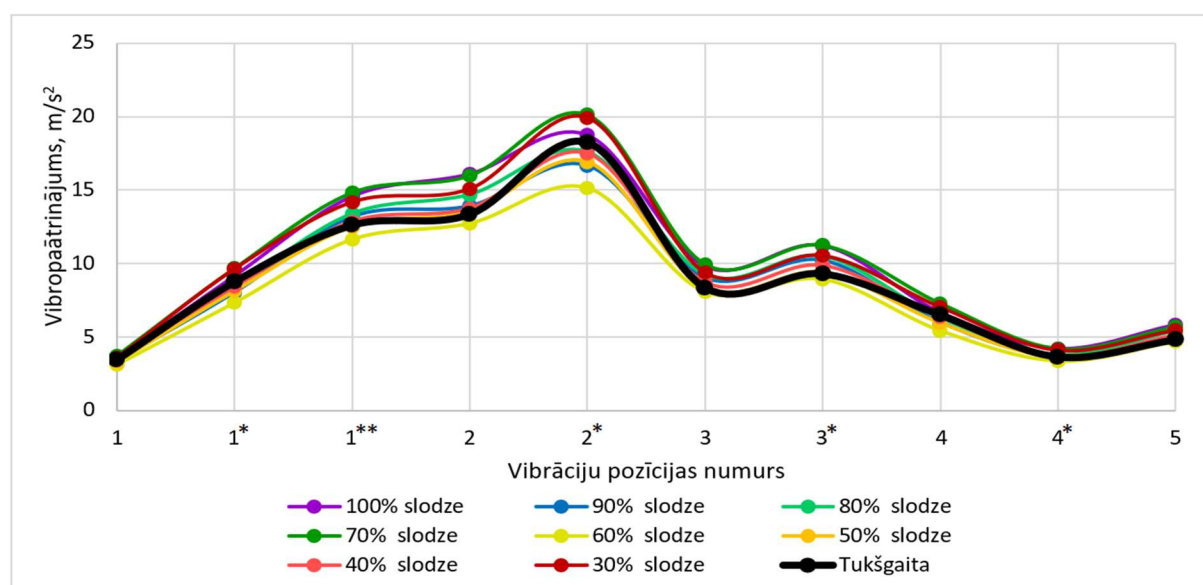
7.11. att. Tinumu 1. segmenta vibroātruma rezultāti.



7.12. att. Tinumu 1. segmenta vibropārvietojuma rezultāti.

7.10. – 7.12. attēlos ir redzami vibrāciju simulācijas rezultāti 1. segmentam, kuri ir salīdzināti ar mērījumu datiem un aproksimētām vibrāciju vērtībām starp tiem. Jāatzīmē, ka vibrāciju pozīciju numuri atbilst mērījumu rindām uz transformatora tvertnes virsmas (skat. 7.1. attēlu), bet pozīciju numuri ar * simbolu ir aproksimētas vērtības starp šīm mērījumu rindām.

Lai pārliecinātos par tinumu radīto vibrāciju simulācijas rezultātu sakritību ar mērījumu datiem un aproksimētām vērtībām starp tiem, tiek aprēķināta vidējā kvadrātiskā novirze.



7.13. att. Tinumu 1. segmenta vibroātrinājuma rezultāti ar atšķirīgām transformatora slodzes vērtībām.

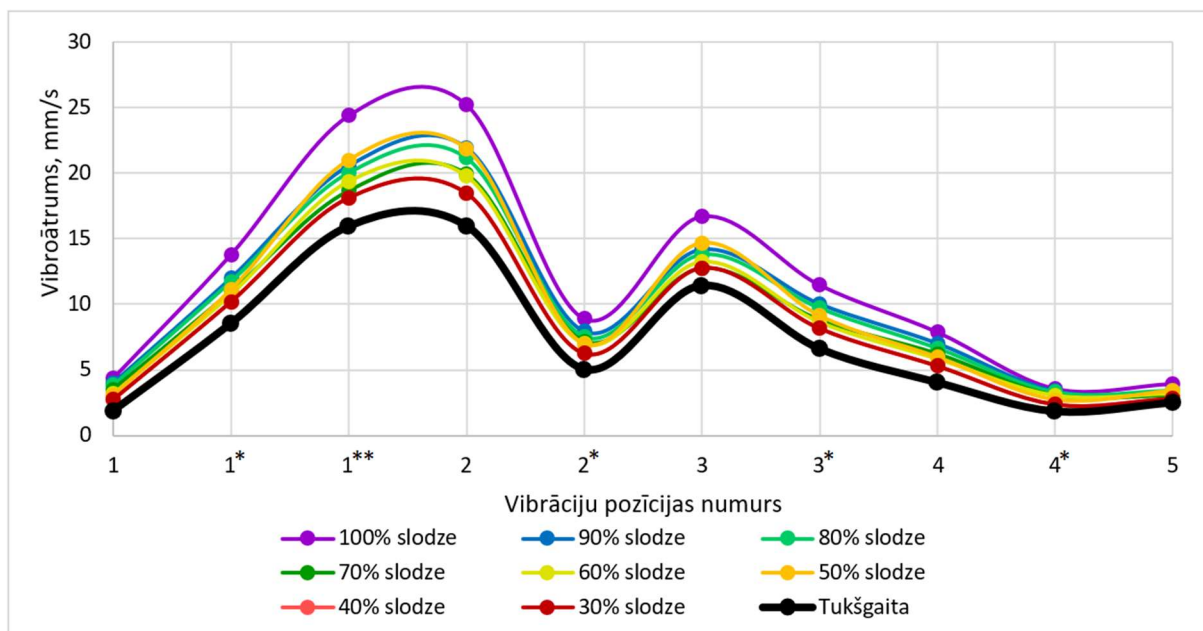
Šī attiecīgā tinumu segmenta gadījumā vibroātrinājuma simulācijas rezultātu vidējā kvadrātiskā novirze ir $2,274 \text{ m/s}^2$, vibroātruma simulācijas rezultātu – $4,814 \text{ mm/s}$ un vibropārvietojuma – $4,983 \text{ }\mu\text{m}$. Jāatzīmē, ka šie attēli parāda tikai daļu no 12 transformatora tinumu segmentu rezultātiem.

Kā 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 7.13. – 7.15. attēlos, kur ir redzams, kā mainās tinumu 1. segmenta radīto vibrāciju vibroātrinājuma, vibroātruma un vibropārvietojuma vērtības atkarībā no transformatora uzdotās slodzes simulācijā.

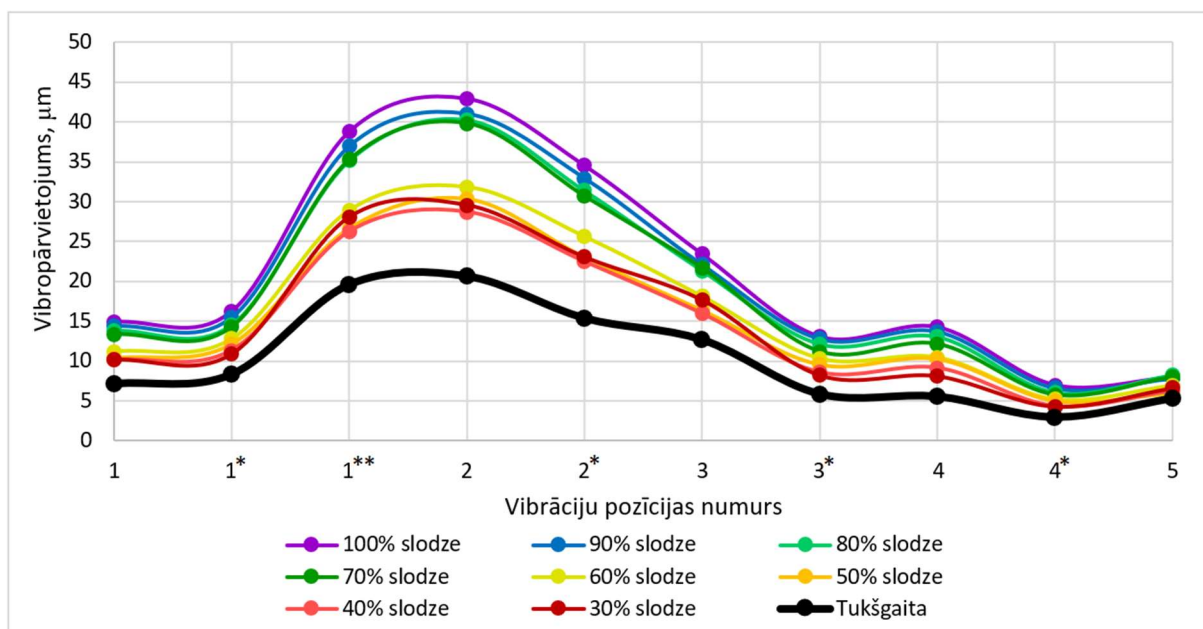
Kā redzams 7.13. – 7.15. attēlos, samazinot transformatora slodzi, tā tinumu 1. segmentā radīto vibrāciju vibroātrinājuma, vibroātruma un vibropārvietojuma vērtībām pastāv tendence, ka, samazinot slodzi, samazinās amplitūdas. Novērotie izņēmumi ir skaidrojami ar to, ka tinumu segmenta masu un atsperu sistēma var radīt rezonanses.

