

## **КОНТРОЛЬ І ДІАГНОСТИКА ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 629.735.083.2:620.179.1:004.032.26

### **БАГАТОКЛАСОВЕ РОЗПІЗНАВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЗВАРНОГО РЕЗЕРВУАРУ З ДЕФЕКТАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО КЛАСИФІКАТОРА**

<sup>1)</sup>Рупіч С. С., <sup>2)</sup>Лук'янченко О. О.

<sup>1)</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені  
Ігоря Сікорського», Київ, Україна

<sup>2)</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна  
E-mail: [serhii.rupich@gmail.com](mailto:serhii.rupich@gmail.com)

*Тенденції розвитку моніторингових систем частково або в повній мірі пов'язані з реалізацією принципів систем Structural Health Monitoring. Тому впровадження сучасних технологій є невід'ємною та необхідною частиною до реалізації підсистем діагностування та розпізнавання, що впроваджуються в складні комплексні моніторингові системи.*

*Потреба в таких системах пов'язана зі складністю та неоднорідністю внутрішніх процесів об'єктів контролю. Зазвичай, це складні просторові об'єкти, забезпечення цілісності яких може нести стратегічний характер. В роботі проведено дослідження поведінки реальної конструкції сталевого резервуару при появі та розвитку багатоосередкового пошкодження у місцях зварних швів.*

*При розробці системи багатокласового розпізнавання технічного стану зварних резервуарів необхідно ретельно дослідити зміну напружено-деформованого стану елементів конструкції під впливом експлуатаційних навантажень та можливого порушення його цілісності. Такі дослідження необхідні для визначення параметрів напружено-деформованого стану до появи та розвитку тріщин у зварних швах.*

*Багатоосередкове пошкодження представлено у вигляді трьох тріщин: одна вертикальна та дві горизонтальні. В статті наведено схему можливого розташування та розвитку тріщин, а також місця закріплення шести сенсорів. В роботі розглядаються два випадки виникнення дефектів. Перше дослідження пов'язано з розпізнаванням багатоосередкового пошкодження для локалізації одиничного пошкодження, тобто у випадку виникнення однієї з можливих тріщин. Другий випадок пов'язаний з багатоосередковим пошкодженням, тобто при одночасному виникненні двох та трьох тріщин.*

*Для проведеного аналізу ефективності багатокласового розпізнавання технічного стану об'єкта використано нейромережевий класифікатор, який побудований на основі ймовірнісної нейронної мережі. Отримані результати вказують на можливість та ефективність застосування такого класифікатора для розпізнавання тріщин у конструкції зварного резервуара.*

**Ключові слова:** багатокласове розпізнавання; вектор діагностичних ознак; нейромережевий класифікатор; локалізація багатоосередкового пошкодження.

#### **Вступ**

Широка інтеграція індустрії охоплює різні сфери життя та, здебільшого, стосується сфери технологій виробництва. Ця світова ініціатива об'єднується навколо напрямків досліджень, інновацій, навчання тощо в сфері виробничих технологій. Поява нових технологій та можливостей цифрових систем виводить створення відомих технологічних процесів на новий, більш якісний рівень.

Сучасні системи моніторингу є комплексними системними рішеннями, які поєднують операції виявлення дефектів і пошкоджень, їх діагностування, встановлення причин появи, прогнозування подальшого розвитку чи майбутнього виникнення

нових. Такі системи реалізують концепції та принципи систем Structural Health Monitoring (SHM) [1-2]. Вони застосовуються для визначення технічного стану (ТС) складних просторових об'єктів або їх елементів конструкції, що характеризуються складністю, нелінійністю внутрішніх процесів. Зазвичай комплексні системи моніторингу оперують великими масивами даних. Тому актуальним напрямом наукових досліджень є поєднання інтелектуалізованих, інтегрованих технологій для забезпечення неперервного функціонування складних просторових об'єктів.

У попередніх роботах було розглянуто застосування комплексної системи моніторингу для

зварного резервуару як об'єкту контролю [3-4]. Це є вертикальний сталевий резервуар, що експлуатується на антарктичній станції Академік Вернадський. Створена модель, що надає можливість дослідити поведінку реальної конструкції, визначити реакцію на зовнішні впливи. Як зазначається в [3], навантаження від ваги покрівлі та інших елементів моделюється у вигляді зосереджених сил, які прикладаються до вузлів верхньої кромки моделі.

