

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

**Andrejs SPUNĪTIS**

**NEIRONU TĪKLA METODES IZSTRĀDE  
LĒMUMU PIENĒMŠANAI ULTRASKAŅAS  
DEFEKOSKOPIJĀ**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Rīga 2010

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Dzelzceļa transporta institūts

**Andrejs SPUNĪTIS**

Doktora studiju programmas

"Dzelzceļa elektroiekārtu datorvadības sistēmas" doktorants

**NEIRONU TĪKLA METODES IZSTRĀDE  
LĒMUMU PIENĒMŠANAI ULTRASKAŅAS  
DEFEKTOSKOPIJĀ**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
Asoc.prof., Dr. sc. ing.  
L.SERGEJEVA

Rīga 2010

UDK 629.4.027.5+620.179.16](043.2)  
Sp 965 n

Spunītis A. Neironu tīkla metodes izstrāde lēmumu  
pieņemšanai ultraskaņas defektoskopijā. Promocijas darba  
kopsavilkums.-R.:RTU, 2010.-31 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Mašīnzinātnes nozares  
promocijas padomes "RTU P-15" 2010.gada  
1.marta lēmumu, protokols Nr.1

ISBN 978-9984-49-030-4

## **PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2010.g. 17. jūnijā plkst. 16:00 Rīgas Tehniskās universitātes Transporta un mašīnzinību fakultātes telpās Rīgā, Ezermalas ielā 6k, 515. auditorijā.

### **OFICIĀLIE RECENZENTI**

Dr.sc.ing., profesors Edvīns Karnītis,  
Latvijas universitātes datorikas fakultātes vadošais pētnieks

Dr.hab.sc.ing., profesors Valerijs Kožarinovs,  
SIA "TUV – Nord Baltic" Nesagraujošās kontroles laboratorijas vadītājs

Dr.sc.ing., Vladimirs Glotovs,  
VAS "Latvijas dzelzceļš" tehniskās vadības direkcijas defektoskopijas laboratorijas vadītājs

### **APSTIPRINĀJUMS**

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

Andrejs Spunītis .....(Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts krievu valodā, satur ievadu, 7 nodaļas, slēdzienu, literatūras sarakstu, 6 pielikumus, 49 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 183 lappuses. Literatūras sarakstā ir 64 nosaukumi.

## DARBA VISPĀRĒJAIS APRAKSTS

**Pētījuma aktualitāte.** Baltijas reģiona dzelzceļa maršrutu konkurētspēju paaugstināšana Eirāzijas transporta sistēmas ietvaros ir transporta-loģistikas kompleksa attīstības galvenā problēma Austrumu-Rietumu starptautiskā transporta koridorā. Šīs problēmas risinājums nav iespējams bez tehniskās drošības nodrošināšanas ar mērķi novērst situācijas, kas noved pie avārijām ar lieliem materiāliem zaudējumiem, pie ekoloģiskām un tehnogēnām katastrofām. Dzelzceļa pārvadājumu tehniskās drošības un apkārtējās vides ekoloģiskās drošības nodrošināšanas nozīmīgs līdzeklis ir tehnisko līdzekļu profilaktiskā diagnostika ar negraujošās kontroles metodēm.

Negraujošā kontrole ir svarīgākā, bet rindā gadījumu vienīgā iespējamā tehnoloģiskā operācija, kura atļauj ekspluatācijas procesā atklāt nepieļaujamus defektus un tādējādi novērst ārkārtas situācijas rašanos. Plašais negraujošās kontroles veidu spektrs atļauj veikt atbildīgas nozīmes objektu simtprocentīgu profilaktisko kontroli bez to sagraušanas un ekspluatācijas raksturlielumu izmaiņšanas. Kontroles rezultāti atļauj pieņemt pamatotus lēmumus par ritošās vienības turpmākās ekspluatācijas pieļaujamību. Apstākļos, kad starptautiskā transporta koridora Austrumu-Rietumu ietvaros pa Latvijas dzelzceļiem pastāvīgi pieaug tranzīta pārvadājumu apjomi, sastāvu svars un kustības ātrumi, paaugstinās prasības par sliežu ritošā sastāva drošumu. Ievērojot augstākminētos apstākļus, kā arī sarežģītos klimatiskos apstākļus uz dzelzceļiem, atbildīgas nozīmes ritošā sastāva montāžas mezglu un detaļu tehniskā stāvokļa kontroles efektivitātes paaugstināšana iegūst īpašu aktualitāti.

**Pētījuma mērķis.** Drošības paaugstināšana dzelzceļa transportā, uzlabojot dzelzceļa ritošā sastāva atbildīgo elementu tehniskā stāvokļa diagnostiku ar ultraskaņas palīdzību, izmantojot jaunākos sasniegumus neirotiklu tehnoloģiju nozarē.

**Pētījuma metodes.** Pētījuma veikšanai tika izmantoti: neironu tīkla matemātiskais aparāts, objektorientētās programmēšanas metodes operētājsistēmā Linux, bet programmproduktu realizācijai – valoda C++, programmatūras produktu Eclipse izstrādes vide un PSE (Matlab un Matchad) saimes programmatūru pakotnes.

### **Darba rezultātu zinātniskais jaunums:**

1. Piedāvāta konceptuāla pieeja ultraskaņas defektoskopijas rezultātu novērtējuma ticamības paaugstināšanai, pamatojoties uz mākslīgo neironu tīklu instrumenta izmantošanu.
2. Uz neirotīklu tehnoloģiju pamata izstrādāta sarežģītas konfigurācijas garu objektu ultraskaņas kontroles rezultātu novērtēšanas metodika pielietošanai adaptīvās automatizētās datu apstrādes sistēmās nepilnas un neprecīzas informācijas apstākļos. Piedāvātā metodika nodrošina esošās aparatūras funkcionalitātes paplašināšanu, papildinot programmatūru ar speciālu programmas moduli ar atvērtu pirmkodu, saderīgu ar esošo ultraskaņas kontroles līdzekļu programmatūru.
3. Izstrādāts un programmatiski realizēts paplašināšanas moduļa kodola neironu tīkla radīšanas algoritms, kas veic informācijas apstrādi.
4. Izstrādāta ieejas informatīvo signālu formēšanas metodika, kas nodrošina atbilstību lēmumu pieņemšanai no neironu tīkla puses un paplašināšanas moduļa iebūves procedūras neatkarību no defektoskopa tipa.
5. Radīts ultraskaņas izplatīšanās sarežģītas konfigurācijas garā objektā datormodelis, kuru izmantojot, izstrādāta apmācošās kopas formēšanas metodika
6. Izstrādāta neironu tīkla, domāta datu apstrādei sarežģītas konfigurācijas garu objektu ultraskaņas defektoskopijas sistēmā uz postulētu modeļu bāzes, sintēzes metodika, kuru izmantojot, veikta neironu tīkla programmatiskā realizācija.

### **Darba rezultātu praktiskā nozīme.**

Iegūtie pētījumu rezultāti var tikt izmantoti ultraskaņas defektoskopijā pielietojamo ekspert sistēmu pilnveidošanai, kas paaugstinās ritošā sastāva montāžas mezglu tehniskā stāvokļa vērtējuma ticamību bez to sagraušanas un ekspluatācijas raksturlielumu izmaiņšanas un atļaus pieņemt pamatotu lēmumu par to turpmāko izmantošanu bez papildus investīcijām jaunu instrumentālo līdzekļu radīšanai un saglabājot ieteiktās kontroles tehnoloģijas.

### **Darba aprobācija.**

Disertācijas materiāli ir ziņoti un apspriesti RTU katedras „Dzelzceļa transporta automātika un telemātika” sēdēs ( 2005. – 2008.g.), kā arī konferencēs: 49. Starptautiskajā zinātniskajā konferencē Rīgā, Latvijā (11.10.2008 – 13.10.2008); 11.Lietuvas jauno zinātnieku konferencē „Science-Lithuania Future”, Viļņā, Lietuvā (15.05.2008.-16.05.2008);

5. Starptautiskajā zinātniski – praktiskajā konferencē „ Trans-Mech-Art – Chem „, Maskavā, Krievijā (23.04.2008. – 24.04.2008.); 10. Lietuvas jauno zinātnieku konferencē „Scienc-Lithuania’s Future” Viļņā, Lietuvā (02.05.2007. – 06.05.2007.); 48. Starptautiskajā zinātniskajā konferencē Rīgā, Latvijā (11.10.2007. – 13.10.2007.); 4. Starptautiskajā zinātniski-praktiskajā konferencē „ Drošības problēmas transportā” Gomeļā, Baltkrievijā (01.11.2007. – 02.11.2007.); 47. Starptautiskajā zinātniskajā konferencē Rīgā, Latvijā (12.10.2006. – 14.10.2006.) un 46. Starptautiskajā zinātniskajā konferencē Rīgā, Latvijā (13.10.2005. – 15.10.2005.).