Lai aprēķinātu un ekstrapolētu vibrācijas, kādas tiek radītas tukšgaitas režīmā, tiek izmantota lineāra mazāko kvadrātu metode (skat. 6.2.4. apakšnodaļu). 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. Pielietotās lineārās mazāko kvadrātu metodes rezultāti 7.13. – 7.15. attēlos parādītajiem tinumu segmentiem ir redzami 7.9. tabulā. Šis slodzes samazināšanas process pēc tam tiek iteratīvi veikts visiem pārējiem transformatora tinumu segmentiem.



7.14. att. Tinumu 1. segmenta vibroātruma rezultāti ar atšķirīgām transformatora slodzes vērtībām.



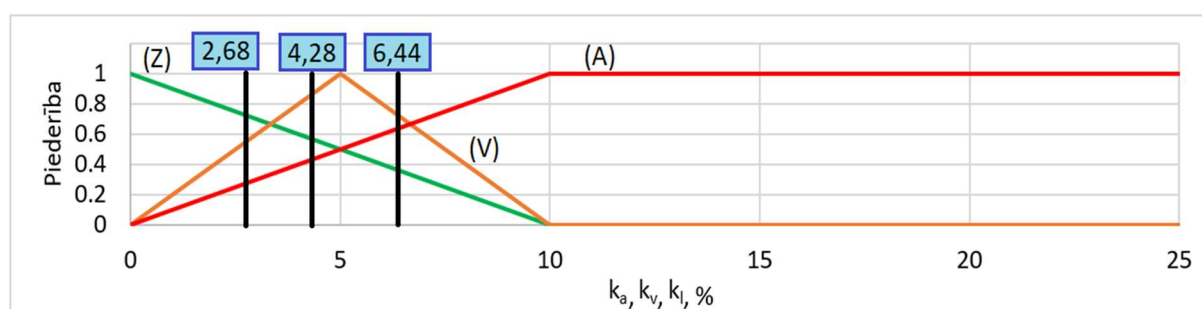
7.15. att. Tinumu 1. segmenta vibropārvietojuma rezultāti ar atšķirīgām transformatora slodzes vērtībām.

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, μm	Mērījums, μm
1	3,466	2,80	1,86	1,30	7,13	1,40
2	8,773	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	8,374	15,50	11,41	12,10	12,65	15,20
7	9,316	11,71	6,59	8,36	5,83	8,84
8	6,517	7,50	4,02	6,00	5,52	5,60
9	3,663	5,53	1,81	4,34	2,93	3,61
10	4,832	5,10	2,48	3,00	5,29	2,10

7.9. tabulā apkopotie tinumu 1. segmenta rezultāti un pārējo tinumu segmentu rezultāti darbojas kā ievades dati tinumu mehāniskā defekta noteikšanas faziloģikas blokā (skat. 6.2. attēlu). 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, kuri 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.

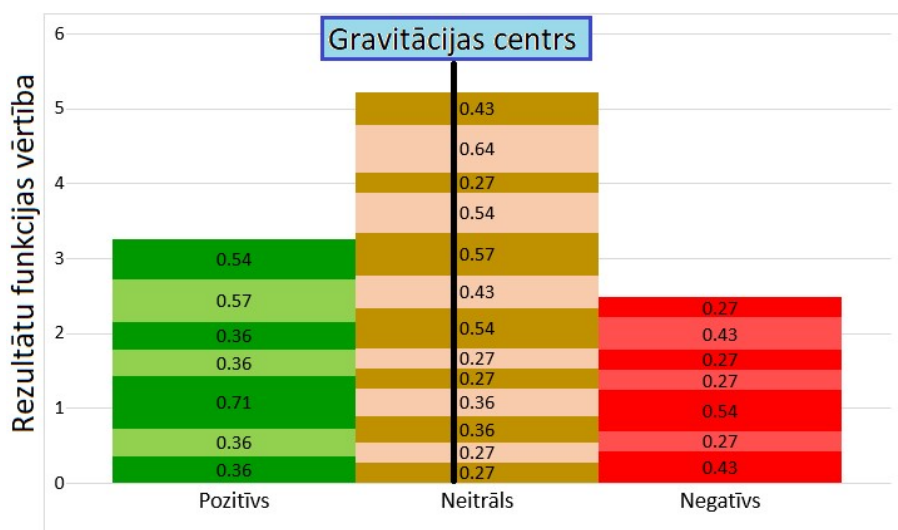
Kā piemērs tiek izvērsti apskatīts tinumu 1. segments. Šajā gadījumā tinumu mehāniskā defekta noteikšanas faziloģikas bloka attiecīgo raksturlielumu vērtības tiek aprēķinātās, izmantojot izteiksmi (6.5), iegūstot $k_a=2,68\%$; $k_v=4,28\%$ un $k_l=6,44\%$.



7.16. att. Tinumu mehāniskā defekta noteikšanas bloka piederības funkciju piemēra rezultāti.

Kā redzams 7.16. attēlā visu raksturlielumu vērtības šķērso 3 piederības funkcijas, līdz ar to, šim piemēram aktivizējas visas 27 kombinācijas 6.3. tabulā.

Šajā gadījumā ir iespējami visi trīs rezultāti, tāpēc rezultātu piederības funkcijai pastāv vairāku rezultātu ietekme, un ir nepieciešams aprēķināt tās gravitācijas centru, lai veiktu defazifikācijas procesu. Šī piemēra rezultātu funkcija ir parādīta 7.17. attēlā.



7.17. att. Tinumu mehāniskā defekta noteikšanas bloka rezultātu funkcija.

Gravitācijas centrs, kura pozīcija ir parādīta 7.17. attēlā tiek aprēķināts ar izteiksmi (6.9). 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 7.10. tabulā.

7.10. tabula

Tinumu mehāniskā defekta noteikšanas faziloģikas bloka rezultāti

Tinumu segmenta numurs	Transformatora attiecīgā fāze	Faziloģikas bloka rezultāts	Turpmākās darbības
1.–4.	A	Neitrāls	Magnētvasda vibrāciju modelēšana
5.–8.	B	Negatīvs	Magnētvasda vibrāciju modelēšana
9.–12.	C	Neitrāls	Magnētvasda 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 saskaņā ar izstrādātā vibrāciju modeļa blokshēmu (skat. 2.1. attēlu) šī transformatora magnētvasda visu fāžu stieņos ir jāveic magnetostrikcijas 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 magnētvasda konstrukcijas elementu radīto vibrāciju simulāciju un aprēķinu.

Nākamais solis ir ekvivalento magnetrostrikcijas efekta spēku aprēķins, ko veic, izmantojot izteiksmi (5.4) un jau iepriekšējos soļos aprēķinātās magnētiskās indukcijas B vērtības transformatora magnetvadā. Pēc tam tiek izveidota masu un atsperu sistēma gan katras transformatora fāzes magnētvada stienim, gan tā sānu konstrukcijas stieniem (skat. 5.2. apakšnodaļu). Šī transformatora gadījumā katras fāzes magnētvada 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.

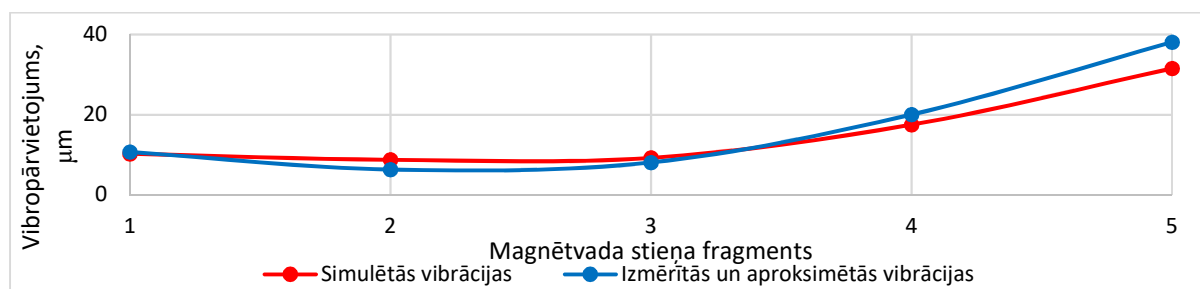
Pēc tam atkārtoti tiek lietots DGA, lai atrastu atsperu stinguma koeficientus, ar kuriem magnetrostrikcijas efekta dēļ tiktu simulētas vibrācijas, kas atbilst tukšgaitas režīma mērījumu rezultātiem un aproksimētām vibrāciju vērtībām starp tiem. Šī transformatora magnetrostrikcijas efekta radīto vibrāciju modelēšanas rezultātā iegūti magnētvada stieņu atsperu stinguma koeficienti ir parādīti 7.11. tabulā.