У конструкції зварних резервуарів за умов впливу на них комплексного навантаження, є висока імовірність появи та розвитку багатоосередкового пошкодження (*multiple site damage MSD*). Одними з найпоширеніших дефектів зварних конструкцій є тріщини зварних швів. Деформація тіла визначається за допомогою відповідних переміщень його вузлів, а напружений стан за еквівалентними напруженнями.

Суть багатоосередкового пошкодження полягає в тому, що залишкова міцність конструкції з наявністю великої кількості концентраторів напруження (точки виникнення дефектів) не визначається довжиною одиначної, ізолюваної тріщини, а залежить від сукупності дефектів в місцях з'єднань, поява тріщин в яких викликає перерозподіл напруження вздовж розтину та вимагає врахування впливу однієї тріщини на іншу [5].

Оскільки багатоосередкове пошкодження має випадковий характер, то виявлення та прогнозування граничних станів елементів конструкції також виконується лише з використанням імовірнісного підходу. У попередніх роботах для вирішення задачі багатокласового розпізнавання ТС складних просторових об'єктів, до яких належать зварні резервуари, розроблено класифікатор на основі імовірнісної нейронної мережі (ІНМ) [6].

#### Багатокласове розпізнавання для локалізації одиничного пошкодження

Для дослідження напружено-деформованого стану зварного резервуару побудовано модель з дефектами: одна вертикальна ( $L_1$ ) і дві горизонтальні тріщини ( $L_2, L_3$ ) однакової довжини, які виникають послідовно одна за одною. Схема розташування та можливого розвитку тріщин, а також місця можливого розміщення 6-ти сенсорів, за інформацію з яких приймається рішення щодо стану резервуару, наведено на рис. 1 [3].

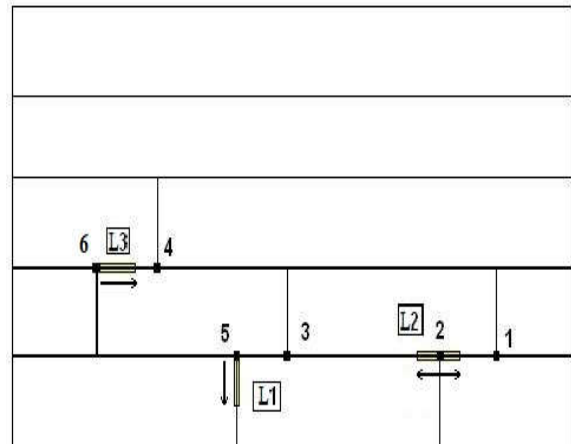


Рис. 1. Схема розташування та можливого розвитку тріщин  $L_1, L_2, L_3$  та можливі місця встановлення сенсорів

Проведено визначення максимальних значень напружень в місцях установки сенсорів при появі тріщин. Результати досліджень наведено в табл. 1 для випадку окремого виникнення тріщин  $L_1 - L_3$  з відносним розміром  $l/l = 5\%$ .

Таблиця 1. Значення напружень в стінці резервуару в місцях розташування сенсорів

Напруження в стінці резервуару з дефектами, МПа				
№ п/п сенсорів	$l/l = 0\%$	$l/l = 5\%$		
		$L_1$	$L_2$	$L_3$
1	0,62116	0,62116	0,62121	0,62116
2	1,30410	1,30410	0,90778	1,30410
3	0,59157	0,59155	0,59162	0,59151
4	0,71968	0,71981	0,71975	0,70582
5	0,76733	0,83244	0,76725	0,76712
6	0,66661	0,66674	0,66683	1,25081

У якості діагностичних ознак розглядається величина напруження в місцях установки чутливих елементів (ЧЕ). З наведених даних видно, що напруження в місцях встановлення сенсорів № 3, № 4 змінюються неоднозначно при появі тріщин. Тому для подальших досліджень не враховуються їх показники.