**Publikācijas.** Izdevumos no Latvijas AAK noteiktā saraksta disertāciju galveno rezultātu publicēšanai publicēti seši disertācijas tēmai atbilstoši darbi.

**Disertācijas struktūra un apjoms.** Darbs sastāv no ievada, septiņām nodaļām, noslēguma un literatūras saraksta, kas satur 31 nosaukumu. Disertācija satur 93 lpp. teksta, 43 zīmējumus, 3 tabulas, 3 programmas un 74 lpp. pielikuma.

## DARBA SATURS

**Ievadā** dots īss problēmas apraksts, pamatota disertācijas darba aktualitāte, tā zinātniskais jaunums un praktiskā nozīmība.

**Pirmajā nodaļā** veikts mūsdienīgo dzelzceļa transportā izmantojamo negraujošās kontroles līdzekļu, metožu un tehnoloģiju apskats. Parādīts, ka ultraskaņas metožu daļa sastāda līdz 40% no dzelzceļa transporta saimniecībā izmantojamo negraujošās kontroles operāciju apjoma. Šeit ietilpst kontakttīkla balstu, pasažieru un kravas vagonu bandāžu un viengabalvelmētu riteņu, kā arī lokomotīvu un vagonu riteņpāru asu u.c. izstrādājumu akustiskā defektoskopija ir negraujošās kontroles veids, kas balstās uz ultraskaņas frekvenču diapazona elastīgo svārstību spējam izplatīties cietās vielās lielā dziļumā un atstaroties no dažāda vieda neviendabīgumiem. Visuniversālākā akustiskās defektoskopijas metode – atbalssmetode – pamatota uz īsu ultraskaņas svārstību impulsu iesūtīšanu izstrādājumā un no defektiem atstaroto signālu intensitātes un pienākšanas laika reģistrāciju. Izstrādājuma kontrolēšanai defektoskopa devējs skenē tā virsmu, bet atbalssignālus no defektiem var novērot uz oscilogrāfa ekrāna vai reģistrēt ar pašrakstītāju. Negraujošās kontroles akustiskās metodes atļauj atklāt slēptos defektus, kas arī noteica to plašo pielietojšanu dzelzceļa transportā sliežu un vagonu riteņpāru diagnostikai.

Plašā riteņpāru asu diagnostikai pielietojamo ultraskaņas sistēmu kontroles tehnoloģiju darbietilpību un tās rezultātu subjektivitāti, kas būtiski pazemina diagnosticēšanas efektivitāti un var kļūt par potenciāli bīstamu situāciju iemeslu. Zemais darba ražīgums, veicot riteņpāru asu kontroli vagonu remonta rūpnīcu un citu uzņēmumu apstākļos, kur tiek veikti lieli darbu apjomi ar visai plašu roku darbu izmantošanu, noved pie tā, ka, neskatoties uz pēdējos gados pieaugušajām prasībām pret dzelzceļa vagonu asu un riteņu kontroles kvalitāti, praksē bieži vien pēc tehnoloģijas paredzētās simtprocentīgās kontroles vietā aprobežojas tikai ar izlases kontroli. Norādītie apstākļi ir par cēloni tam, ka no kopējā detaļu bīstamās sagrūšanas gadījumu skaita apmēram 20% ir operatora vainas dēļ neievēroto defektu sekas.

Tehnisko sistēmu un objektu ekspluatācijas drošuma nodrošināšanas galvenais virziens ir automatizētu tehniskās diagnostikas līdzekļu radīšana ar plašu datortehnikas pielietojumu. Pie ritoša sastāva montāžas mezglu un detaļu tehniskā stāvokļa diagnostikas negraujošās kontroles pamata procedūru automatizācija kalpo no vienas puses kā



efektīvs vilcienu kustības drošības paaugstināšanas līdzeklis, bet no otras puses – kā vienīgais darba ražīguma un kontroles rezultātu ticamības paaugstināšanas līdzeklis, vienlaicīgi samazinot neproduktīvos izdevumus un izslēdzot cilvēkfaktoru pie kontroles rezultātu vērtēšanas.

Mūsu dienās visefektīvākie līdzekļi slēpto defektu atklāšanai, veicot riteņpāru asu kontroli remonta uzņēmuma apstākļos, ir mikrokontrolleru ultraskaņas defektoskopi, kas apgādāti ar signālu automātiskās reģistrācijas sistēmām.

Parādīts, ka gan gadījumos, kad diagnostika tiek veikta ar pārnēsājamiem defektoskopiem, gan automatizētās cilvēku-mašīnu sistēmās, kas veic riteņpāru asu ultraskaņas defektoskopiju, iztrūkst kontroles rezultātu objektīvas interpretācijas instruments, kontroles rezultātu vērtēšanu un lēmuma pieņemšanu par kontroles objekta stāvokli un detaļas izbrāķēšanas nepieciešamību veic operators, kura lēmumam piemīt visai subjektīvs raksturs. Kā sekas kontroles rezultātu objektīvas novērtēšanas instrumenta iztrūkumam rindā gadījumu iespējami kontrolējamo vagonu riteņpāru asu kļūdainas izbrāķēšanas gadījumi, kas noved pie nozīmīgiem finansiāliem zaudējumiem, bet rindā gadījumu netiek atklāti bīstami defekti dēļ operatora veiktā kontroles rezultātu novērtējuma neatbilstības īstenībai.

Pamatojoties uz veikto analīzi, formulēts pētījuma mērķis: sarežģītas konfigurācijas garu objektu ultraskaņas kontroles rezultātu novērtēšanas metodikas izstrāde pielietošanai adaptīvās automatizētās datu apstrādes sistēmās nepilnas un neprecīzas informācijas apstākļos, bāzējoties uz neironu tīkliem, kas atļauj apstākļos, kad arvien pieaug pārvadāšanas apjomi un ātrumi transporta koridoros un kļūst stingrākas prasības pret ritošā sastāva drošumu, pieņemt pamatotus lēmumus par tāda atbildīga sliežu ritošā sastāva mezgla kā riteņpāra tehnisko stāvokli bez papildus investīcijām jaunu instrumentālo līdzekļu radīšanai un saglabājot ieteiktās kontroles tehnoloģijas.

Uzstādītā mērķa sasniegšanai tika risināti sekojoši uzdevumi: dzelzceļa transporta ritošā sastāva (lokomotīvu, vagonu, motorvagonu) riteņpāru asu ultraskaņas kontroles rezultātu augstā apšaubāmības līmeņa cēloņu eksperimentāla noteikšana; neirontīklu tehnoloģiju izmantošanas sarežģītas formas garu objektu ultraskaņas defektoskopijas sistēmās iespēju analīze; ultraskaņas defektoskopijas rezultātu apstrādes un vērtēšanas neirontīklu metodes koncepcijas izstrāde ar mērķi paaugstināt kontroles rezultātu ticamību; neironu tīkla, domāta garu objektu ultraskaņas defektoskopijas apstrādei, sintēzes tehnoloģijas izstrāde; ciparu defektoskopu funkcionālo iespēju paplašināšanas programmas moduļa uzbūves algoritma izstrāde riteņpāru asu ultraskaņas kontroles rezultātu novērtēšanai, izmantojot

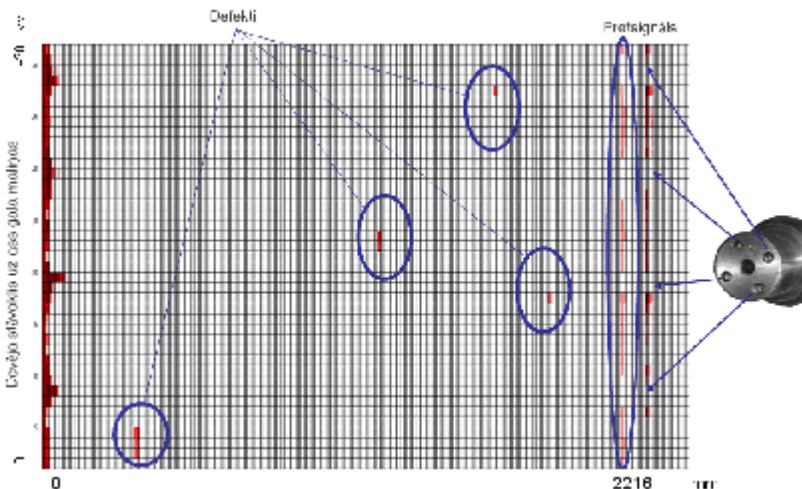
neironu tīklu bloku, un izstrādātā algoritma programmatiska realizācija; izstrādātā programmas moduļa un mikrokontrolleru infrastruktūras telemātiskās saderības nodrošināšana, uz neirontīklu metodes bāzētās automatizētās vagonu riteņpāru asu kontroles rezultātu vērtēšanas sistēmas funkcionēšanas organizācija.