Koeficienti Nr.1 un Nr.2 ir attiecināmi uz katra magnētvada stieņa fragmentu (skat. 6.6. attēlu). 7.18. – 7.21. attēlos, kā piemērs, ir ilustrētas šī transformatora simulētās un mērījumos reģistrētās un aproksimētās vibropārvietojuma vērtības tā kreisā sāna stieņa un A fāzes stieņa garumos. Simulācijas iegūtās vibropārvietojuma vērtības parāda labu saderību ar vibrāciju mērījumu rezultātiem un aproksimētām vērtībām starp tām, jo vidējā kvadrātiskā novirze šī transformatora magnētvada kreisā sāna stieņa gadījumā ir 2,965 μm , bet magnētvada A fāzes stieņa gadījumā – 1,861 μm .

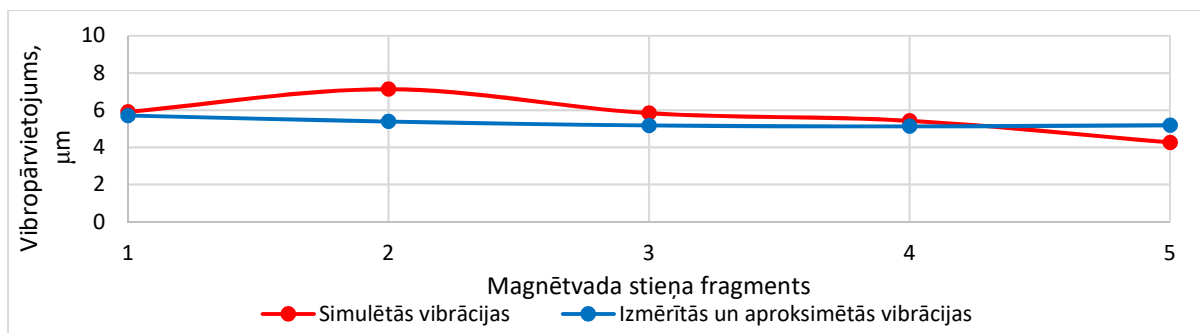
7.11. tabula

Magnētvada masu un atsperu sistēmas atsperu stinguma koeficienti katram stieņu fragmentam.

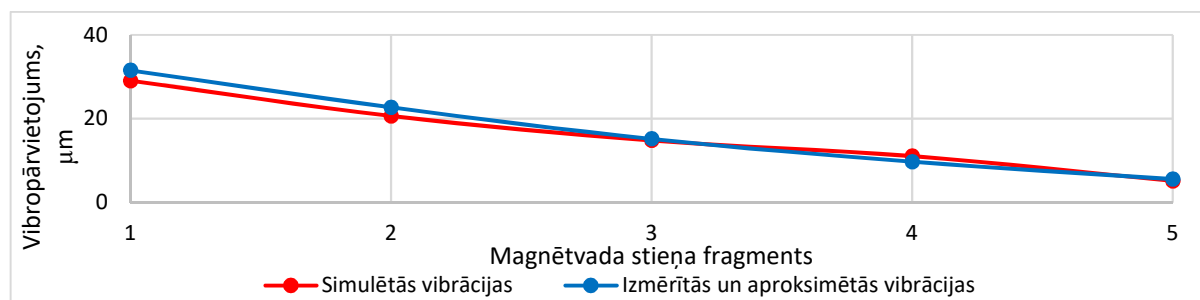
Fragmenta numurs	Magnētvada stienis									
	Kreisais sāns		A fāze		B fāze		C fāze		Labais sāns	
	Nr.1	Nr.2	Nr.1	Nr.2	Nr.1	Nr.2	Nr.1	Nr.2	Nr.1	Nr.2
1	1397727	1953954	107571	40423	34144	55496	103905	218375	1864642	1882320
2	2656253	1747141	237976	110431	455487	3613747	2652379	121007	1128675	1098338
3	1773918	784253	485456	877838	50413	3937308	207093	2911663	1113761	1613025
4	2094225	582234	411061	1825381	6225875	278250	974695	5705288	847375	1007992
5	654899	595873	189925	907139	75150	593291	4367251	3744992	1314869	1050666



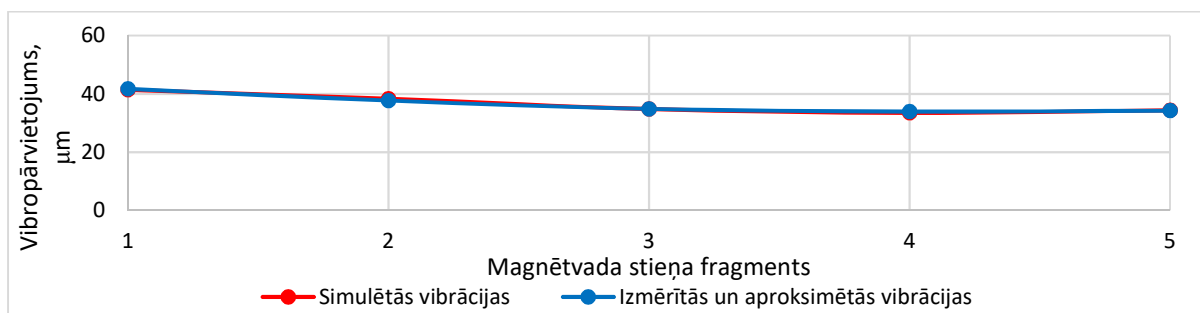
7.18. att. Magnētvada kreisā sāna stieņa vibropārvietojuma rezultāti augstākā sprieguma pusē.



7.19. att. Magnētvara kreisā sāna stieņa vibropārvietojuma rezultāti zemākā sprieguma pusē.



7.20. att. Magnētvara A fāzes stieņa vibropārvietojuma rezultāti augstākā sprieguma pusē.



7.21. att. Magnētvara A fāzes stieņa vibropārvietojuma rezultāti zemākā sprieguma pusē.

DGA izmanto melnās kastes principu, tāpēc ir nepieciešams aprēķināt proporcijas koeficienta vērtību k_r . Šī koeficienta rezultāti attiecīgajam transformatoram ir parādīti 7.12. tabulā.

Iezīmētās proporcijas koeficienta vērtības signalizē, ka šajos transformatora magnētvara stieņu 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 magnētavadā, savukārt labā sāna stienī rezultāts ir neskaidrs, jo šajā gadījumā proporcijas koeficienta k_r vērtības ir relatīvi nemainīgas, un šajā pārbaudāmā transformatora magnētvara reģionā nav tinumu, kas varētu izskaidrot vibrācijas, kuras pārsniedz uzdotās robežvērtības.

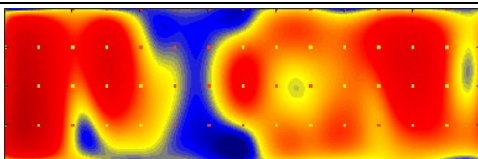
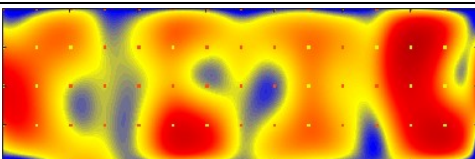
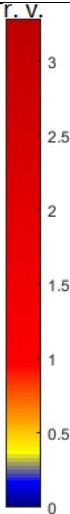
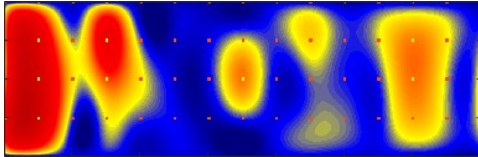
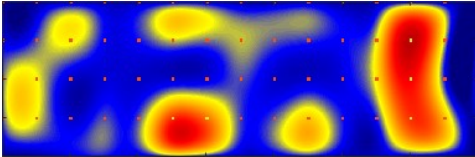
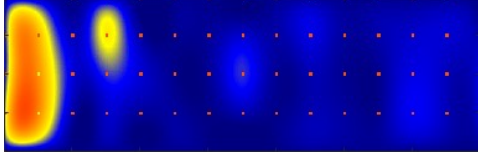
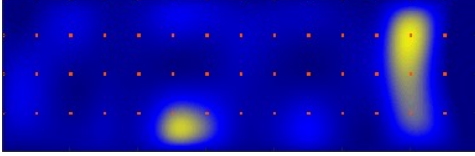
Jāatzīmē, ka labā sāna stieņa slēdziens ir iegūts, izmantojot 6.4. tabulu, jo šī magnētvara reģiona gadījumā nav iepriekšēju izstrādātā vibrāciju modeļa un tinumu simulācijas rezultātu.