Для визначення стану об'єкта використовуємо багатовимірний вектор діагностичних ознак, який

для нашого прикладу містить чотири ознаки:

$$A_0 = (a_{01}; a_{02}; a_{05}; a_{06})^T.$$

Визначимо наступні чотири класи технічного стану об'єкта:

клас  $S_0$  – бездефектний стан (при допустимому відхиленні  $\Delta_0 = \pm 2,5\%$ );

клас  $S_l$  – локалізація виникнення пошкодження  $L_l$ ;

клас  $S_2$  – локалізація виникнення пошкодження  $L_2$ ;

клас  $S_3$  – локалізація виникнення пошкодження  $L_3$ .

Моніторинг виникнення пошкоджень виконується багатокласовим розпізнаванням технічного стану об'єкту контролю (ОК) за багатовимірним вектором діагностичних ознак  $A_0$ .

Використаємо алгоритм інформаційної моделі процесу формування множин навчальних і тестових векторів для багатокласового розпізнавання з метою моніторингу локалізації одиничного пошкодження [7]. Відповідно до цієї моделі були сформовані навчальні вектори діагностичних ознак для класів  $S_0 - S_3$ .

Сформовано дванадцять векторів діагностичних ознак для бездефектного класу  $S_0$ , до яких відносяться:

вектор  $A_0 = (a_{01}; a_{02}; a_{05}; a_{06})^T$ , складові якого є значеннями напруження в місцях розташування сенсорів для  $\Delta l / l = 0$  (табл. 1); задано допустиме відхилення  $\Delta_0 = \pm 2,5\%$  та отримані з  $A_0$  11 векторів, у яких всі діагностичні ознаки приймають значення від  $0,975 A_0$  до  $1,025 A_0$  з кроком  $0,005$ .

Для формування векторів діагностичних ознак, які характеризують класи  $S_1 - S_3$  дефектних станів об'єкта, встановимо такі діапазони значень:

- для класу  $S_1$  значення п'ятого первинного перетворювача змінюється від  $0,81$  до  $0,85$  з кроком  $0,005$ ;
- для класу  $S_2$  значення другого первинного перетворювача змінюється від  $0,9$  до  $1,2$  з кроком  $0,05$ ;
- для класу  $S_3$  значення шостого первинного перетворювача змінюється від  $1,1$  до  $1,4$  з кроком  $0,05$ .

Загальна кількість тренувальних векторів становить 35 векторів для всіх умов  $S_0 - S_3$ . Відповідно до множини навчальних векторів, встановлюється матриця зв'язності  $T_c$  приналежності кожної пари «вхід/ціль» [6].

Після навчання нейромережевого класифікатора, було визначено його ефективність за вхідними тестовими векторами значень напружень з табл. 1 при появі дефектів. Результат класифікації наведено на графіку залежності показника ефективності розпізнавання  $K$  від величини  $spread$  ІНМ (рис. 2).

Відповідно до отриманого результату, безпомилкове багатокласове розпізнавання стану об'єкту розробленим класифікатором досягається при параметрі впливу  $spread$  в діапазоні  $[8 \cdot 10^{-5}; 1 \cdot 10^{-2}]$  для вирішення задачі локалізації одиничних пошкоджень  $L_1, L_2, L_3$ .

#### Багатокласове розпізнавання для локалізації багатоосередкового пошкодження

Розглянемо випадок, коли відбувається поява

та розвиток декількох тріщин одночасно. Аналогічно до попередньої задачі, місця установки сенсорів залишаються без змін.

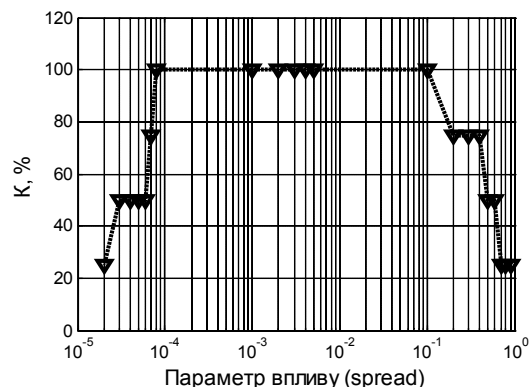


Рис. 2. Графік залежності вірогідності розпізнавання від параметру імовірнісної нейронної мережі  $spread$  при появі пошкоджень

Проведено визначення максимальних значень напружень. Для випадку появи та розвитку однієї тріщини  $L_1$  результати досліджень наведено в табл. 2. Для випадку одночасної появи та розвитку двох тріщин  $L_1+L_2$  результати досліджень наведено в табл. 3, та в табл. 4 – для випадку одночасної появи та розвитку трьох тріщин  $L_1+L_2+L_3$ .