**Otrajā nodaļā** izklāstīti eksperimentālo pētījumu rezultāti, kuri veltīti tāda atbildīgā dzelzceļa ritošā sastāva elementa kā riteņpāra ass profilaktiskās kontroles ar ultraskaņas metodi rezultātu apšaubāmības galveno iemeslu atklāšanai. Ultraskaņas kontroles rezultātu augstās apšaubāmības sekas ir neatbilstoša lēmuma pieņemšana par tās turpmāko ekspluatāciju

Asu ar testa defektiem ultraskaņas kontroles rezultātu analīze parādīja, ka PY1 tipa asis tika atklāti praktiski visi testa defekti. Kas attiecas uz asu PY1III kontroles rezultātiem, tad arī šā tipa asis visi defekti bija atklāti ar augstu precizitāti, izņemot ass vidējo un tālo zemrumbas daļas zonu. Ass PY1III vidējās daļās kontroles zonā un tālajā zemrumbas daļā daļu no testa defektiem atklāt neizdevās.

Eksperimenti parādīja, ka asu PY1III ultraskaņas kontroles rezultātu augstais apšaubāmības līmenis saistīts ar neiespējamību atklāt derīgo informatīvo signālu vai nu dēļ stipru trokšņu periodiskas parādīšanās uz defektogrammām (UDS2-32) vai arī dēļ signāla no defekta (YD2 – 102) neesības uz defektogrammām. ( YD2-102).

Lai noteiktu norādīto parādību iemeslus, kontroles rezultāti tika demonstrēti vairāk informatīvajā B – izklājumā (1. zīm.). B- izklājums atļauj demonstrēt atklātos defektus izplātā attēlojumā: pa X-asi tiek fiksēts no neviendabīguma atstarotais signāls, bet pa Y-asi – devēja stāvoklis uz kontrolējamā objekta. Tādā modelī tiek reģistrēti visi kontroles zonā esošie signāli .



1.zīm. Defektu demonstrācija izplātā attēlojumā

Eksperimenta rezultātu analīze atļauj izdarīt sekojošu slēdzienu: visos izpētāmajos gadījumos atsevišķos devēja stāvokļos ass galā nav pat pretsignāla (1.zīm.). Pretsignāla neesamība atļauj izdarīt šādu secinājumu: PYIII tipa asīs, kuru īpatnība ir caurumu ar vītņem klātbūtne, notiek pārmērīga ultraskaņas viļņa pavājināšanās, kas nav ņemts vērā esošajās riteņpāru asu kontroles tehnoloģijās. Defektoskopu iestatīšanas tehnoloģijas ir izstrādātas, izejot no pieņēmuma, ka pretsignāls tiek droši atklāts jebkurā asu tipā. Tādā gadījumā atbilstoši apstiprinātajai tehnoloģijai pie kontroles rezultātu vērtēšanas ar ciparu defektoskopu palīdzību par atbalss signālu tiek pieņemts pretsignāls, pie kam brāķēšanas jutīgums un, secīgi, arī kontroles rezultāti tiek saistīti ar atbalss signāla lielumu.

Lēmums par izbrāķēšanu tiek pieņemts divu signālu  $K_{def}$  un  $K_{br}$ , kur  $K_{def} = U_{pret} - U_{pret}$  un  $K_{br} = U_{pret} - U_{et}$ , salīdzināšanas rezultātā.

Šeit  $U_{dib}$ ,  $U_{def}$  un  $U_{et}$  – defektoskopa pastiprinājumu lielumi, pie kuriem attiecīgo atbalssignālu, t.i., pretatbalssignāla, atbalssignāla no defekta un atbalssignāla no etalondefekta, amplitūdas sasniedz defektoskopa ekrāna augstuma vidu. Ja izpildās nosacījums  $0 < K_{def} < K_{br}$ , ass tiek izbrāķēta.

Eksperimentālie pētījumi parādīja, ka viens no asu ekspluatācijas procesā veicamās asu kontroles rezultātu apšaubāmības iemesliem ir asu konstruktīvo īpatnību nepilna vērā ņemšana kontroles tehnoloģiskajā procesā. Veicot PYIII tipa riteņpāru asu vidējās un tālās zemrumbu daļu kontroli, vismaz četri apgabali atrodas it kā vītņoto caurumu „ēnā”. Vītņoto caurumu esamības dēļ rodas situācijas, kad ir neiespējami novērtēt

pretsignālu ultraskaņas viļņa stiprā vājinājuma dēļ, sekojoši, detaļas kontrolējamā daļā ir zonas, kas necaurskaņojas. Neskatoties uz instrumentālo līdzekļu daudzveidību un stingrām prasībām pret tādu kustības drošības nodrošināšanai svarīgu mezglu kā riteņpāris ultraskaņas kontroles veikšanas tehnoloģiju, rindā gadījumu ir objektīvi neiespējami ticami atklāt defektus. Šis apstāklis var kļūt par iemeslu kontrolējamo riteņpāra asu kļūdainai izbrāķēšanai, kas noved pie nozīmīgiem finansiāliem tēriņiem, bet atsevišķos gadījumos – par bīstama defekta neatklāšanas cēloni dēļ operatora dotā kontroles rezultāta vērtējuma neatbilstības īstenībai.

Tādejādi, eksistē objektīvi iemesli PY1III tipa asu tehniskā stāvokļa kontroles ar ultraskaņas rezultātu novērtējuma apšaubāmībai, kas neļauj pieņemt pamatotu lēmumu par viņu derīgumu turpmākai ekspluatācijai.

**Trešajā nodaļā** tiek pamatota iespēja pielietot mākslīgos neironu tīklus (MNT) kā instrumentu ekspertu vērtējumu veikšanai; pievesti uz neironu tīkliem bāzētas ekspertu sistēmu klases funkcionēšanas un apmācības teorijas pamati; analizēta neirontīklu tehnoloģiju izmantošanas iespēja informācijas apstrādes sistēmās un uz izpildītās analīzes pamata izstrādāta konceptuāla pieeja ultraskaņas kontroles līdzekļu funkcionalitātes paplašināšanas problēmai, izmantojot mākslīgos neironu tīklus. Apkopojot šajā nodaļā iztīrīto materiālu, var konstatēt sekojošo. Risinot slēpto defektu atklāšanas un pazīšanas uzdevumu objektos, pat konstruktīvi vienkāršiem objektiem ir grūti sastādīt uzdoto defektu automātiskas pazīšanas algoritmu pareizu lēmumu pieņemšanai nepilnas un neprecīzas informācijas apstākļos.

Radušās pie tam grūtības identifikācijas uzdevumu risināšanā ar datoru palīdzību pieskaita pie tā saucamo „grūti formalizējamo” uzdevumu risināšanas problēmām. Mūsdienās „grūti formalizējamo” uzdevumu risināšanai efektīva ir tāda pieeja, kuras izmantošanai nepieciešams tikai pietiekošs skaits piemēru, lai defektu pazīšanas sistēmu adaptētu konkrētiem apstākļiem ar uzdoto ticamības pakāpi. Tādas pieejas klasisks piemērs ir neironu tīkli. Neironu tīkli atļauj atklāt nelineāras likumsakarības stipri pietroksņotās nevienādīgās vidēs, dod labus rezultātus pie liela ieejas parametru skaita un nodrošina adekvātus lēmumus pie relatīvi nelieliem datu apjomiem. Neironu tīklu galvenā atšķirīgā īpatnība ir tā, ka tiem principā nav vajadzīgs iepriekš zināms reālā procesa modelis, bet viņi veido lēmumu uz tiem uzrādītās testa informācijas pamata. Neironu tīkli kā adaptīvi apstrādes instrumenti ir iegājuši praksē visur, kur jārisina prognozēšanas, klasifikācijas un risku novērtēšanas uzdevumi vai arī

jebkurā citā cilvēku darbības jomā, kur ir vāji algoritmizējami uzdevumi, kuru risināšanai nepieciešam vai nu pastāvīgs kvalificētu ekspertu grupas darbs, vai arī adaptīvas datu apstrādes automatizācijas sistēmas. Neironu tīkli ir jaudīga un šodien, jādoma, vislabākā metode diagnostikas rezultātu datoranalīzei situācijās, kad datoros iztrūkst nozīmīgi informācijas fragmenti, bet esošā informācija ir maksimāli pietrokšņota. Tieši tāpēc neironu tīkli var būt noderīgi datu apstrādes adaptīvās automatizētās sistēmas apstākļos, kad nav iespējams saņemt pilnu informāciju, bet analīzes uzdevums praktiski nealgoritmējas. Jāatzīmē, ka mākslīgie neironu tīkli kā identifikācijas un informācijas klasifikācijas uzdevumu risināšanas instruments ir īpaši efektīvi ekspertu vērtējumu uzdevumos, par cik apvieno sevī datora skaitļu apstrādāšanas spējas un cilvēka apkopošanas un pazišanas spējas.

Slēpto defektu identifikācijas uzdevumi kontroles objektos bez cilvēka iejaukšanās ar negraujošas kontroles metodēm pieder grūti algoritmizējamo uzdevumu klasei un labi iekļaujas neironu tīklu iespējās. Panākumi informācijas tehnoloģiju jomā ir pavēruši iespējas veikt pētījums par neirontīklu tehnoloģiju izmantošanu grūti algoritmizējamu inženieruzdevumu risināšanai.