Līdz ar to vienīgā 6.4. tabulas rinda, kurai atbilst šī magnētvida stieņa situācija, sniedz slēdzienu Nr.2.

7.12. tabula

Proporcijas koeficienta rezultāti pārbaudāmajam transformatoram

	Magnētvida 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	Slēdziens Nr.4	Slēdziens Nr.4	Slēdziens Nr.4	Slēdziens Nr.4	Slēdziens Nr.2

Transformatora aktīvās daļas reģions		Slēdziens	Rekomendācijas				
Kreisais sāns		Aizdomas par mehānisku defektu magnētvdādā	Veikt tukšgaitas strāvu un zudumu noteikšanu, veikt atkārtotu tvertnes virsmas vibrāciju diagnostiku tukšgaitas režīmā, sīkāk pārbaudot fāžu A, B, C un kreisā sāna stieņa reģionus. Ieteicams papildus pārbaudīt transformatora piespieddzes sistēmu, transformatora tvertnes pamatni un iespējamos ārējos vibrāciju avotus.				
A fāze		Aizdomas par mehānisku defektu magnētvdādā					
B fāze		Aizdomas par mehānisku defektu magnētvdādā					
C fāze		Aizdomas par mehānisku defektu magnētvdādā					
Labais sāns		Neskaidrs rezultāts					
Vibrāciju aproksimācijas vizualizācija 100 % slodzes režīmā							
Rakstur- lielums	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							

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

Līdz ar to, šī konkrētā transformatora gadījumā ar izstrādāto vibrāciju modeli iegūst slēdzienu, ka ir aizdomas par mehānisku defektu fāžu A, B un C magnētvasda stienos un kreisā sāna stienī un neskaidru rezultātu labā sāna magnētvasda stienī.

Iegūtais slēdziens katram transformatora aktīvās daļas reģionam ar rekomendācijām un vibrāciju ainas vizualizāciju apkopots 7.22. attēlā.

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:

- transformators Nr.1 – vibrāciju vērtības pārsniedz 80 % no uzdotām robežvērtībām A un B fāzes reģionos gan 82 % slodzes režīmā, gan tukšgaitas režīmā vairākiem vibrāciju raksturlielumiem;
- transformators Nr.2 – vibrāciju vērtības pārsniedz 80 % no uzdotām robežvērtībām A fāzes reģionā, kur vislielākās vibrāciju vērtības ir reģistrētas tukšgaitas režīmā, bet tikai vienam vibrāciju raksturlielumam;
- transformators Nr.3 – vibrāciju vērtības nepārsniedz 80 % no uzdotām robežvērtībām nevienā reģionā gan transformatoram attiecīgās slodzes, gan tukšgaitas režīmā visiem vibrāciju raksturlielumu datiem,
- transformators Nr.4 – vibrāciju vērtības nepārsniedz 80 % no uzdotām robežvērtībām nevienā reģionā gan transformatoram attiecīgās slodzes, gan tukšgaitas režīmā visiem vibrāciju raksturlielumu datiem.

Transformatora Nr.1 neiederošo vibrāciju mērījumu rezultātu bloka rezultāti ir parādīti 7.13. tabulā, un ir redzams, ka visu datu grupu gadījumos tiek iegūts rezultāts, ka dati ir ticami.

7.13. tabula

Neiederošo vibrāciju mērījumu rezultātu bloka rezultāti transformatoram Nr.1

Darbības režīms	Tvertnes sprieguma puse	Vibrāciju raksturlielums	Raksturlielums				Pozitīva rezultāta piederība	Negatīva rezultāta piederība	Rezultāts
			kvb_{\max}	kvb_{\min}	n_p	n_{kp}			
82 % slodze	AS	<i>a</i>	1,12	1,47	0	0	1	0	Pozitīvs
		<i>v</i>	1,18	2,30	0	0	1	0	Pozitīvs
		<i>l</i>	1,19	3,14	0	0	1	0	Pozitīvs
	ZS	<i>a</i>	1,18	2,34	0	0	1	0	Pozitīvs
		<i>v</i>	1,23	2,25	0	0	1	0	Pozitīvs
		<i>l</i>	1,23	2,72	0	0	1	0	Pozitīvs
tukšgaita	AS	<i>a</i>	1,98	1,3	0	0	1	0	Pozitīvs
		<i>v</i>	2,87	1,12	0	0	1,65	0	Pozitīvs
		<i>l</i>	3,19	1,03	0	0	1,70	0	Pozitīvs
	ZS	<i>a</i>	1,11	1,39	0	0	1	0	Pozitīvs
		<i>v</i>	1,17	1,38	0	0	1	0	Pozitīvs
		<i>l</i>	1,17	1,33	0	0	1	0	Pozitīvs

Izstrādātā vibrāciju modeļa vibrāciju rezultātu salīdzināšanas faziloģikas bloka transformatora Nr.1 rezultāti liecina, ka vibrāciju dati ir mainījušies starp divām pēdējām tvertnes virsmas vibrāciju diagnostikas reizēm (skat. 7.14. tabulu). Līdz ar to, tiek veikta transformatora radīto vibrāciju simulācija tā attiecīgo fāžu tinumiem.

7.14. tabula

Vibrāciju rezultātu salīdzināšanas faziloģikas bloka rezultāti transformatoram Nr.1

Darbības režīms	Tvertnes sprieguma puse	Vibrāciju raksturlielums	Raksturlielums				Statiska rezultāta piederība	Dinamiska rezultāta piederība	Rezultāts
			kvb_a	kvb_b	kvb_c	$kvb_{max,d}$			
82 % slodze	AS	a	29,06	1,41	8,39	-18,47	0	0,3551	Dinamisks
		v	23,07	0	12,16	-21,31	0,00052	0,3548	Dinamisks
		l	22,54	0	11,76	-21,59	0,0065	0,3403	Dinamisks
	ZS	a	120,2	21,46	29,85	-16,94	0	0,93	Dinamisks
		v	0	59,68	32,37	-17,19	0	0,5	Dinamisks
		l	0	89,66	32,62	-17,24	0	0,5	Dinamisks
tukšgaita	AS	a	0	27,65	0	5,73	0	0,43	Dinamisks
		v	0	0	11,96	5,2	0,1131	0,2088	Dinamisks
		l	0	2,26	13,81	4,87	0,0866	0,2772	Dinamisks
	ZS	a	0	0	0	44,51	0,125	0	Statisks
		v	0	0	0	50,02	0,125	0	Statisks
		l	0	0	0	50,23	0,125	0	Statisks

Tinumu radīto vibrāciju simulācijas rezultātu un secīgi pēc tam magnētvida radīto vibrāciju simulācijas rezultāti ļauj iegūt izstrādātā vibrāciju modeļa slēdzienus visos transformatora Nr.1 reģionos (skat. 7.15. tabulu).

7.15. tabula

Proporcijas koeficienta rezultāti transformatoram Nr.1

	Magnētvida stienis		
	A fāze	B fāze	C fāze
Proporcijas koeficients, k_r	1,78	1,44	-
	1,35	1,38	-
	1,46	1,37	-
	1,63	1,1	-
	1,71	2,35	-
Slēdziens	Slēdziens Nr.5	Slēdziens Nr.4	Slēdziens Nr.1

Transformatora Nr.1 tvertnes virsmas vibrāciju vērtības, kuras pārsniedz 80 % no uzdotām robežvērtībām ir reģistrētas divās no tā fāzēm. Šos reģionus var redzēt 7.23. attēla ilustrācijās, kuras atveido vibrāciju aproksimācijas un vizualizācijas rezultātus. Jāatzīmē, ka šajā gadījumā vizualizācija ir salīdzinoši apgrūtināta, jo sākotnējās vibrāciju vērtības ir reģistrētas tikai 6 pozīcijās katrai tvertnes sprieguma pusei malai.

Izstrādātais vibrāciju modelis sniedz rezultātus, kuros transformatora A fāzes reģionā ir aizdomas par mehānisku defektu, bet to nevar lokalizēt (skat. 7.15. tabulu un 7.23. attēlu). Tas skaidrojams ar to, ka gan tinumu, gan magnētvida 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 magnētvadā, C fāzes reģionā nav aizdomu par mehāniska defekta klātbūtni.

Transformatora aktīvās daļas reģions	Slēdziens	Rekomendācijas		
A fāze	Aizdomas par defekta klātbūtni tinumos un/vai magnētvadā, bet to nevar lokalizēt	Veikt tukšgaitas strāvu un zudumu noteikšanu, veikt atkārtotu tvertnes virsmas vibrāciju diagnostiku tukšgaitas režīmā, sīkāk pārbaudot fāžu A un B reģionus. 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, noteikt transformācijas koeficienta vērtību katrā fāzē, veikt tvertnes virsmas vibrāciju diagnostiku, samazinot transformatora jaudu vairākos intervālos, veikt Z_k pretestības mērījumus.		
B fāze	Aizdomas par mehānisku defektu magnētvadā			
C fāze	Nav aizdomu par mehānisko defektu transformatora aktīvā daļā			
Vibrāciju aproksimācijas vizualizācija 82 % slodzes režīmā				
Rakstur- lielums	Augstākā sprieguma tvertnes puse		Zemākā sprieguma tvertnes puse	Skala
	Fāzes: A			

7.23. att. Izstrādātā vibrāciju modeļa rezultāti transformatoram Nr.1.

