

Методологія багатокласової діагностики складних просторових об'єктів

Методология многоклассовой диагностики сложных пространственных объектов

Methodology for multi-class diagnostics of complex spatial objects

1. **Номер державної реєстрації:** 0117U004259,
2. **Науковий керівник:** д.т.н., проф. Бурай Н.І., Бурай Н.И., Bouraou Nadiia I.
3. **Суть розробки, основні результати.**

(укр.)

На основі методів багатокласового розпізнавання та інформаційних технологій, методів оцінювання та прогнозування зміни технічного функціонального стану об'єктів розроблено методологію багатокласової діагностики складних просторових об'єктів зі зварними та/чи заклепковими з'єднаннями елементів за появи та розвитку багатоосередкових пошкоджень.

Розроблено та обґрунтовано загальну структуру та принцип функціонування системи багатокласової функціональної діагностики складних просторових об'єктів зі зварними та заклепковими з'єднаннями з підсистемою багатокласового розпізнавання на основі нейромережевого класифікатора. Для побудови класифікатора обґрунтовано використання імовірнісної нейронної мережі, як такої, що забезпечує нелінійне розділення на класи простору діагностичних ознак та має можливість у процесі тестування змінювати параметр впливу мережі для забезпечення максимально можливого значення вірогідності розпізнавання. Розроблено та обґрунтовано загальну структуру нейромережевого класифікатора для багатокласового розпізнавання стану зварного резервуару при вирішенні таких діагностичних завдань: локалізація одиничного та багатоосередкового пошкодження; моніторинг розвитку пошкодження; моніторинг деградації конструкції.

Для багатокласового розпізнавання обґрунтовано класи технічних станів об'єкта та розроблено інформаційні моделі процесів формування навчальних та тестових множин багатовимірних векторів діагностичних ознак, які характеризують бездефектний та дефектні класи стану об'єкта, побудовано матриці зв'язності, обґрунтовано структуру вагових матриць, розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для програмної реалізації нейромережевого класифікатора. Проведено моделювання процесів багатокласового розпізнавання розробленим класифікатором, встановлено залежності вірогідності багатокласового розпізнавання від параметра впливу нейронної мережі для різних значень розмірності навчальних множин, розмірності векторів діагностичних ознак та порядків значень діагностичних ознак для різних класів технічних станів.

Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для прогнозування зміни рівня деформацій елементів конструкції об'єкта шляхом екстраполяції ліній тренду з метою отримання точкового значення прогнозу зміни рівня деформацій на зазначений період часу. Розроблено методики та основні рекомендації щодо багатокласової діагностики з використанням нейромережевих класифікаторів для вирішення задач виявлення та класифікації багатоосередкових пошкоджень об'єкта.

(рос.)

На основе методов многоклассового распознавания и информационных технологий, методов оценки и прогнозирования изменения технического функционального состояния объектов разработана методология многоклассовой диагностики сложных пространственных объектов со сварными и / или заклёпочными соединениями элементов при появлении и развитии многоочагового повреждения.

Разработаны и обоснованы общая структура и принцип функционирования системы многоклассовой функциональной диагностики сложных пространственных объектов со сварными и заклёпочными соединениями с подсистемой многоклассового распознавания на основе нейросетевого классификатора. Для построения классификатора

обосновано использование вероятностной нейронной сети, которая обеспечивает нелинейное разделение на классы пространства диагностических признаков и имеет возможность в процессе тестирования изменять параметр влияния сети для обеспечения максимально возможного значения вероятности распознавания. Разработаны и обоснованы общая структура нейросетевого классификатора для многоклассового распознавания состояния сварного резервуара при решении таких диагностических задач: локализация единичного и многоочагового повреждения; мониторинг развития повреждения; мониторинг деградации конструкции.

Для многоклассового распознавания обоснованно классы технических состояний объекта и разработаны информационные модели процессов формирования обучающих и тестовых множеств многомерных векторов диагностических признаков, характеризующих бездефектный и дефектные классы состояния объекта, построены матрицы связности, обоснованно структуру весовых матриц, разработано алгоритмическое и программное обеспечение для программной реализации нейросетевого классификатора. Проведено моделирование процессов многоклассового распознавания разработанным классификатором, установлены зависимости вероятности многоклассового распознавания от параметра влияния нейронной сети для различных значений размерности обучающих множеств, размерности векторов диагностических признаков и порядков значений диагностических признаков для различных классов технических состояний.

Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для прогнозирования изменения уровня деформаций элементов конструкции объекта путем экстраполяции линий тренда с целью получения точечного значения прогноза изменения уровня деформаций на указанный период времени. Разработаны методики и основные рекомендации по многоклассовой диагностике с использованием нейросетевых классификаторов для решения задач обнаружения и классификации многоочаговых повреждений объекта.

(англ.)

Methodology of multi-class diagnostics is developed for complex spatial objects with welded and / or riveted joints of elements in case of occurrence and development of multi-site damages on the basis of methods of multi-class recognition and information technologies, methods of estimation and prediction of change of technical condition of objects.

The general structure and principle of functioning of the system of multi-class diagnostics of complex spatial objects with welded and riveted connections with the multi-class recognition subsystem based on the neural network classifier are developed and substantiated. To construct the classifier, it is justified to use a probabilistic neural network as such, which provides a nonlinear classification of diagnostic features and is able to change the spread parameter of the network during the testing process to ensure the maximum possible value of recognition probability. The general structure of the neural network classifier for multi-class recognition of the condition of the welded tank in solving the following diagnostic problems is developed and substantiated: localization of single and multi-site damage; monitoring of damage propagation; monitoring of structural degradation.

The classes of the object conditions are grounded for the multi-class recognition, and information models of the processes of formation of training and test sets of multidimensional vectors of diagnostic features for defective and non-defective classes of the object condition are developed, the connectivity matrices are constructed, the structure of weight matrices is substantiated, software for implementation of neural network classifier is developed. The modeling of multi-class recognition processes by the developed classifier is carried out.

Software have been developed to predict the level of deformation of the structural elements of an object by extrapolating the trend lines to obtain the point value of the forecast of the level of deformation for a specified period of time. Techniques and basic recommendations for multi-class diagnostics using neural network classifiers have been developed to solve the problems of detecting and classifying of object's multi-site damages.

4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності

1. Патент України на корисну модель №129647 МПК G01M 7/00 Інформаційно-діагностичний комплекс для моніторингу технічного стану складних просторових об'єктів [Текст] Рупіч С.С., Бурау Н.І., Півторак Д.О., Цибульник С.О. (Україна); заявник та власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського. - №129647; заявл.13.04.2018 u201804012; опубл. 12.11.2018, Бюл. №21. – 4 с.
2. Свідоцтво № 71153 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Функція визначення розмаху сигналу» [Текст] Цибульник С.О., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник КПІ ім. Ігоря Сікорського. - №71763; заявл. 02.02.2017; зареєстровано 27.03.2017 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.
3. Свідоцтво № 71151 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Функція апроксимації даних за допомогою МНК у циклі while» [Текст] Цибульник С.О., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Цибульник С.О., Півторак Д.О. - №71761; заявл. 02.02.2017; зареєстровано 27.03.2017 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.
4. Свідоцтво № 71152 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Функція апроксимації даних за допомогою МНК у циклі for» [Текст] Цибульник С.О., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Цибульник С.О., Півторак Д.О. - №71762; заявл. 02.02.2017; зареєстровано 27.03.2017 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.
5. Свідоцтво № 71154 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Функція визначення коефіцієнта детермінації» [Текст] Цибульник С.О., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Цибульник С.О., Півторак Д.О. - №71764; заявл. 02.02.2017; зареєстровано 27.03.2017 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.
6. Свідоцтво №72820 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Функція визначення монотонності» [Текст] Цибульник С.О., Коменчук І.Є., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Цибульник С.О., Коменчук І.Є., Півторак Д.О. - №73434; заявл. 25.04.2017; зареєстровано 11.07.2017 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.
7. Свідоцтво №72821 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Програма розділення вектора на монотонні відрізки» [Текст] Цибульник С.О., Коменчук І.Є., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Цибульник С.О., Коменчук І.Є., Півторак Д.О. - №74276; заявл. 25.04.2017; зареєстровано 11.07.2017 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.
8. Свідоцтво № 81609 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Формування множини навчальних векторів для побудови нейромережевого класифікатора багатокласового розпізнавання з метою локалізації двох пошкоджень» [Текст] Рупіч С.С., Бурау Н.І., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Рупіч С.С., Бурау Н.І., Півторак Д.О. - № 81981; заявл. 09.07.2018; зареєстровано 21.09.2018 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.
9. Свідоцтво № 81610 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Формування множини навчальних векторів для побудови нейромережевого класифікатора багатокласового розпізнавання деградації конструкції при багатоосередковому пошкодженні» [Текст] Рупіч С.С., Бурау Н.І., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Рупіч С.С., Бурау Н.І., Півторак Д.О. - № 81985; заявл. 09.07.2018; зареєстровано 21.09.2018 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.