Viens no tādiem uzdevumiem, kura risināšanai ir attaisnojama neirontīklu tehnoloģiju pielietošana, ir signālu no slēptiem defektiem intelektuālā analīze vagonu riteņpāru asu ultraskaņas kontroles sistēmās.

Pieredzi, kas iegūta ar galējās apmācošās kopas??? palīdzību, neironu tīkli ir spējīgi veiksmīgi izmantot arī citu uzdevumu risināšanai. Tieši tāpēc neironu tīkli ir iegājuši praksē visur, kur jārisina prognozēšanas, klasifikācijas un risku novērtēšanas uzdevumi vai, citiem vārdiem sakot, tajās cilvēku darbības jomās, kur ir slikti algoritmizējami uzdevumi, kuru risināšanai nepieciešams vai nu pastāvīgs kvalificētu ekspertu grupas darbs, vai arī adaptīvas informācijas apstrādes automatizācijas sistēmas, kādas arī ir neironu tīkli.

Uz veiktās neirontīklu tehnoloģiju iespēju un neironu tīklu funkcionēšanas principu analīzes pamata izstrādāta konceptuāla pieeja ultraskaņas kontroles līdzekļu funkcionalitātes paplašināšanas problēmai, kā instrumentu izmantojot mākslīgos neironu tīklus. Pieejas būtība ir sekojoša:

Mūsdienu mikrokontrolleru standarta saskarņu atvērtība rada pārnēsājamā defektoskopa funkcionalitātes paplašināšanas iespēju, papildinot tā iebūvēto programmatūru ar speciālu programmas moduli ar atvērtu pirmkodu. Moduļa kodola funkcijas izpilda mākslīgs neironu tīkls, apmācīts droši fiksēt defektus. Programmrealizējamie neironu tīkli, kā likums, savai funkcionēšanai neprasa lielus datorresursus, tāpēc

mikrokontrollera resursi ir pilnīgi pietiekami, lai organizētu datu apstrādi, neizmantojot ārējās ierīces.

Paplašināšanas moduļa kodola- neironu tīkla, kas veic informācijas apstrādi ultraskaņas defektoskopijas sistēmā – radīšanas algoritms paredz sekojošu procedūru izpildi:

- Tāda neironu tīkla arhitektūras izstrādne, kas būtu spējīga risināt šādus savstarpēji saistītus uzdevumus: neironu tīkla topoloģijas izvēle; starpnieronu saišu struktūras izvēle; ieejas signālu kombinēšanas noteikumu noteicošo funkcionāļu izvēle; tādu funkcionāļu izvēle, kas nosaka izejas signāla aprēķināšanas noteikumus pēc ieejas signālu kopuma;
- Saišu svara koeficientu korekto vērtību noteikšana, kas ietver sevī apmācības tehnoloģijas izstrādni, izmantojot izveidoto apmācošo kopu, un neironu tīkla apmācīšanas procesa realizāciju.

Programmas moduļa iekļaušana tiek realizēta, ielādējot mikrokontrollerā atjauninātu programmatūru.

Programmatūras ielādēšanas process ietver sevī datnes pārraidi no datora uz defektoskopu caur ārējām saskarnēm ( piemēram, USB, RS232, COM). Defektoskopā ielādējamā datne tiek iegūta defektoskopa atjauninātās programmatūras pirmkodu kompilēšanas rezultātā.

Papildus moduļa iekļaušanas gadījumā mikrokontrollerā kontroles rezultātu novērtēšanai tiek izmantota programma, kuras ieejas dati ir ultraskaņas kontroles rezultāti ciparu formā. Sekojoši, pie paplašināšanas moduļa izstrādnes iepriekš jābūt atrisinātam jautājumam par ieejas datu formēšanu.

Ieejas datu formēšanas galvenais princips ir izstrādājamā moduļa funkcionēšanas neatkarība no ierīces tipa.

Šā principa izpildes nosacījums ir primāro datu ieejas masīva izmēra saglabāšana nemainīgā lielumā, kas vienāds ar zināmu fiksētu vērtību  $N$  neatkarīgi no elementu daudzuma masīvā, kas iegūts analogciparu pārveidošanas (ACP) gaitā konkrētajā defektoskopā. Iepriekšējā apstrāde tiek veikta, lai nodrošinātu izstrādājamā moduļa funkcionēšanas neatkarību no defektoskopa tipa, izmantojot ultraskaņas defektoskopus ar atšķirīgu ACP diskretizācijas soli laikā. Lai realizētu izstrādājamā moduļa funkcionēšanas neatkarību no ierīces tipa, jāizstrādā bloks, kas pēc zināmām funkcijas vērtībām vienos punktos realizē tās vērtību iegūšanu citos punktos, jeb citiem vārdiem sakot, veikt primāro datu  $K$ - dimensiju masīva no konkrētā defektoskopa ACP pārveidošanu  $N$ -dimensiju masīvā, kur  $N$ - fiksēts skaitlis.

Par cik defektu meklēšanas bloks realizē datu apstrādi, izmantojot neironu tīklu funkcionēšanas algoritmus, nepieciešams radīt apmācošo

kopu. Apmācošās kopas izveidošana sastāv no tīkla reakcijas uz mākslīgi radītiem defektiem datu bāzes formēšanas. Mākslīgo defektu skaitam un stāvoklim jābūt tādiem, lai atbalssignāli no šiem defektiem reģistrētos atsevišķi.

Ņemot vērā augstāk izklāstīto programmas moduļa, realizējoša pārnēsājamo ultraskaņas kontroles līdzekļu funkcionalitātes paplašināšanu, izstrādne iekļauj sevī sekojošu procedūru izpildi:

- informatīvo signālu kopas formēšanu mikrokontrollera funkcionalitātes paplašināšanas modulim;
- informatīvo signālu kopas iepriekšējās apstrādes programmatisko realizāciju, lai nodrošinātu paplašināšanas moduļa ieejas datu nolasīšanas procesa unifikāciju un sekojošu neironu tīklu ieejas datu datņu formēšanu, izmantojot dažādu tipu defektoskopus;
- apmācošās kopas radīšana;
- neironu tīkla prototipa sintēzes tehnoloģijas izstrādāšana, ieskaitot apmācīšanas procedūru, uz kuras bāzes jānotiek neironu tīkla komponentu programmatiskajai realizācijai pie riteņpāra ass ultraskaņas kontroles rezultātu apstrādes;
- cipara defektoskopa funkcionālo iespēju paplašināšanas moduļa programmatisko realizāciju, kas ietver sevī atbalsta programmatūras izstrādni telemātiskās savietojamības nodrošināšanai pie funkcionālās paplašināšanas moduļa integrēšanas mikrokontrollera programmatūrā.

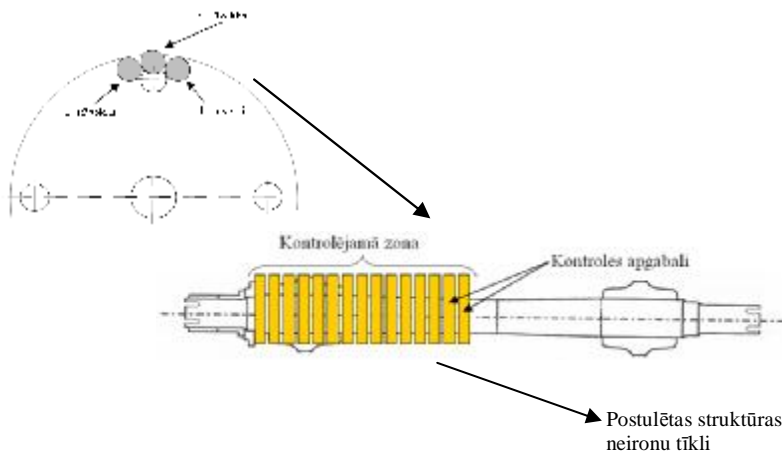
**Ceturtajā nodaļā** risināti šādi divi uzdevumi:

- izstrādāta informatīvo signālu kopa mikrokontrollera funkcionalitātes paplašināšanas modulim;
- realizēta informatīvo signālu kopas iepriekšējās apstrādes programma, lai nodrošinātu diagnostisko signālu formēšanas procesa unifikāciju un sekojošo ieejas datu datņu formēšanu neironu tīklam, izmantojot dažādu tipu defektoskopus. Šiem datiem jābūt saformētiem tā, lai tos uztverošais apmācītais neironu tīkls spētu adekvāti novērtēt reālo procesu.

Primārie informatīvie signāli ultraskaņas kontroles procesā tiek noņemti no ACP izejas un tiek izvietoti speciāla buferī. ACP buferis realizēts K-dimensiju masīva veidā, kura indeksi salīdzināti ar diskretizācijas soli laikā un ar izklājuma ilgumu (izklājuma ilgums ir fiksēts saskaņā ar detaļas kontroles tehnoloģiju), bet masīva elementu vērtības – ar diskretizācijas soli pa līmeni. Buferis satur ACP rezultātu fiksētā laika sprīdī, taču masīva dimensija K ir atkarīga no ACP bloka aparatrealizācijas (diskretizācijas soļa laikā).