Transformatora Nr.2 neiederošo vibrāciju mērījumu rezultātu bloka rezultāti ir parādīti 7.16. tabulā. Arī šī transformatora tvertnes virsmas diagnostikas dati tiek atzīti kā ticami, jo neiederošo vibrāciju mērījumu rezultātu faziloģikas bloka attiecīgie rezultāti ir pozitīvi visu datu grupu gadījumos. Šī izstrādātā vibrāciju modeļa faziloģikas bloka aprēķinu rezultāti ir izteikti nozīmīgi, jo transformatoram Nr.2 visaugstākās tvertnes virsmas vibrāciju vērtības ir reģistrētas tieši tā tukšgaitas režīma laikā.

7.16. tabula

Neiederošo vibrāciju mērījumu rezultātu faziloģikas bloka rezultāti transformatoram Nr.2

Darbības režīms	Tvertnes sprieguma puse	Vibrāciju raksturlielums	Raksturlielums				Pozitīva rezultāta piederība	Negatīva rezultāta piederība	Rezultāts
			kvb_{\max}	kvb_{\min}	n_p	n_{kp}			
82 % slodze	AS	a	1,94	1,08	0	0	1	0	Pozitīvs
		v	1,6	1,13	0	0	1	0	Pozitīvs
		l	1,56	1,38	0	0	1	0	Pozitīvs
	ZS	a	1,04	1,02	0	0	1	0	Pozitīvs
		v	1,14	1,06	0	0	1	0	Pozitīvs
		l	1,18	1,22	0	0	1	0	Pozitīvs
tukšgaita	AS	a	2,66	1,26	0	0	1,49	0	Pozitīvs
		v	1,89	1,24	0	0	1	0	Pozitīvs
		l	1,66	1,02	0	0	1	0	Pozitīvs
	ZS	a	1,02	1,67	0	0	1	0	Pozitīvs
		v	1,21	1,42	0	0	1	0	Pozitīvs
		l	1,25	1,31	0	0	1	0	Pozitīvs

Vibrāciju rezultātu salīdzināšanas faziloģikas bloka rezultāti transformatora Nr.2 vibrāciju datiem sniedz rezultātu, ka tie ir mainīgi starp pēdējām divām šī transformatora tvertnes virsmas vibrāciju diagnostikas reizēm (skat. 7.17. tabulu).

7.17. tabula

Vibrāciju rezultātu salīdzināšanas faziloģikas bloka rezultāti transformatoram Nr.2

Darbības režīms	Tvertnes sprieguma puse	Vibrāciju raksturlielums	Raksturlielums				Statiska rezultāta piederība	Dinamiska rezultāta piederība	Rezultāts
			kvb_a	kvb_b	kvb_c	$kvb_{\max,d}$			
82 % slodze	AS	a	44,32	21,11	8,87	-44,32	0	0,6164	Dinamisks
		v	66,04	5,55	19,71	-66,04	0	0,549	Dinamisks
		l	72,84	0	22,10	-72,84	0	0,47	Dinamisks
	ZS	a	31,49	6,38	21,22	-6,38	0	0,7968	Dinamisks
		v	18,27	2,94	45,49	2,89	0	0,891	Dinamisks
		l	18,33	0,86	54,83	2,62	0	0,8202	Dinamisks
tukšgaita	AS	a	0	8,58	23,88	35,97	0,0033	0,325	Dinamisks
		v	0	0	79,35	23,16	0	0,42	Dinamisks
		l	0	0	77,91	13,43	0	0,4175	Dinamisks
	ZS	a	0	0	28,39	-3,28	0	0,4175	Dinamisks
		v	0	1,79	108,4	-1,74	0	0,4849	Dinamisks
		l	0	5,42	183,3	-1,09	0	0,5765	Dinamisks

Transformatora Nr.2 gadījumā ar vibrāciju diagnostiku ir reģistrētas vibrācijas, kuras atšķirīgās tvertnes virsmas pozīcijās pārsniedz 80 % no uzdotām robežvērtībām. Savukārt, pozīcijas ar šīm paaugstinātām vibrāciju vērtībām ir koncentrētas transformatora tvertnes virsmas reģionā, kurš atbilst tā A fāzei. Līdz ar to, izstrādātā vibrāciju modeļa rezultāti (skat. 7.18. tabulu) sakrīt ar tvertnes virsmas sniegto informāciju.

Jāatzīmē, ka arī transformatora Nr.2 gadījumā vibrāciju diagnostika ir veikta, izmantojot tikai 6 sensoru pozīcijas uz katras sprieguma puses tvertnes malas, kas apgrūtina vibrāciju

7.18. tabula

	Magnētvasda stienis		
	A fāze	B fāze	C fāze
Proporcijas koeficients, k_r	1,31	-	-
	1,41	-	-
	1,23	-	-
	1,3	-	-
	1,4	-	-
Slēdziens	Slēdziens Nr.5	Slēdziens Nr.1	Slēdziens Nr.1

7.24. att. Izstrādātā vibrāciju modeļa rezultāti transformatoram Nr.2.

Transformatoram Nr.2 tiek iegūts slēdziens, ka A fāzes reģionā ir aizdomas par mehāniska defekta klātbūtni, bet nevar lokalizēt tā atrašanās vietu noteiktā transformatora aktīvās daļas sastāvdaļā (skat. 7.18. tabulu un 7.24. attēlu). Attiecīgā slēdziena rekomendācijas izpilde atvieglotu atkārtotu izstrādātā vibrāciju modeļa darbību, jo būtu pieejams lielāks vibrāciju mērījumu punktu skaits.

Transformatora Nr.3 un transformatora Nr.4 vibrāciju diagnostikas datu pārbaudi ar izstrādātā vibrāciju modeļa rezultāti ir redzami 7.19. un 7.20. tabulās. Tā kā šiem transformatoriem nav reģistrētas vibrāciju vērtības uz to tvertņu virsmās, kuras pārsniedz 80 % no uzdotām robežvērtībām, ir nepieciešams tikai pārliecināties, vai šie dati ir ticami.

7.19. tabula

Neiederošo vibrāciju mērījumu rezultātu faziloģikas bloka rezultāti transformatoram Nr.3

Darbības režīms	Tvertnes sprieguma puse	Vibrāciju raksturlielums	Raksturlielums				Pozitīva rezultāta piederība	Negatīva rezultāta piederība	Rezultāts
			kvb_{\max}	kvb_{\min}	n_p	n_{kp}			
84 % slodze	AS	<i>a</i>	2,22	2,14	0	0	1,16	0	Pozitīvs
		<i>v</i>	2,46	1,17	0	0	1,34	0	Pozitīvs
		<i>l</i>	2,47	1	0	0	1,35	0	Pozitīvs
	ZS	<i>a</i>	1,37	1,08	0	0	1	0	Pozitīvs
		<i>v</i>	1,34	1,22	0	0	1	0	Pozitīvs
		<i>l</i>	1,33	1,24	0	0	1	0	Pozitīvs
tukšgaita	AS	<i>a</i>	1,13	1,14	0	0	1	0	Pozitīvs
		<i>v</i>	1,18	1,15	0	0	1	0	Pozitīvs
		<i>l</i>	2,33	1,16	0	0	1,25	0	Pozitīvs
	ZS	<i>a</i>	1,15	1,61	0	0	1	0	Pozitīvs
		<i>v</i>	1,16	1,06	0	0	1	0	Pozitīvs
		<i>l</i>	1,02	1,14	0	0	1	0	Pozitīvs

Transformatora Nr.3 gadījumā faziloģikas bloks sniedz rezultātu, ka vibrāciju diagnostikas dati ir ticami, jo visu vibrāciju datu rezultāti ir pozitīvi.