10. Свідоцтво № 81613 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Формування множини тестових векторів для побудови нейромережевого класифікатора багатокласового розпізнавання з метою моніторингу розвитку пошкодження» [Текст] Рупіч С.С., Бурау Н.І., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Рупіч С.С., Бурау Н.І., Півторак Д.О. - № 81991; заявл. 09.07.2018; зареєстровано 21.09.2018 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.
11. Свідоцтво № 81614 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Функція розділення сигналу на відрізки для апроксимації» [Текст] Цибульник С.О., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Цибульник С.О., Півторак Д.О. - № 81992; заявл. 09.07.2018; зареєстровано 21.09.2018 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.
12. Свідоцтво № 81615 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Функція перевертання векторів-рядків» [Текст] Цибульник С.О., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Цибульник С.О., Півторак Д.О. - № 81993; заявл. 09.07.2018; зареєстровано 21.09.2018 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.
13. Свідоцтво № 81679 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Формування множини тестових векторів для нейромережевого класифікатора багатокласового розпізнавання деградації конструкції при багатоосередковому пошкодженні» [Текст] Рупіч С.С., Бурау Н.І., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Рупіч С.С., Бурау Н.І., Півторак Д.О. - № 81979; заявл. 09.07.2018; зареєстровано 25.09.2018 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.
14. Свідоцтво № 81680 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Формування множини тестових векторів для побудови нейромережевого класифікатора багатокласового розпізнавання з метою локалізації двох пошкоджень» [Текст] Рупіч С.С., Бурау Н.І., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Рупіч С.С., Бурау Н.І., Півторак Д.О. - № 81980; заявл. 09.07.2018; зареєстровано 25.09.2018 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.
15. Свідоцтво № 81681 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Формування множини навчальних векторів для побудови нейромережевого класифікатора багатокласового розпізнавання з метою локалізації одиничного пошкодження конструкції» [Текст] Рупіч С.С., Бурау Н.І., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Рупіч С.С., Бурау Н.І., Півторак Д.О. - № 81983; заявл. 09.07.2018; зареєстровано 25.09.2018 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.
16. Свідоцтво № 81682 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Формування множини тестових векторів для побудови нейромережевого класифікатора багатокласового розпізнавання з метою локалізації одиничного пошкодження конструкції» [Текст] Рупіч С.С., Бурау Н.І., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Рупіч С.С., Бурау Н.І., Півторак Д.О. - № 81984; заявл. 09.07.2018; зареєстровано 25.09.2018 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.
17. Свідоцтво № 81683 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Формування множини навчальних векторів для побудови нейромережевого класифікатора багатокласового розпізнавання з метою моніторингу розвитку пошкодження» [Текст] Рупіч С.С., Бурау Н.І., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Рупіч С.С., Бурау Н.І., Півторак Д.О. - № 81986; заявл. 09.07.2018; зареєстровано 25.09.2018 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.
18. Свідоцтво № 88947 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Функція кускової апроксимації даних за допомогою МНК з

інтерполяцією» [Текст], Цибульник С.О., Коменчук І.Є., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Цибульник С.О., Коменчук І.Є., Півторак Д.О. - № 89512; заявл. 08.04.2019; зареєстровано 24.05.2019 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.

19. Свідоцтво № 88948 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Функція кускової апроксимації даних за допомогою МНК» [Текст], Цибульник С.О., Коменчук І.Є., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Цибульник С.О., Коменчук І.Є., Півторак Д.О. - № 89512; заявл. 08.04.2019; зареєстровано 24.05.2019 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.