Ultraskaņas kontroles primārie dati no dažādu tipu defektoskopiem atšķiras ar tādiem parametriem kā elementu vērtību diapazons primāro datu masīvā un elementu skaits šajā masīvā. Lai veiktu neironu tīkla apstrādājamo ieejas datu formēšanas programmas unifikāciju, primāro datu nolasīšanas programmā jāparedz šo datu iepriekšējās apstrādes procedūras.

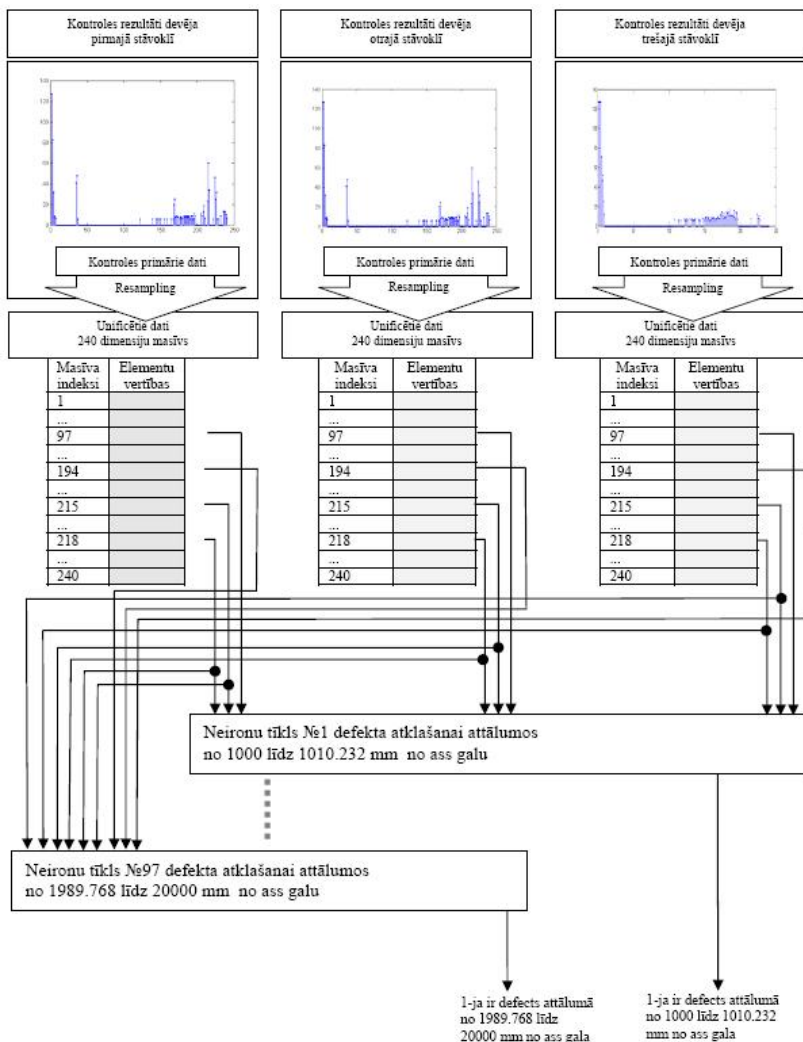
Kontrolējot tos ass apgabalus, kas atrodas vītņcaurumu „ēnā” neironu tīklā analizējamo ieejas datu formēšanai kā informatīvie signāli tiek izmantoti dati no ACP pie trim dažādiem devēja stāvokļiem, bet kontroles zona tiek sadalīta uz zināmu kopu ass apgabalu, no kuriem katru vērtē atsevišķs neironu tīkls ar postulētu struktūru (2.zīm.)



2.zīm. Neironu tīklā analizējamo ieejas datu formēšanas konceptuālā shēma

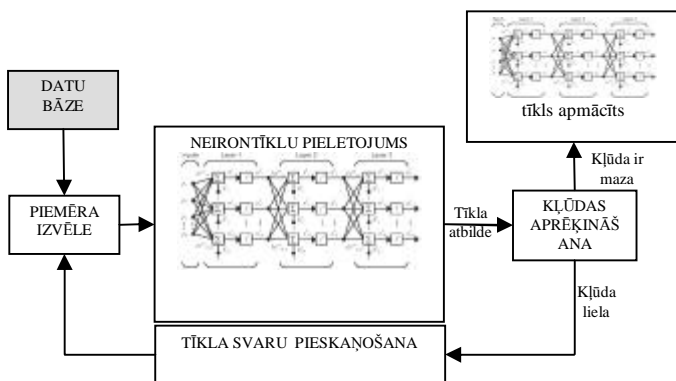
Lai nodrošinātu programmatiskās paplašināšanas moduļa funkcionēšanas neatkarību no konkrēta defektoskopa ieejas datu masīva dimensijas un no defektoskopa tipa, pie moduļa programmatiskās realizācijas ieejas datu nolasīšanas no ACP ar dažādiem diskretizācijas soļiem tiek unificēta. Tiek ieteikts unifikācijas procesu realizēt, pārveidojot funkcijas vērtības, atainotas uz regulāra tīkla ar izmēru  $M1 * N1$  mezglu, tas pašas funkcijas vērtības uz jauna tīkla ar izmēru  $M2 * N2$  mezglu, kas pārklāj to pašu apgabalu.





3. zīm. Mikrokontrollera funkcionalitātes paplašināšanas programmas moduļa ieejas signālu formēšanas shēma

**Piektajā nodaļā** izstrādāta apmācošās kopas izveidošanas metodika. Neironu tīkla apmācīšanas procesa mērķis ir saišu svaru koeficientu noteikšana. Neironu tīkla apmācīšanas procesa blokhēma demonstrēta 4. zīm.



4.zīm. Neironu tīkla apmācīšanas procesa blokshēma

Neironu tīklu īpatnība ir tāda, ka saišu svāra koeficientu atrašanai (apmācība) nepieciešama testa informācija (apmācoša kopa- signāli no testa defektiem datu bāzē). Minimālo elementu skaitu neironu tīklu apmācošajā kopā nosaka pēc nevienādības  $2(n+L+m) < N < 10(n+L+m)$  [1], kur : N-elementu skaits apmācošajā kopā, n – neironu tīkla ieeju skaits, m – neironu tīklu izeju skaits, L-saišu skaits starp neironiem

Testa datu bāzes (apmācošo kopu) neironu tīkla vadāmai apmācīšanai teorētiski var iegūt statistisko datu savākšanas ceļā. Tomēr praksē šis ceļš ir izslēgts, par cik pie tam ir vajadzīgs liels skaits asu ar reāliem defektiem kontroles apgabalos. Testa datu bāzi var iegūt, izmantojot datus no mākslīgi radītiem defektiem. Aprēķini rāda, ka apmācošās kopas radīšanai eksperimentālā ceļā būtu jāizved no eksploatācijas liels skaits tādu dārgu detaļu kā riteņpāru asis, kas ir pretrunā ar veselo saprātu. Problēmas risināšanai tiek ieteikta pieeja, pamatota uz datormodeļa, adekvāti attēlojoša reālu ultraskaņas viļņu izplatīšanās procesu garā objektā. Akustiskas teorijā ir izstrādāts tā saucamais ultraskaņas izplatīšanās staru modelis, kurš inženierpraksē ir atradis plašu pielietojumu darbā ar objektiem, kuru izmērs viļņa izplatīšanās virzienā ir daudz lielāks par ultraskaņas viļņa garumu. Šajā nodaļā ir veikta šī moduļa datorealizācija C++ programmēšanas valodā.

Datormodelis ir izmantots apmācošās kopas iegūšanai defekta kopas emulēšanas ceļā, kā defektus izmantojot fiksēta dziļuma iezāģējumus, pie kam katrs iezāģējums tiek emulēts vairākas reizes pie dažādiem devēja stāvokļiem attiecībā pret vītņcaurumiem. Datormodeļa adekvātums pārbaudīts, salīdzinot testa signālu datorapstrādes rezultātus ar eksperimentālajiem datiem.

Izstrādāta apmācošās un testa kopu radīšanas tehnoloģija, izmantojot datormodeli.

**Sestajā nodaļā** izstrādāta neironu tīkla, domāta defektu atklāšanai garos objektos, sintēzes metode. Par gara objekta piemēru ņemta vagona riteņpāra ass.