7.20. tabula

Neiederošo vibrāciju mērījumu rezultātu faziloģikas bloka rezultāti transformatoram Nr.4

Darbības režīms	Tvertnes sprieguma puse	Vibrāciju raksturlielums	Raksturlielums				Pozitīva rezultāta piederība	Negatīva rezultāta piederība	Rezultāts
			kvb_{\max}	kvb_{\min}	n_p	n_{kp}			
85 % slodze	AS	<i>a</i>	3,10	2,26	0	0	1,72	0	Pozitīvs
		<i>v</i>	4,41	1,76	0	0	1,42	0,21	Pozitīvs
		<i>l</i>	5,06	1,18	0	0	1,17	0,53	Pozitīvs
	ZS	<i>a</i>	1,81	1,53	0	0	1	0	Pozitīvs
		<i>v</i>	1,81	1,74	0	0	1	0	Pozitīvs
		<i>l</i>	1,81	1,76	0	0	1	0	Pozitīvs
tukšgaita	AS	<i>a</i>	1,03	1,45	0	0	1	0	Pozitīvs
		<i>v</i>	1,09	1,05	0	0	1	0	Pozitīvs
		<i>l</i>	1,15	1,07	0	0	1	0	Pozitīvs
	ZS	<i>a</i>	1,19	1,28	0	0	1	0	Pozitīvs
		<i>v</i>	1,51	1,12	0	0	1	0	Pozitīvs
		<i>l</i>	1,41	1,06	0	0	1	0	Pozitīvs

Transformatora Nr.4 gadījumā faziloģikas bloks sniedz rezultātu, ka vibrāciju diagnostikas dati ir ticami, jo arī šī transformatora gadījumā visu vibrāciju datu rezultāti ir pozitīvi gan 85 % slodzes režīmā, gan tukšgaitas režīmā.

Transformatora aktīvās daļas reģions		Slēdziens	Rekomendācijas				
A fāze		Nav aizdomu par mehānisko defektu transformatora aktīvā daļā	Jāturpina veikt transformatora vibrāciju diagnostiku bez izmaiņām pārbaudes periodiskumā.				
B fāze		Nav aizdomu par mehānisko defektu transformatora aktīvā daļā					
C fāze		Nav aizdomu par mehānisko defektu transformatora aktīvā daļā					
Vibrāciju aproksimācijas vizualizācija 84 % slodzes režīmā							
Rakstur- lielums	Augstākā sprieguma tvertnes puse Fāzes:			Zemākā sprieguma tvertnes puse Fāzes:			Skala
	A	B	C	A	B	C	
a , relatīvās vienībās							
v , relatīvās vienībās							
l , relatīvās vienībās							

7.25. att. Izstrādātā vibrāciju modeļa rezultāti transformatoram Nr.3.

Izstrādātā vibrāciju modeļa rezultāti transformatoram Nr.3 ir parādīti 7.25. attēlā. Tā kā vibrāciju diagnostikas datu vērtības nepārsniedz 80 % no uzdotām robežvērtībām un neiederošo vibrāciju mērījumu rezultātu faziloģikas bloka rezultāti liecina, ka vibrāciju diagnostikas dati ir ticami, netiek veikta transformatora Nr.3 ne tinumu, ne magnētvara radīto vibrāciju simulācija, jo nav pamata aizdomām par mehānisko defektu nevienā tā aktīvās daļas reģiona sastāvdaļā. Līdz ar to transformatoram Nr.3 visos tā aktīvās daļas reģionos, kuriem ir veikta tvertnes virsmas vibrāciju diagnostika, tiek iegūts slēdziens, ka nav aizdomu par mehānisko defektu transformatora aktīvā daļā.

Jāatzīmē, ka gan transformatora Nr.3, gan transformatora Nr.4 vibrāciju diagnostikas mērījumu punktu daudzumi ir līdzīgi kā transformatoriem Nr.1 un Nr.2, jo ir izmantoti 6 vibrāciju datu punkti katrā tā sprieguma puses tvertnes sānā. Tāpēc ir izstrādā vibrāciju modeļa darbība un vibrāciju vizualizācija ir iespējama, bet tā ir apgrūtināta, jo šādā gadījumā vibrāciju aproksimācija starp 2 punktiem tvertnes vertikālā virzienā ir lineāra.

Transformatora aktīvās daļas reģions		Slēdziens	Rekomendācijas				
A fāze	Nav aizdomu par mehānisko defektu transformatora aktīvā daļā		Jāturpina veikt transformatora vibrāciju diagnostiku bez izmaiņām pārbaudes periodiskumā.				
B fāze	Nav aizdomu par mehānisko defektu transformatora aktīvā daļā						
C fāze	Nav aizdomu par mehānisko defektu transformatora aktīvā daļā						
Vibrāciju aproksimācijas vizualizācija 85 % slodzes režīmā							
Rakstur- lielums	Augstākā sprieguma tvertnes puse			Zemākā sprieguma tvertnes puse			Skala
	Fāzes: A B C			Fāzes: A B C			
a , relatīvās vienībās							
v , relatīvās vienībās							
l , relatīvās vienībās							

7.26. att. Izstrādātā vibrāciju modeļa rezultāti transformatoram Nr.4.

Izstrādātā vibrāciju modeļa rezultāti transformatoram Nr.4 visos tā aktīvās daļas reģionos norāda, ka nav aizdomu par mehānisko defektu transformatora aktīvā daļā (skat. 7.26. attēlu), jo vibrāciju diagnostikas rezultāti ir ticami un to vērtības nevienā pozīcijā 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 vibropārviotojuma 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 secināts, 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 vibropārviotojumam – $5 \text{ }\mu\text{m}$, savukārt magnētvasda simulēto vibrāciju lielākā kvadrātiskā novirze vibropārviotojumam – $3 \text{ }\mu\text{m}$ 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 $k_a = 2,7 \text{ }\%$; $k_v = 4,3 \text{ }\%$

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 magnētvadā.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- 1) Aksenov, Y. P., Yaroshenko, I.V., Andreev, A. V., Noe, G. On-line Transformer Diagnostic Methods Synergy Based on Discharge and Vibration Events Measurements and Location. **In:** *8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives, Italy, Bologna, September 5-8, 2011*. IEEE, 2011, pp. 437-443, ISBN 978-1-4244-9303-6. Available from: doi:10.1109/DEMPED.2011.6063660.
- 2) 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.
- 3) Anglhuber, M., Kruger, M. Dielectric analysis of high-voltage power transformers. *Transformers Magazine*. 2016, vol.3, no.1, pp.24-31. ISSN 1849-3319.
- 4) Asano, S., Fujieda, S., Hashi, S., Ishiyama, K., et al. Magnetic Domain Structure and Magnetostriction of Fe-Ga Single Crystal Grown by the Czochralski Method. *IEEE Magnetics Letters*. 2016, vol.8, no.1, pp.1-4. ISSN 1949-307X. Available from: doi:10.1109/LMAG.2016.2619332.
- 5) Baggini, A. *Power Transformers – Introduction to measurement of losses* [online]. INTAS [viewed 8 October 2019]. Available from: http://www.intas-testing.eu/storage/app/media/INTAS_trasformers_descr.pdf.
- 6) Bagheri, S., Moravej, Z., Gharehpetian, G. B. Effect of transformer winding mechanical defects, internal and external electrical faults and inrush currents on performance of differential protection. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2018, vol.11, no.10, pp.2508-2520. ISSN 1751-8687. Available from: doi:10.1049/iet-gtd.2016.1239.
- 7) Beckley, P. *Electrical Steels for Rotating Machines*. IET, 2002. 315 p. ISBN 978-0-8529-6980-9.
- 8) Beeteson, J. S. *Vizimag 3.15 tutorial* [online]. StudyLib [viewed 9 October 2019]. Available from: <https://studylib.net/doc/8299005/vizimag-3.15-tutorial>
- 9) Beltle, M., Tenbohlen, S. Investigations on vibrations of power transformers. **In:** *Proceedings of XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Institute of Power Transmission and High Voltage Technology, August 22-26, 2011, Germany, Hannover*. Berlin: VDE-Verl., 2011, pp 1-6. ISBN 9783800733644.
- 10) Bertagnolli, G. *The ABB approach to short-circuit of power transformers*. ABB, 2007. 227 p.
- 11) Bodenhofer, U. *Genetic Algorithms: Theory and Applications*. 3rd edition. Leonding: Ulrich Bodenhofer, 2003. 126 p.
- 12) Bolhuis, J. P., Gulski, E., Smit, J. J. Monitoring and Diagnostic of Transformer Solid Insulation. *IEEE Electrical IEEE Transactions on Power Delivery*. 2002, vol.17, no.2, pp.528-536. ISSN 0885-8977. Available from: doi:10.1109/61.997930.
- 13) Buerschaper, B., Kleboth-Lugova, O., Leibfried, T. The electrical strength of transformer oil in a transformer board-oil system during moisture non-equilibrium. **In:**