Для надійної експлуатації система функціональної діагностики повинна реагувати на найменші зміни стану резервуару, тому для цього дослідження використаємо дані появи дефекту з відносним розміром  $l/l = 5\%$ .

На зміну напруження в стінці при появі тріщини  $L_1$  реагує чутливий елемент № 5 (табл. 2). На одночасну появу тріщин  $L_1+L_2$  (табл. 3) спостерігається зміна в показниках сенсорів № 2 та № 5, а на виникнення дефектів  $L_1+L_2+L_3$  (табл. 4) зафіксовані зміни з сенсорів № 2, № 5 та № 6. Чутливий елемент № 1 майже не реагує на появу тріщин, а сенсори № 3 та № 4 мають неоднозначні зміни показників.

Попередньо проведені дослідження показали, що використання у векторі діагностичних ознак більше 5-ти складових призводить до значного ускладнення системи. Тому не будемо враховувати в якості діагностичних ознак показники з сенсору № 1, оскільки величини їх напружень змінюються в малому околі значень порівняно з іншими.

Величини напружень в місцях установки ЧЕ № 2 – № 6 розглядаються в якості діагностичних ознак.

Для визначення стану об'єкта використовуємо багатовимірний вектор діагностичних ознак, який для цього випадку містить п'ять ознак:

$$A_0 = (a_{01}; a_{02}; a_{03}; a_{04}; a_{05})^T,$$

де  $a_{01} - a_{05}$  – це показники сенсорів № 2 – № 6 відповідно.

Таблиця 2. Значення напружень в стінці резервуару в місцях розташування сенсорів при появі та розвитку тріщини  $L_1$ 

№ п/п сенсорів	Напруження в стінці резервуару з дефектами, МПа				
	$\Delta l_1 / l_1 = 0$	$\Delta l_1 / l_1 = 0,05$	$\Delta l_1 / l_1 = 0,1$	$\Delta l_1 / l_1 = 0,2$	$\Delta l_1 / l_1 = 0,5$
1	0,62140	0,62116	0,62141	0,62145	0,62182
2	1,30410	1,30410	1,09380	1,09400	1,09460
3	0,59157	0,59155	0,60189	0,60268	0,59856
4	0,71968	0,71981	0,69143	0,69121	0,69117
5	0,76733	0,83244	0,97446	1,19560	1,46780
6	0,66661	0,66674	0,82045	0,82080	1,45710

Таблиця 3. Значення напружень в стінці резервуару в місцях розташування сенсорів при появі та розвитку тріщин  $L_1+L_2$ 

№ п/п сенсорів	Напруження в стінці резервуару з дефектами, МПа				
	$\Delta l_1 / l_1 = 0$	$\Delta l_1 / l_1 = 0,05$	$\Delta l_1 / l_1 = 0,1$	$\Delta l_1 / l_1 = 0,2$	$\Delta l_1 / l_1 = 0,5$
1	0,62140	0,62142	0,62170	0,62459	0,67330
2	1,30410	0,81758	0,61915	2,55720	0,97679
3	0,59157	0,60238	0,60224	0,60412	0,61870
4	0,71968	0,72340	0,69156	0,69167	0,69571
5	0,76733	0,83219	0,97372	1,19590	1,51340
6	0,66661	0,66688	0,82040	0,82069	1,46660

Таблиця 4. Значення напружень в стінці резервуару в місцях розташування сенсорів при появі та розвитку тріщин  $L_1+L_2+L_3$ 