Neironu tīkla, kas veic informācijas apstrādi ultraskaņas defektoskopijas sistēmā, sintēze ir daudz etapu process, kurš katrā kārtējā etapā prasa šādu divu patstāvīgu uzdevumu kopējo risinājumu:

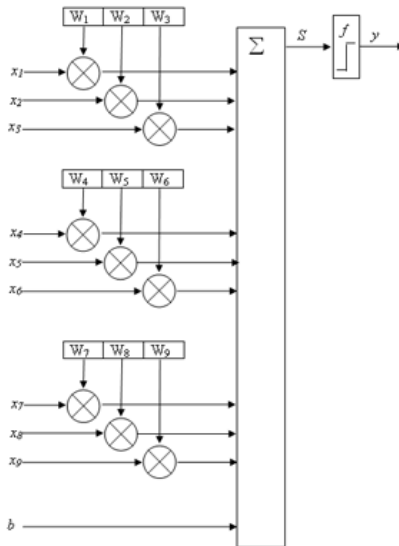
pirmais uzdevums – tāda neironu tīkla arhitektūras uzbūve, kas ir spējīga adekvāti reaģēt uz defektiem kontroles zonā: kārtu skaita un neironu skaita kārtās izvēle; starpneironu saišu struktūras izvēle; ieejas signālu kombinēšanas noteikumu noteicošo funkcionālu izvēle; izejas signālu aprēķināšanas pēc ieejas signālu kopuma noteikumu noteicošo funkcionālu izvēle;

otrais uzdevums – neironu tīkla ar izvēlēto arhitektūras apmācīšana, kuras būtība ir saišu svaru koeficientu korekta noteikšana.

Ja izraudzītajai arhitektūrai neizdodas piemeklēt svaru koeficientu vērtības neironu tīkla korektai funkcionēšanai, tad nākas izmantēt arhitektūru un no jauna veikt apmācīšanas procesu. Zem neironu tīkla arhitektūras izmaiņš saprot topoloģijas (kārtu skaitu un neironu skaitu kārtā), ieejas signālu kombinēšanas noteikumu un neironu izejas signāla apstrādes noteikumu izmaiņšanu.

Viena no prasībām pret izstrādājamo neironu tīklu ir neliels skaitļošanas procedūru apjoms pie tā darba emulēšanas, kas ir līdzvērtīgi pieticīgām prasībām pret neironu tīklu emulējošās programmas datorresursiem. Jo mazāk ieeju un izeju ir neironu tīklam, jo mazāk resursu prasa neironu tīklu emulējošā programma. Šī prasība izriet no pieņemtās ultraskaņas kontroles līdzekļa funkcionalitātes paplašināšanas moduļa uzbūves koncepcijas, saskaņā ar kuru sintezējamam neironu tīklam jāintegrējas mikrokontrollerā ar ierobežotiem atmiņas resursiem programmatūrā.

Ieteikta neironu tīkla sintēzes vienkāršota metodika, kuras pamatā ir kombinācija no vienkāršiem postulētās struktūras tīkliem vienkārtas perceptroniem, katrs no kuriem skenē nelielu kontroles zonas iecirkni. Preceptors ir tiešās plūsmas (feed-forward) neironu tīkls, kurš izmanto neironu izejas signāla aprēķināšanu nobīdītās Diraka funkcijas veidā. Izstrādāts un programmatiski realizēts neironu tīkla, spējīga adekvāti reaģēt uz defektiem kontroles zonā, arhitektūras izveidošanas algoritms. Saskaņā ar ieteikto metodiku par atsevišķa neironu tīkla prototipu izvēlēta neironu tīkla arhitektūra, kas parādīta 5.zīm.



5. zīm. Viņņcaurumu ēnā atrodošos apgabalu kontrolei domāta preceptrona struktūra.

Prototips satur 9 ieejas un vienu izeju. Uz neironu tīkla ieejām nonāk informācijas izlase no defektoskopa atmiņas, kur glabājas ass ultraskaņas kontroles rezultāti. Izejas vērtība var būt vienāda vai nu ar vieninieku gadījumā, ja defekts kontrolējamā apgabalā ir atklāts, vai arī ar nulli, ja defekts kontrolējamā apgabalā nav atklāts. Pie defekta atklāšanas attiecīgais perceptrons atgriež informāciju par tā koordināti.

Realizēta sintezētā neironu tīkla apmācīšanas programma. Neironu tīkla ar uzdoto struktūru un funkcionēšanas korektuma pārbaudi apmācīšanas programmas kods izskatās šādi:

```
[err]=function perc_rulsha(p,t,p_test,t_test)
PR = [ 0, 127; 0, 127; 0, 127; 0, 127; 0, 127; 0, 127; 0, 127; 0, 127; 0, 127; 0, 127; ];
net = newp( PR, 1 );
[net,a,e] = train(net,p,t);
net.IW{1}
net.b{1}
a = sim(net,p_test);
err = a-t_test
```

kur funkcijas perc\_rulsha argumenti ir: p – masīvs, sastāvošs no perceptrona ieejas signālu vērtībām; p\_test- perceptora ieejas signālu vērtības, kurām atbilst neironu tīkla izejas vērtība t\_test.

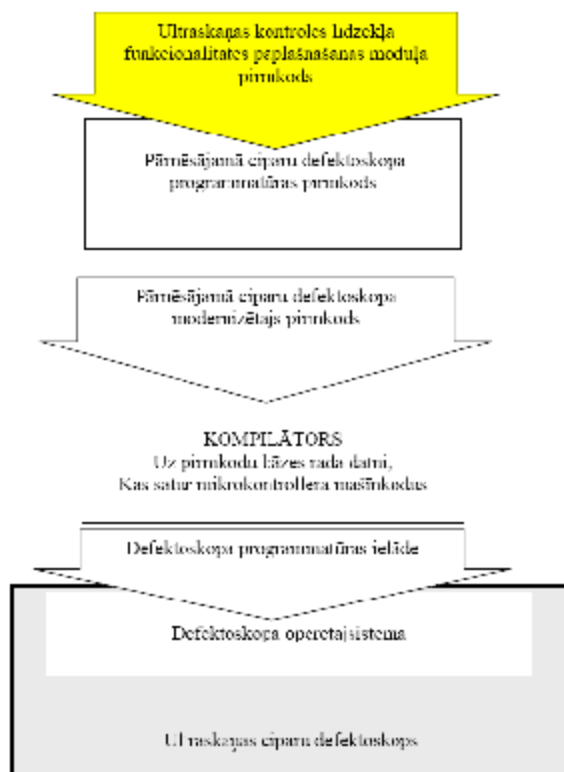
Programmas rumpī tiek izmantotas sekojošas programmu paketes Matlab iekšējās procedūras: newp-uzdod neironu tīkla arhitektūru; train – realizē neironu tīkla apmācību; sim – simulē neironu tīkla darbu tā funkcionēšanas korektuma pārbaudei.

Šajā nodaļā izpildīto pētījumu rezultāts ir neironu tīkla, kas veic informācijas apstrādi ultraskaņas defektoskopijas sistēmā, sintēzes metodikas izstrādne un realizācija. Izstrādāts algoritms un realizēta sintezētā neironu tīkla apmācīšanas programma.

**Septītā nodaļa** veļtīta programmas moduļa atvērtā pirmkoda (Open Source) realizācijai un viņa integrācijai ciparu defektoskopa programmatūrā. Ciparu defektoskopa programmatiskā paplašināšana bāzējas uz atjauninātas programmatūras ielādēšanu mikrokontrollerā.

Defektoskopa atjaunināto programmatūru iegūst, kompilējot viņa programmatūras pirmkodus, tai skaitā tā programmas moduļa pirmkodu, kurš paplašina defektoskopa funkcionalitāti,

lai kontrolētu vagonu riteņpāra asis ar vītņcaurumiem. Izstrādāts ciparu defektoskopa mikrokontrollera funkcionalitātes paplašināšanas programmas modulis, kura kodols ir sintezēts neironu tīkls. Moduļa programmatiskā realizācija ir izpildīta C++ valodā un atainota 2.pielikumā. Ieteikts mikrokontrollera funkcionalitātes paplašināšanas moduļa integrēšanas viņa programmatūrā variants (6.zīm.)



6. zīm. Pēc tehnoloģijas Open Source izstrādātā programmas moduļa integrēšanas defektoskopa programmatūrā blokshēma.