- 2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, USA, Albuquerque, October 19-22, 2003. IEEE, 2004, pp. 269-272, ISBN 0-7803-7910-1.
- 14) Carrander, Claes. *Magnetizing Currents in Power Transformers – Measurements, Simulations, and Diagnostic Methods*. Promocijas darbs. Stockholm: KTH Electrical Engineering, 2017, 199 lpp.
 - 15) 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.
 - 16) Cheim, L., Platss, D., Prevost, T., Xu, S. Furan Analysis for Liquid Power Transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2012, vol.28, no.2, pp.8-21. ISSN 0883-7554. Available from: doi:10.1109/MEI.2012.6159177.
 - 17) Chen, G., Pham, T. T. *Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems*. Boca Raton: CRC Press, 2001. 328 p. ISBN 0-8493-1658-8.
 - 18) Cheng, D. K. *Field and Wave Electromagnetics*. 2nd edition. Boston: Addison-Wesley, 1989. 720 p. ISBN 978-0201128192.
 - 19) 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.
 - 20) Chow, C. K., Tsui, H. T., Lee, T. Surface registration using a dynamic genetic algorithm. *Pattern Recognition*. 2004, vol.37, no.1, pp.105-117. ISSN 0031-3203. Available from: doi:10.1016/S0031-3203(03)00222-X.
 - 21) COMSOL Multiphysics User's Guide [online]. Burlington: COMSOL [viewed 9 October 2019]. Available from: https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf
 - 22) Dirba, J., Ketners, K. *Elektriskās mašīnas*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2009. 534 lpp. ISBN 9789984325569.
 - 23) Duan, X., Zhao, T., Lui, J., Zhang, L., et al. Analysis of Winding Vibration Characteristics of Power Transformers Based on the Finite-Element Method. *Energies*. 2018, vol.11, no.9, pp.1-19. e-ISSN 1996-1073. Available from: doi:10.3390/en11092404.
 - 24) Duval, M. A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2002, vol.18, no.3, pp.8-17. ISSN 0883-7554. Available from: doi:10.1109/MEI.2002.1014963.
 - 25) Fleisch, D. *A Student's Guide to Maxwell's Equations*. 2nd edition. Cambridge: Cambridge university press, 2008. 134 p. ISBN 978-0-511-39308-2.
 - 26) Giet, M., Kasper, K., De Doncker, R. W., Hameyer, K. Material parameters for the structural dynamic simulation of electrical machines. **In:** *2012 XXth International*

- Conference on Electrical Machines, France, Marseille, September 2-5, 2012*. IEEE, 2012, pp. 2994-3000, ISBN 978-1-4673-0142-8. Available from: doi:10.1109/ICEIMach.2012.6350314.
- 27) Girgis, R. S., Bernesjo, M., Anger, J. Comprehensive Analysis of Load Noise of Power Transformers. **In:** *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Canada, Calgary, July 26-30, 2009*. IEEE, 2009, pp. 1-7, ISBN 978-1-4244-4241-6. Available from: doi:10.1109/PES.2009.5275883.
 - 28) Goldberg, D. E. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. 1st edition. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989. 432 p. ISBN 978-0-2011-5767-3.
 - 29) Goold, J., Benham, C. E., Kerr, R., Willberforce, L. R. *Harmonic Vibrations and Vibration Figures*. Bolton: Newton & Co, 1909. 215 p. ASIN B003WUJVJG Available from: doi:10.1038/082096a0.
 - 30) Greenshields, C. J. *OpenFOAM User Guide version* [online]. SourceForge [viewed 9 October 2019]. Available from: <http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/OpenFOAMUserGuide-A4.pdf>
 - 31) Hamming R. W. *Numerical methods for scientists and engineers*. 2nd Edition. New York: Dover Publications, 1987, 752 p. ASIN 0486652416.
 - 32) Hanung, N. S., Suwarno, Nanang, H., Yoshinobu, M. Degree of Polymerization Estimations of Insulation Papers in Power Transformers Based on Load and Temperature Histories in Java-Bali of Indonesia National Electric Company. **In:** *2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Indonesia, Bali, January 24, 2012*. IEEE, 2012, pp. 637-642, ISBN 978-1-4673-1020-8.
 - 33) Houston Knott, D. G., *Interpolating Cubic Splines*. 1st edition. Boston: Birkhäuser Boston, 1999, 240 p. ISBN 0817641009.
 - 34) 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.
 - 35) 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.
 - 36) IEEE Standard 389-1990. *IEEE Recommended Practice for Testing Electronic Transformers and Inductors*. May 1990. 63 p.
 - 37) IEEE Standard C57.104-2019. *IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers*. February 2019. 39 p.
 - 38) *Introducing Solidworks* [online]. Vélizy-Villacoublay: MySolidWorks, 2016 [viewed 9 October 2019]. Available from: https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS_Introduction_EN.pdf
 - 39) Islam, S. M. Detection of Shorted Turns and Winding Movements in Large Power Transformers using Frequency Response Analysis. **In:** *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Singapore, Singapore, January 23-27, 2000*. IEEE, 2000, pp. 2233-2238, ISBN 0-7803-5935-6. Available from: doi:10.1109/PESW.2000.847703.

- 40) Jang, P., Choi, G. Acoustic Noise Characteristics and Magnetostriction of Fe-Si Powder Cores. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012, vol.48, no.4, pp.1549-1552. ISSN 0018-9464. Available from: doi:10.1109/TMAG.2011.2173563.
- 41) Ji, T. Y., Tang, W. H., Wu, Q. H. Frequency Response Analysis of Power Transformer Winding Deformation Based on a Hybrid Model. **In:** *2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference, China, Wuhan, September 8-9, 2011*. IEEE, 2011, pp. 144-147, ISBN 978-1-4244-9690-7. Available from: doi:10.1109/PEAM.2011.6135034.
- 42) 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: Australian Acoustical Society, 2012, pp. 1-7, ISBN 9780646590394.
- 43) 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.
- 44) Kajaan, N. A., Daut, I., Mohyin, R. Measurement of Overall Power Loss and Flux Leakage in M4 Grain-Oriented Silicon Iron Assembled with 45o T-Joint of Three Phase Transformer Core. **In:** *2010 4th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), Malaysia, Shah Alam, June 23-24, 2010*. IEEE, 2010, pp. 122-125, ISBN 978-1-4244-7128-7. Available from: doi:10.1109/PEOCO.2010.5559200.
- 45) Kohnke, P. *ANSYS Theory Reference* [online]. Newark: University of Delaware [viewed 9 October 2019]. Available from: <http://research.me.udel.edu/~lwang/teaching/MEx81/ansys56manual.pdf>
- 46) Kung, P. The Danger of Vibration in Power transformers. *Transformers Magazine*. 2000, vol.4, no.3, pp.90-96. ISSN 1849-3319.
- 47) Kweon, D., Kim, Y. Interpretation of turn-to-turn insulation fault by dissolved gas analysis. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2018, vol.25, no.4, pp.1560-1566. ISSN 1070-9878. Available from: doi:10.1109/TDEI.2018.007477.
- 48) LEK 118. Transformatoru eļļu pārbaudes normas. Latvijas energostandarts. Otrās izdevums, 2017. 47 lpp.
- 49) Levron, Y. *Magnetic field simulator* [online]. Kista: Mathworks [viewed 9 October 2019]. Available from: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/48990-magnetic-field-simulator>
- 50) 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.

- 51) 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.
- 52) 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.
- 53) 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.
- 54) Martin, D., Saha, T., Dee, R., Buckley, G., et al. Determining Water in Transformer Paper Insulation: Analyzing Aging Transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2015, vol.31, no.5, pp.23-32. ISSN 0883-7554. Available from: doi:10.1109/MEI.2015.7214442.
- 55) *MaxFEM introduction* [online]. Santiago: Universidade de Santiago de Compostela [viewed 9 October 2019]. Available from: <http://www.usc.es/gl/proyectos/maxfem/help/Introduction.html>
- 56) Meeker, D. *Finite Element Method Magnetics* [online]. Boston: Finite Element Method Magnetics [viewed 9 October 2019]. Available from: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>
- 57) 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.
- 58) Mitchell, M. *An Introduction to Genetic Algorithms*. 1st edition. London: A Bradford Book The MIT Press, 1999. 162 p. ISBN 0-262-13316-4.
- 59) Murugan, R., Ramasamy, R. Understanding the power transformer component failures for health index-based maintenance planning in electric utilities. *Engineering Failure Analysis*. 2019, vol.96, pp.274-288. ISSN 1350-6307. Available from: doi:10.1016/j.engfailanal.2018.10.011.
- 60) Nezhivenko, S., Bagheri, M., Phung, T. Three-dimensional Vibration Analysis of Singlephase Transformer Winding Under Inter-disc Fault. **In:** *2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Japan, Toyohashi, September 512-515, 2017*. IEEE, 2017, pp. 1-7, e-ISBN 978-4-88686-099-6. Available from: doi:10.23919/ISEIM.2017.8166539.
- 61) Nicholson, W. K. *Linear Algebra With Applications*. 6th edition. New York: McGraw Hill Higher Education, 2009. 544 p. ISBN 978-0070985100.
- 62) Nicoara, T., Marinescu, A., Patru, I. Partial Discharge Diagnostics in Power and Instrument Transformer Based on Acoustic Emission Method. **In:** *2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Romania, Craiova,*