№ п/п сенсорів	Напруження в стінці резервуару з дефектами, МПа				
	$\Delta l_1 / l_1 = 0$	$\Delta l_1 / l_1 = 0,05$	$\Delta l_1 / l_1 = 0,1$	$\Delta l_1 / l_1 = 0,2$	$\Delta l_1 / l_1 = 0,5$
1	0,62140	0,62146	0,62176	0,62488	0,67814
2	1,30410	0,81750	0,61922	2,55830	0,98487
3	0,59157	0,60234	0,60241	0,60493	0,63228
4	0,71968	0,72420	0,69189	0,69305	2,22080
5	0,76733	0,83215	0,97360	1,20310	1,60160
6	0,66661	1,25094	1,26486	1,35314	1,82342

Для завдання локалізації багатоосередкового пошкодження визначимо наступні чотири класи технічного стану ОК:

клас  $S_0$  – бездефектний стан (при допустимому відхиленні  $\Delta_0 = \pm 2,5\%$ );

клас  $S_1$  – локалізація виникнення пошкодження  $L_1$ ;

клас  $S_2$  – локалізація виникнення пошкодження  $L_1+L_2$ ;

клас  $S_3$  – локалізація виникнення пошкодження  $L_1+L_2+L_3$ .

Використаємо алгоритм інформаційної моделі процесу формування множин навчальних і тестових векторів для багатокласового розпізнавання з метою моніторингу локалізації багатоосередкового пошкодження [7]. Відповідно до цієї моделі були сформовані навчальні вектори діагностичних ознак для класів  $S_0 - S_3$ .

Сформовано дванадцять векторів діагностичних ознак для бездефектного класу  $S_0$ , до яких відносяться:

вектор  $A_0 = (a_{01}; a_{02}; a_{03}; a_{04}; a_{05})^T$ , складові якого є значеннями напруження в місцях розташування сенсорів для  $\Delta l / l = 0$ ;

задано допустиме відхилення  $\Delta_0 = \pm 2,5\%$  та отримані з  $A_0$  одинадцять векторів, у яких всі діагностичні ознаки приймають значення від  $0,975 A_0$  до  $1,025 A_0$  з кроком  $0,005$ .

Загальна кількість навчальних векторів становить сорок п'ять векторів для всіх умов  $S_0 - S_3$ .

Після навчання нейромережевого класифікатора, було визначено його ефективність за вхідними тестовими векторами значень напружень з табл. 2 – табл. 4 при появі дефектів. Результат класифікації наведено на графіку залежності показника ефективності розпізнавання  $K$  від величини *spread* ІНМ (рис. 3).

Отриманий результат показує, що безпомилкове багатокласове розпізнавання стану об'єкту для вирішення задачі локалізації багатоосередкового пошкодження (при появі дефектів  $L_1, L_1+L_2,$

$L_1+L_2+L_3$ ) розробленим класифікатором досягається при значеннях параметру впливу  $spread$  в діапазоні  $[0,002; 0,1]$ .

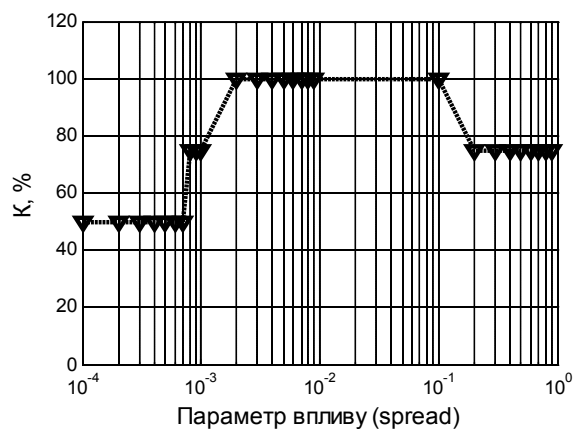


Рис. 3. Графік залежності вірогідності розпізнавання від параметру імовірнісної нейронної мережі  $spread$  при появі багатоосередкового пошкодження

#### Висновки

Проведено моделювання напружено-деформованого стану комп'ютерної моделі зварного резервуару з трьома тріщинами ( $L_1, L_2, L_3$ ) в зварних швах, які знаходяться у різних поясах оболонки.

В результаті визначено вплив появи та розвитку одиничного та багатоосередкового пошкодження (тріщин) на напруження в можливих місцях встановлення сенсорів. Сформовано багатовимірні вектори діагностичних ознак для завдань локалізації та моніторингу пошкоджень.