## DARBA GALVENIE REZULTĀTI

Darba procesā izpildītie pētījumi atļāva iegūt sekojošus rezultātus:

1. Eksperimentāli atklāti objektīvie iemesli augstākajam PYIII tipa asu tehniskā stāvokļa ultraskaņas kontroles rezultātu novērtējuma apšaubāmības līmenim, kas neļauj pieņemt pamatotu lēmumu par to derīgumu turpmākai ekspluatācijai.
2. Uz neirontiklu tehnoloģiju iespēju analīzes pamata izstrādāta konceptuāla pieeja ultraskaņas kontroles līdzekļu funkcionalitātes paplašināšanas problēmas risinājumam, veicot ekspertu vērtējumus adaptīvās automatizētās datu apstrādes sistēmās nepilnas un neprecīzas informācijas apstākļos. Šī pieeja paredz defektoskopa programmatūras papildināšanu ar speciālu programmas moduli ar atvērtu pirmkodu; informatīvo signālu kopas formēšanas procesa unifikāciju; neironu tīkla izveidošanu uz postulētu modeļu bāzes; funkcionalitātes paplašināšanas moduļa integrāciju ar pārnēsājamo ultraskaņas kontroles līdzekļu programmatūru procesa tehnoloģiskuma nodrošināšanai.
3. Uz neirontiklu tehnoloģiju pamata izstrādāta sarežģītas konfigurācijas garu objektu ultraskaņas kontroles rezultātu vērtēšanas metodika pielietošanai adaptīvās automatizētās datu apstrādes sistēmās nepilnas un neprecīzas informācijas apstākļos. Ieteiktā metodika nodrošina esošās aparatūras funkcionalitātes paplašināšanu, papildinot tās programmatūru ar speciālu programmas moduli ar atvērtu pirmkodu.
4. Izstrādāts un programmatiski realizēts paplašināšanas moduļa kodola-neironu tīkla, kas veic informācijas apstrādi, radīšanas algoritms; algoritms iekļauj sevī tādu uzdevumu risināšanu kā neironu tīkla topoloģijas izvēle; starpneironu saišu struktūras izvēle; ieejas signālu kombinēšanas noteikumu noteicošo funkcionāļu izvēle; tādu funkcionāļu izvēle, kas nosaka izejas signāla aprēķināšanas noteikumus pēc ieejas signālu kopuma; starpneironu saišu svaru koeficientu korekto vērtību noteikšana, kas ietver sevī apmācošas kopas radīšanu un neironu tīkla apmācīšanas procesa realizāciju.
5. Izstrādāta ieejas informatīvo signālu formēšanas metodika, kas nodrošina neironu tīkla lēmumu pieņemšanas adekvātumu un paplašināšanas moduļa iekļaušanas procedūras neatkarību no defektoskopa tipa.
6. Pamatots un realizēts ultraskaņas viļņa izplatīšanās sarežģītas konfigurācijas garā objektā datormodelis, kuru izmantojot, izstrādāta apmācošās kopas izveidošanas metodika.
7. Izstrādāta uz postulētiem modeļiem bāzēta neironu tīkla, domāta datu apstrādei sarežģītas konfigurācijas garu objektu ultraskaņas defektoskopijas

sistēmā, sintēzes metodika, kuru izmantojot, veikta neironu tīkla programmatiskā realizācija.

8. Ieteikts defektoskopa funkcionalitātes paplašināšanas moduļa pirmkoda integrācijas mikrokontrollera programmatūrā variants.

9. Iegūtie pētījumu rezultāti var tikt izmantoti ultraskaņas defektoskopijā pielietojamo ekspertu sistēmu uzlabošanai, kas paaugstinās ritošā sastāva montāžas mezglu tehniskā stāvokļa novērtējuma ticamību bez šo mezglu sagraušanas un ekspluatācijas raksturlielumu izmanīšanas un atļaus pieņemt pamatotus lēmumus par viņu turpmākās izmantošanas iespējām bez papildus investīcijām jaunu instrumentālo līdzekļu radīšanai un saglabājot ieteiktās kontroles tehnoloģijas.



## IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. В.В.Круглов, В.В.Борисов. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. - М.: Горячая линия–Телеком, 2001. - 382 стр.
2. Роберт Каллан. Основные концепции нейронных сетей. Москва·Санкт-Петербург·Киев 2001. – 231 стр.
3. И.Н.Ермолов, Н.П.Алешин, А.И.Потапов. Неразрушающий контроль. Акустические методы контроля. - Москва, «Высшая Школа» 1991 -
4. Руководство по комплексному ультразвуковому контролю колесных пар вагонов РД 07.09-97, МОСКВА 1997.
5. Neural Network Toolbox User's Guide. COPYRIGHT 1992—2007 by The MathWorks, Inc. / интернет  
[http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf\\_doc/nnet/nnet.pdf](http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/nnet/nnet.pdf)
6. Е.В. Константинова, Д.И. Рязский Практический опыт приемочного УЗК осей колесных пар// В мире неразрушающего контроля - 2007. №1(35) МАРТ - стр. 68
7. Гепанович В.А., Вопилкин А.Х., Кононов Д.А., Тихонов Д.С. Автоматизированные средства диагностирования объектов повышенной опасности методом многоакурсной акустической голографии// В мире неразрушающего контроля – 2006.- №3(33) СЕНТЯБРЬ - стр. 6.
8. Вопилкин А.Х., Кононов Д.А., Тихонов Д.С. Методики расчета скорости роста трещины в осях подвижного состава// В мире неразрушающего контроля - 2007 - №1(35) МАРТ
9. Дымкин Г.Я., Бочарова И.В., Пудовиков С.А., Шевелев А.В. Методические принципы и технологии приемочного ультразвукового контроля осей колесных пар// Дефектоскопия. - 2006. - №3
10. Данилов В.Н., Самохвалов В.Н. Применение АРД диаграмм для настройки чувствительности эхо-импульсного метода контроля осей колесных пар подвижного состава// Дефектоскопия - 2006 - №4
11. Семушина С.А. "Жизнь" неразрушающего контроля на вагоноремонтном предприятии// В мире неразрушающего контроля – 2007. - №1(35) МАРТ
12. В.А. Бархатов. Распознавание дефектов с помощью искусственной нейронной сети специального типа// Дефектоскопия - 2006. - №2
13. Arlindo Rodrigues Filho Automatic welding diagnosys using neural network// NDT.net – April 2000 - Vol. 5 No. 04  
/интернет  
<http://www.ndt.net/article/v05n04/arlindo/arlindo.htm>

14. Tadeusz Stepinski, Lars Ericsson, Bengt Neural Network Based Classifier for Ultrasonic Resonance Spectra// NDT.net – 1998 - Vol. 3 No. 12.  
/интернет  
<http://www.ndt.net/article/ecndt98/simulat/363/363.htm>
15. Ю. Ф. ГОЛУБЕВ Нейронные сети в мехатронике // Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
16. В.Г.Царегородцев ОБЩАЯ НЕЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ . СУММАРНОГО ГРАДИЕНТА ВЫБОРКИ ПРИ ОБУЧЕНИИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ //Материалы XIII Всеросс. семинара «Нейроинформатика и её приложения», - Красноярск - 2004. С.145-151  
/интернет  
[http://www.neuropro.ru/mypapers/krasnneu04\\_1.pdf](http://www.neuropro.ru/mypapers/krasnneu04_1.pdf)
17. В.А.Ильин, Г.И.Кожевников, Ф.В.Левыкин. Дефектоскопия деталей подвижного состава железных дорог и метрополитенов. - Транспорт - 1983г.
18. В.Ф.Криворудченко, Р.А.Ахмеджанов. Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов подвижного состава железнодорожного транспорта. - Москва - 2005
19. В.В. Круглов, М.И.Дли, Р.Ю.Голунов. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. - М.: Издательство Физико-математической литературы - 2001. – 224 с
20. Дефектоскоп ультразвуковой ПЕЛЕНГ УД2-102.  
Руководство по эксплуатации ДШЕК.663532.001 РЭ1 Часть I.  
- Санкт-Петербург - 2003
21. Лохов В.П., Дымкин Г.Я ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНСТРУКЦИЯ ПО УЛЬТРАЗВУКОВОМУ КОНТРОЛЮ ОСЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР ВАГОНОВ. ТИ 07.09.01-97
22. S`Shekhar N Shitole, O Zahran, W Al-Nuaimy Combining fuzzy logic and neural networks in classification of weld defects using ultrasonic time-of-flight diffraction// NDT.net - [www.ndt.net](http://www.ndt.net)  
/интернет  
[www.ndt.net/search/docs.php3?id=4542](http://www.ndt.net/search/docs.php3?id=4542)
23. Shaun W. Lawson and Graham A. Parker. Automatic detection of defects in industrial ultrasound images using a neural network// Mechatronic Systems and Robotics Research Group Department of Mechanical Engineering. University of Surrey
24. René Marklein The Finite Integration Technique as a General Tool to Compute Acoustic, Electromagnetic, Elastodynamic, and Coupled Wave Fields. /интернет  
<http://www.uni-kassel.de/fb16/tet/marklein>