- October 6-8, 2016. IEEE, 2016, pp. 1-6, ISBN 978-1-4673-8562-6. Available from: doi:10.1109/ICATE.2016.7754675.
- 63) *Opera 3D user guide* [online]. Osaka: Research Center for Nuclear Physics, 2004 [viewed 9 October 2019]. Available from: <http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~sakemi/OPERA/user-3d.pdf>
 - 64) Pamuk, N. Statistical Analysis of Electrical and Mechanical Breakdown Stress for Insulation Performance in High Voltage Power Transformer. *Technical gazette*. 2014, vol.21, no.3, pp.495-503. ISSN 1330-3651. Available from: doi:10.17559/TV.
 - 65) Pasculescu, D., Romanescu, A., Pasculescu, V., Dobra, R. Short-Circuit Resistance Capacity of a 250MVA High-Power Transformer. **In:** *Recent Advances in Electrical Engineering, Spain, Valencia, August 6-8, 2013*. WSEAS, 2013, pp. 167-171, ISBN 978-960-474-318-6.
 - 66) Phadyngthin, R., Chaidee, E., Haema, J., Suwanasri, T. Analysis of insulating oil to evaluate the condition of power transformer. **In:** *ECTI-CON2010: The 2010 ECTI International Confernce on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, May 19-21, 2010, Thailand, Chiang Mai*. IEEE, 2010, pp 1-4. ISBN 978-1-4244-5607-9.
 - 67) Pryor, R. W. *Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach*. 1st edition. Massachusetts: Jones & Bartlett Learning, 2009. 852 p. ISBN 9780763779993.
 - 68) Qina, G. Research on Spectrum Eigenvalues of Transformer Vibration and its Application on diagnosis. **In:** *2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, China, Harbin, August 7-10, 2016*. IEEE, 2016, pp. 366-370, e-ISBN 978-1-5090-2396-7. Available from: doi:10.1109/ICMA.2016.7558590.
 - 69) *QuickField Finite Element Analysis System* [online]. Madrid: CAEsoft, 2018 [viewed 9 October 2019]. Available from: http://www.cae soft.es/productos/quickfield/Descargas/Manual%20del%20usuario%20v5_9.pdf
 - 70) Raback, P., Malinen, M., Ruokolainen, J., Pursula, A., et al. *Elmer Models Manual* [online]. Espoo: CSC – IT Center for Science [viewed 9 October 2019]. Available from: <http://www.nic.funet.fi/index/elmer/doc/ElmerModelsManual.pdf>
 - 71) Rao, S. S. *Mechanical vibrations*. 5th edition. Upper Saddle River: Pearson Education, 2011. 1084 p. ISBN 978-0-13-212819-3.
 - 72) Ross, T. J. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. 3rd edition. Albuquerque: John Wiley and Sons, Ltd., 2010. 607 p. ISBN 78-0-470-74376-8.
 - 73) Rouse, T. O. Mineral insulating oil in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2018, vol.14, no.3, pp.6-16. ISSN: 0883-7554. Available from: doi:10.1109/57.675572.
 - 74) 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.

- 75) 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 0033-2097.
- 76) Shengchang, J., Yongfen, L., Yanming, L. Research on Extraction Technique of Transformer Core Fundamental Frequency Vibration Based on OLCM. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2006, vol.21, no.4, pp.1981-1988. ISSN 0885-8977. Available from: doi:10.1109/TPWRD.2006.876665.
- 77) 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.
- 78) Shilyashki, G., Pfützner, H., Hamberger, P., Aigner, M., et al. The Impact of Off-Plane Flux on Losses and Magnetostriction of Transformer Core Steel. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014, vol.50, no.11, pp.1-4. ISSN 0018-9464. Available from: doi:10.1109/TMAG.2014.2324017.
- 79) Shkolnik, A. The measurement of normalisation of dielectric dissipation factor for diagnostics of transformer insulation. *Transformers Magazine*. 2015, vol.2, no.4, pp.60-65. ISSN 1849-3319.
- 80) Sivanandam, S. N., Deepa, S. N. *Introduction to Genetic Algorithms*. New York: Springer, 2008. 453 p. ISBN 978-3-540-73189-4.
- 81) So, E., Arseneau, R., Hanique, E. No-Load Loss Measurements of Power Transformers Under Distorted Supply Voltage Waveform Conditions *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2003, vol.52, no.2, pp.429-432. ISSN 0018-9456. Available from: doi:10.1109/TIM.2003.809910.
- 82) Sokolov, V., Lpaworth, J., Harley, J., Guuinic, P., et al. *Life Management Techniques for Power Transformers*. CIGRE, 2003. 133 p.
- 83) Sun, H., Huang, Y., Huang, C. A Review of Dissolved Gas Analysis in Power Transformers. *Energy Procedia*. 2012, vol.14, no.1, pp.1220-1225. ISSN 1876-6102. Available from: doi:10.1016/j.egypro.2011.12.1079.
- 84) 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.
- 85) Sweetser, C., McGrail, T. *Sweep Frequency Response Analysis Transformer Applications*. Watertown: Boble Engineering Company, 2003. 47 p.
- 86) Tatizawa, H., Burani, G. F. Analysis and Location of partial Discharges in Power Transformers by means of Electrical Methods. **In:** *16th International Conference and*

- Exhibition on Electricity Distribution, Netherlands, Amsterdam, June 18-21, 2001*. IET, 2001, pp. 1-4, ISBN 0-85296-735-7. Available from: doi:10.1049/cp:20010719.
- 87) Tee, S. J., Lui, Q., Wang, Z. D., Wilson, G., et al. Challenges in oil test database analysis for ageing assessment of in-service transformers. **In:** *2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), United Kingdom, Stoke on Trent, September 1-4, 2015*. IEEE, 2015, pp. 1-5, ISBN 978-1-4673-9682-0. Available from: doi:10.1109/UPEC.2015.7339925.
- 88) 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.
- 89) Thro, E., McNeil, F. M. *Fuzzy Logic a Practical Approach*. 1st edition. Cambridge: Academic Press, 1994. 312 p. ISBN 9781483266220.
- 90) Utami, N. Y., Tamsir, Y., Pharmatrisanti, A., Gumilang, H., et al. Evaluation condition of transformer based on infrared thermography results. **In:** *2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, China, Harbin, July 19-23, 2009*. IEEE, 2009, pp. 1055-1058, ISBN 978-1-4244-4367-3. Available from: doi:10.1109/ICPADM.2009.5252449.
- 91) *Vesta – System for Fast Estimation of the Transformer Winding and Coil Clamping Force* [online]. Perm: Dimruns [viewed 9 October 2019]. Available from: https://dimrus.com/vesta_e.html
- 92) Vitolina, S., Jakovleva, J. Classification of power transformers' faults in Latvian electrical transmission network. **In:** *52nd Annual International Scientific Conference of Riga Technical University, Latvia, Riga*. 2011, 1.-4. pp.
- 93) Vītoliņa, Sandra. *Latvijas energosistēmas lieljaudas transformatoru diagnostikas uzlabošana ar gāzu hromatogrāfijas analīzes metodi*. Promocijas darbs. Rīga: RTU, 2007. 157 lpp.
- 94) Weiser, B., Pfitzner, H., Anger, J. Relevance of Magnetostriction and Forces for the Generation of Audible Noise of Transformer Cores. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2000, vol.36, no.5, pp.3759-3777. ISSN 0018-9464. Available from: doi:10.1109/20.908346.
- 95) Winders, J. J. *Power Transformers: Principles and Applications*. Basel: Marcel Dekker, 2002. 283 p. ISBN 0-8247-0766-4.
- 96) Yong-ming, X., Rong, G., Hong-da, Z. Calculation of electrodynamic force with winding short-circuit in power transformers. *Electric Machines & Control*. 2014, vol.18, no.5, pp.36-42. ISSN 1007-449X.
- 97) 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.
- 98) 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 Magnetism*. 2019, vol.55, no.2, pp.1-5. ISSN 0018-9464. Available from: doi:10.1109/TMAG.2018.2875017.
- 99) Zhang, Y., Wang, Y., Zhang, D., Ren, Z., et al. Research on Magnetostriction Property of Silicon Steel Sheets. *International Journal of Energy and Power Engineering*. 2016, vol.5, no.1, pp.65-74. e-ISSN 2326-960X. Available from: doi:10.11648/j.ijepe.s.2016050101.20.
- 100) 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.
- 101) Zviedris, A. *Datorrealizācijas matemātiskās metodes: Lekciju konspekts*. Rīga: Rīgas Tehniskā universitāte, 2001. 73 lpp.
- 102) ГОСТ Standard 21427.0-75. *Сталь электротехническая тонколистовая. Классификация и марки*. 1975.
- 103) Методические указания по оценке состояния и продлению срока службы силовых трансформаторов. РД ЭО 0410-02, концерн «РОСЭНЕРГОАТОМ», 2002.