20. Свідоцтво №28354 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Програма перегляду і збереження вхідних даних СОМ порта» [Текст] Платов І.М., Павловський О.М., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Платов І.М., Павловський О.М., Півторак Д.О. - №83254; заявл. 01.09.2018; зареєстровано 28.11.2019 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.

5. Порівняння зі світовими аналогами.

Результати перевищують кращі вітчизняні зразки та відповідають світовому рівню. Методологія багатокласової діагностики призначена для розробки і впровадження комплексних інтелектуальних систем моніторингу для забезпечення надійної та безвідмовної експлуатації складних просторових об'єктів авіаційної техніки, енергетики, нафтогазової галузі, спеціального призначення, для яких характерним є багатоосередкове пошкодження в місцях зварних та заклепкових з'єднань. В Україні відсутні такі дослідження та розробки.

6. Економічна привабливість для просування на ринок

Доцільним є впровадження результатів у практику контролю об'єктів критичної інфраструктури, резервуарів для зберігання еколого-небезпечних речовин, планерів літальних апаратів, інженерних споруд спеціального призначення, об'єктів машинобудування, енергетики, нафто-газо-транспортних систем, що матиме суттєву соціально-економічну значимість: **забезпечення збереження навколишнього середовища безпечна експлуатація відповідальних споруд та об'єктів; безпека життєдіяльності людей.**

7. Потенційні користувачі.

ДУ Національний антарктичний науковий центр, ТОВ «Конструкторське бюро контрольних приладів», ПАТ «НТК «Електронприлад», ДП «АНТОНОВ».

8. Стан готовності розробки - макетний зразок, методичне, алгоритмічне та програмне забезпечення.

9. Існуючі результати впровадження.

Результати (схеми, методики, алгоритмічне та програмне забезпечення) використано при розробці автоматизованої системи запобігання витокам палива на українській антарктичній станції «Академік Вернадський» на замовлення ДУ Національний антарктичний науковий центр (м. Київ). Алгоритмічне та програмне забезпечення для обробки сигналів використовується в ТОВ «КБ контрольних приладів» (м. Київ).

10. Назва підрозділу, телефон, e-mail.

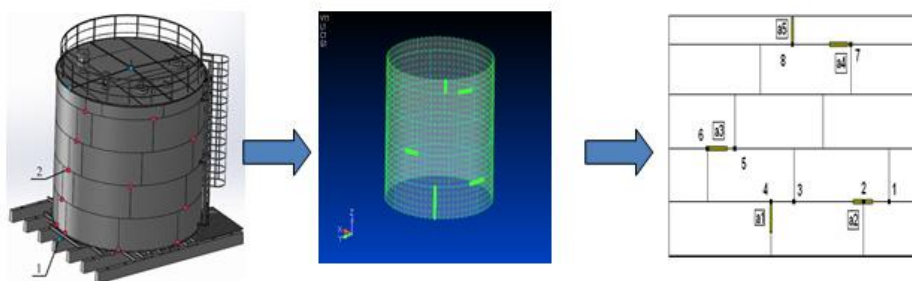
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», приладобудівний факультет, кафедра приладів і систем орієнтації і навігації. (044) 204-85-02, n.bureau@kpi.ua

11. Фото розробки

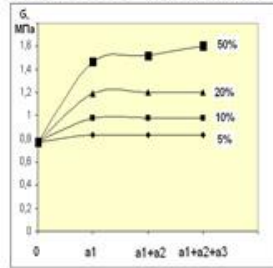


Функціональна схема системи моніторингу: БПП – блок первинних перетворювачів, що містить блоки акселерометрів (БА), тензорезисторів (БТ) та інклінометрів (БІ); АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; 1 – блок попередньої обробки; 2 – блок отримання зовнішніх даних; 3 – блок збереження даних; 4, 5, 6 – блоки обробки вібраційних, тензометричних та інклінометричних даних, відповідно; 7 – блок формування діагностичних ознак; 8 – блок збереження даних візуалізації; 9 – блок прогнозу; 10 – блок графічного відображення даних; НМК – неймережевий класифікатор; 11 – блок входних тестових множин; 12 – блок входних навчальних множин; 13 – блок прийняття рішення; 14 – пристрій аварійної сигналізації.