25. М. А. Исакович. Общая акустика. - НАУКА, - МОСКВА - 1973г.
26. P. B. Nagy, Introduction to Ultrasonics (photocopied class note).  
UNIVERSITY OF CINCINNATI DEPARTMENT OF  
AEROSPACE ENGINEERING & ENGINEERING  
MECHANICS. March 2001
27. Й.Крауткремер, Г.Крауткремер Справочник: Ультразвуковой контроль материалов - Москва, «МЕТАЛУРГИЯ» - 1991
28. К.С. Паврос, К.В. Жарков Акустический тракт ультразвуковых контрольно-измерительных приборов// Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР, Ленинградский ордена Ленина электротехнический институт имени В.И. Ульянова (Ленина) - Ленинград - 1980
29. Интерполяция сплайнами /интернет  
<http://alglib.sources.ru/interpolation/spline3.php>
30. Построения кубических сплайнов /интернет  
[http://www.srcc.msu.ru/num\\_anal/lib\\_na/modif/byvshy.doc](http://www.srcc.msu.ru/num_anal/lib_na/modif/byvshy.doc)
31. З. М. Селинова, В.В. Кожаринов Микропроцессорная система оперативного неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов /интернет  
<http://ww.tstu.ru/win/tgtu/podraz/fakul/magistr/forum/0/2.doc>
32. В.Глогов Sliežu ultraskaņas defektoskopija 1.daļa - Rīga – 2004. – 81.lpp.
33. В.Глогов Sliežu ultraskaņas defektoskopija 2.daļa - Rīga – 2006. – 100.lpp.
34. J. Petersons Vagonu riteņpāru ultraskaņas kontrole rokasgrāmata – Rīga – 2002 - 98.lpp.
35. В.В. Кожаринов, А.В. Дубина К вопросу об использовании электроразрядного метода визуализации дефектов при контроле деталей подвижного состава// Совершенствование организации ремонта вагонов и их технического обслуживания. Межвузовский сборник научных статей – Гомель, БелИИЖТ – 1984. – 6 стр.
36. Н.Е. Домород, В.В. Кожаринов, А.В. Дубина Способ обнаружения дефектов в диэлектрических объектах// а.с. №1243501 – 1986 – 3 стр.
37. В.В. Кожаринов Н.Е. Домород Контроль сплошности магнитожидкостных звукопроводов// Заводская лаборатория – 1986 - №3 – 44-46 стр.

38. Óscar Martín, Manuel López, Fernando Martín Artificial neural networks for quality control by ultrasonic testing in resistance spot welding// Journal of Materials Processing Technology, Volume 183, Issues 2-3, 23 March 2007, Pages 226-233
39. E. Luntta, J. Halttunen Neural network approach to ultrasonic flow measurements// Flow Measurement and Instrumentation, Volume 10, Issue 1, March 1999, Pages 35-43
40. T. D'Orazio, M. Leo, A. Distanto, C. Guaragnella, V. Pianese, G. Cavaccini Automatic ultrasonic inspection for internal defect detection in composite materials// NDT & E International, Volume 41, Issue 2, March 2008, Pages 145-154
41. Fairouz Bettayeb, Tarek Rachedi, Hamid Benbartoui An improved automated ultrasonic NDE system by wavelet and neuron networks// Ultrasonics, Volume 42, Issues 1-9, April 2004, Pages 853-858
42. O. A. Agapkin, Yu. V. Orlov, I. G. Persiantsev, S. A. Dolenko Preprocessing ultrasonic scanning data with the help of Hopfield-style neural network// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 502, Issues 2-3, 21 April 2003, Pages 520-522
43. F. W. Margrave, K. Rigas, D. A. Bradley, P. Barrowcliffe The use of neural networks in ultrasonic flaw detection// Measurement, Volume 25, Issue 2, March 1999, Pages 143-154
44. J. R. Llata, E. G. Sarabia, J. P. Oria Fuzzy expert system with double knowledge base for ultrasonic classification// Expert Systems with Applications, Volume 20, Issue 4, May 2001, Pages 347-355
45. S. W. Liu, Jin H. Huang, J. C. Sung, C. C. Lee Detection of cracks using neural networks and computational mechanics// Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Volume 191, Issues 25-26, 12 April 2002, Pages 2831-2845
46. Ming-Huwi Horng Multi-class support vector machine for classification of the ultrasonic images of supraspinatus// Expert Systems with Applications, Volume 36, Issue 4, May 2009, Pages 8124-8133
47. N. Ruiz-Reyes, P. Vera-Candeas, J. Curpián-Alonso, J.C. Cuevas-Martínez, J.L. Blanco-Claraco High-resolution pursuit for detecting flaw echoes close to the material surface in

- ultrasonic// NDT & E International, Volume 39, Issue 6, September 2006, Pages 487-492
48. Gregorio Andria, Filippo Attivissimo, Nicola Giaquinto Digital signal processing techniques for accurate ultrasonic sensor measurement// Measurement, Volume 30, Issue 2, September 2001, Pages 105-114
  49. I. Woloshyn, Industrial ultrasonics in the U.S.S.R. Ultrasonics, Volume 1, Issue 1, January-March 1963, Pages 14-6
  50. HosseinRavanbod Application of neuro-fuzzy techniques in oil pipeline ultrasonic nondestructive testing// NDT & E International, Volume 38, Issue 8, December 2005,Pages 643-653
  51. E.S. Furgason, V.L. Newhouse, N.M. Bilgutay, G.R. Cooper Application of random signal correlation techniques to ultrasonic flaw detection// Ultrasonics, Volume 13, Issue 1, 1 January 1975, Pages 11-17
  52. J. Hemp Theory of transit time ultrasonic flowmeters// Journal of Sound and Vibration, Volume 84, Issue 1, 8 September 1982, Pages 133-147
  53. Skorobogat, L.I.; Ivanov, V.G. Mathematical software for automated ultrasonic inspection system// NDT International, Volume 23, Issue 4, August 1990, Page 228
  54. A. Masnata, M. Sunseri Neural network classification of flaws detected by ultrasonic means// NDT & E International, Volume 29, Issue 2, April 1996, Pages 87-93
  55. A.R. Baker, C.G. Windsor The classification of defects from ultrasonic data using neural networks: The Hopfield method// NDT International, Volume 22, Issue 2, April 1989, Pages 97-105
  56. C.-P. Chiou Model-based ultrasonic flaw classification and sizing// NDT & E International, Volume 25, Issue 1, 1992, Page 2
  57. Sung-Jin Song, Hak-Joon Kim, Hyeon Cho Development of an intelligent system for ultrasonic flaw classification in weldments// Nuclear Engineering and Design, Volume 212, Issues 1-3, March 2002, Pages 307-320
  58. Kornelija Zgonc, Jan D. Achenbach A neural network for crack sizing trained by finite element calculations// NDT & E International, Volume 29, Issue 3, June 1996, Pages 147-155
  59. M. Thavasimuthu, C. Rajagopalan, P. Kalyanasundaram, Baldev Raj Improving the evaluation sensitivity of an ultrasonic pulse echo technique using a neural network classifier// NDT & E International, Volume 29, Issue 3, June 1996, Pages 175-179
  60. J.L. Rose, J.B. Nestleroth, E.G. Poplawski Flaw classification in

- welded plates using a microprocessor controlled flaw detector//  
NDT International, Volume 13, Issue 4, August 1980, Pages 159-
61. F. W. Margrave, K. Rigas, D. A. Bradley, P. Barrowcliffe The use of neural networks in ultrasonic flaw detection//  
Measurement, Volume 25, Issue 2, March 1999, Pages 143-154
  62. Zgonc, K. Achenbach A neural network for crack sizing trained by finite element calculations// NDT & E International, Vol. 29, No. 3, pp. 147–155 (Jun. 1996)
  63. M. Lorenz, T.S. Wielinga Ultrasonic characterization of defects in steel using Multi-SAFT imaging and neural networks// NDT & E International, Volume 26, Issue 3, June 1993, Pages 127-133
  64. P. Gallinari, S. Thiria, F. Badran, F. Fogelman-Soulie On the relations between discriminant analysis and multilayer perceptrons// Neural Networks, Volume 4, Issue 3, 1991, Pages 349-360

## AUTORA PUBLIKĀCIJAS

1. Л. Сергеева, А.Спунитис. Нейросетевой метод повышения достоверности результатов диагностики ответственных узлов электрического транспорта // The 11th Conference for Lithuanian Junior Researchers "Science – Lithuania's Future". – 2009. – 18.-22. lpp.
2. А.Спунитис, В. Миртов. Использование нейронных сетей для обработки результатов ультразвукового контроля осей колесных пар // "Trans-Mech-Art-Chem" труды V международная практическая конференцию – М.: МИИТ, 2008. – 212.-214. lpp.
3. А.Спунитис. Особенности проведения ультразвукового контроля для железнодорожных осей с болтовыми отверстиями // The 10th Conference for Lithuanian Junior Researchers "Science – Lithuania's Future". – 2008. – 44.-50. lpp.
4. А.Спунитис. Особенности ультразвукового контроля осей колесных пар вагонов // Проблемы безопасности на транспорте: материалы IV-я Международ. науч.-практ. конф. – ГомельЖ БелГУТ, 2007. – 95.-97. lpp.
5. Л.Сергеева, А.Спунитис. Новые информационные технологии для реализации единого информационного пространства на транспортных коридорах // Труды международной науч.-практ. Конф. "Логистика:современные тенденции развития СПб.:СПбГИЭУ, 2003. – 180.-183. lpp.
6. L.Sergejeva, A.Spunītis. XML-standarta izmantošana dokumentu elektroniskai apmaiņai // Rīgas Tehniskās universitātes zinātniskie raksti, 6.sērija "Mašīnzinātne un transports", 12. sējums RTU, Rīga, 2003.