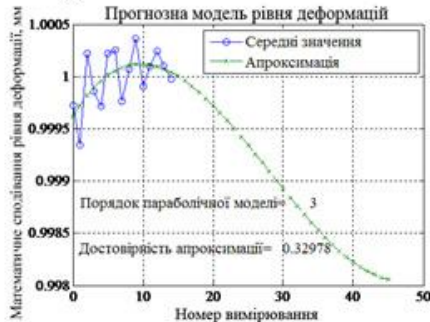
Багатокласове розпізнавання стану резервуару за зміною параметрів напружено-деформованого стану резервуару в місцях встановлення сенсорів



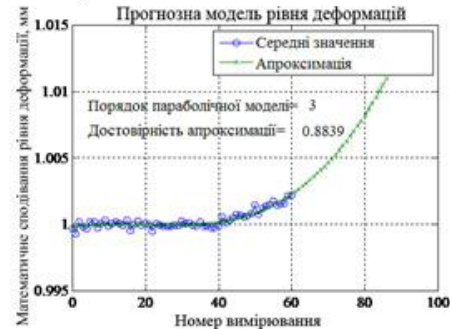
Прогнозування зміни напружено-деформованого стану



15 вимірювань



61 вимірювання



12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання (вагомі монографії, підручники, посібники, наукові статті, дисертації, інші публікації).

1. Рупіч С.С. «Багатокласове розпізнавання стану складного просторового об'єкта нейромережним класифікатором». Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2019.
2. Бурау Н.І. Структурний моніторинг вертикальних сталевих резервуарів: монографія/ Н.І. Бурау, О.О. Лук'янченко, О.В. Костіна, С.О. Цибульник. – К.: Видавництво Центр учебної літератури», 2019. – 160 с.
3. Bouraou N. Multi-Class Recognition Objects Technical Condition by Classifier based on Probabilistic Neural Network / N. Bouraou, D. Pivtorak, S. Rupich // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. - № 5/4 (89). – P. 24-31.
4. Bouraou N. Monitoring of the Crack Propagation in Welded Joint of the Tank Using Multi-Class Recognition /N.I.Bouraou, S.S. Rupich, O.O.Luk'yanchenko, O. V. Kostina // Vibrations in Physical Systems. – 2018. – Vol.29. – P. 1-8 (2018013).
5. Tsybulnyk S.O. Method of Determining the Strain Value From the Output Signal of the Fiber Optical Sensor / S.O. Tsybulnyk, D.O. Pivtorak // 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)/ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. – Kyiv, 2017. – P. 684-687.
6. Tsybulnyk S. Software for multi-site damage visualization / S. Tsybulnyk // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2018. – №5. – С.76-82.
7. Цибульник С.О. Прогнозування технічного стану обшивки літака. Геометричне моделювання/С.О. Цибульник, Б.О. Охота, А.Й. Товбер // Вісник Інженерної академії України. – 2019. – №1. – С. 17-21.
8. Бурау Н.І. Локалізація пошкодження складного просторового об'єкту класифікатором на основі імовірнісної нейронної мережі/ Н.І. Бурау, С.С. Рупіч// Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2017. - № 54(2). – С.12-19.
9. Bouraou N.I. Problems of Intellectualizing in SHM Systems: Estimation, Prediction, Multi-Class Recognition/ N.I. Bouraou, S.S. Rupich, S.O. Tsybulnyk // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2017. – №.4(88). – С. 135-144.
10. Tsybulnyk S. Information model of visualization subsystem of multi-class diagnosis system /S. Tsybulnyk // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія приладобудування. – 2018. – №55. – С. 38-43.

11. Цибульник С.О. Апроксимація неперіодичних сигналів в системах багатокласової діагностики / С.О. Цибульник, І.Є. Коменчук// Вісник НТУУ “КПІ”. Серія приладобудування. – 2019. – №57(1). – С. 5-14.

12. Рупіч С.С. Багатокласове розпізнавання технічного стану зварного резервуару з дефектами з використанням нейромережевого класифікатора/ С.С. Рупіч, О.О. Лук'янченко// Вісник КПІ. Серія Приладобудування. – 2019. – №58(2). – С.7-15.

13. Ключові слова до розробки: складні просторові об'єкти, багато осередкові пошкодження, структурний моніторинг, багато класове розпізнавання, локалізація пошкодження, моніторинг розвитку пошкоджень, нейромережевий класифікатор, обробка сигналів, візуалізація результатів, прогнозування технічного стану