Проведено багатокласове розпізнавання стану ОК для локалізації одиничного пошкодження за даними сенсорів напружень, в результаті якого встановлено, що безпомилкове багатокласове розпізнавання стану об'єкту розробленим класифікатором досягається при параметрі впливу  $spread$  в діапазоні  $[8 \cdot 10^{-5}; 10^{-2}]$  для вирішення задачі локалізації одиничних пошкоджень  $L_1, L_2, L_3$ .

Проведено багатокласове розпізнавання стану ОК для локалізації багатоосередкового пошкодження для випадків одночасної появи однієї, двох та трьох тріщин за даними сенсорів напружень. Встановлено, що безпомилкове багатокласове розпізнавання стану об'єкту розробленим класифікатором досягається при параметрі впливу  $spread$  в діапазоні  $[0,002; 0,1]$ .

Отримані результати вказують на можливість та ефективність застосування класифікатора на основі ІНМ для розпізнавання тріщин у зварних швах резервуару. Ці результати можуть бути використані для подальшого дослідження з урахуванням випадкових величин відносних розмірів тріщин під час їх розповсюдження.

#### Література

- [1] D. Adams, *Health monitoring of structural materials and components: methods with applications*. John Wiley & Sons Ltd., 2007.
- [2] F.-K. Chang, *Structural health monitoring: advancements and challenges for implementation*. Pennsylvania: DEStech Publications, Inc., 2005.
- [3] N. Bouraou, O. Lukianchenko, S. Tsybulnik, D. Shevchuk, "Vibration condition monitoring of the vertical steel tanks", *Vibrations in Physical Systems*, 27, pp. 55 – 60, 2016.
- [4] N. Bouraou, S. Tsybulnik, D. Shevchuk, "The investigation of model of the vibration measuring channel of the complex monitoring system of vertical steel tanks", *EEJET*, 5/9, pp. 45 – 52, 2015.
- [5] С. Р. Ігнатович, М. В. Карускевич, *Мониторинг выработки усталостного ресурса летательных: монография*. Київ, Україна: НАУ, 2014.
- [6] N. Bouraou, D. Pivtorak, S. Rupich, "Multi-class recognition of objects technical condition by classifier based on Probabilistic Neural Network", *EEJET*, 5/4, pp. 24 – 30, 2017.
- [7] Н. І. Бурау, С. С. Рупіч, "Завдання та моделі багатокласової діагностики складних просторових об'єктів", *Вісник Інженерної Академії України*, № 3, с. 13-19, 2017.

УДК 629.735.083.2:620.179.1:004.032.26

<sup>1)</sup>С. С. Рупіч, <sup>2)</sup>О. О. Лук'яниченко

<sup>1)</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сикорського», Київ, Україна

<sup>2)</sup>Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна

#### МНОГОКЛАСОВОЕ РАСПОЗНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНОГО РЕЗЕРВУАРА С ДЕФЕКТАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТОВОГО КЛАССИФИКАТОРА

При разработке системы многоклассового распознавания технического состояния сварных резервуаров необходимо тщательно исследовать изменение напряженно-деформированного состояния элементов конструкции под влиянием эксплуатационных нагрузок и возможного нарушения его целостности. Такие исследования необходимы для определения параметров напряженно-деформированного состояния до появления и развития трещин

в сварных швах. Для проведенного анализа эффективности многоклассового распознавания технического состояния объекта использован нейросетевой классификатор.

**Ключевые слова:** многоклассовое распознавание; вектор диагностических признаков; нейросетевой классификатор; вероятностная нейронная сеть; локализация многоочагового повреждения.

<sup>1)</sup>S. Rupich, <sup>2)</sup>O. Lukianchenko

<sup>1)</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

<sup>2)</sup>Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine,

## MULTI-CLASS RECOGNITION FOR DETERMINATION THE TECHNICAL STATE OF THE WELDED JOINT TANK WITH DEFECTS BY USING NEURAL NETWORK CLASSIFIER

The paper shows the efficiency of the multi-class recognition of technical states the welded joint tank by using the neural network classifier that based on Probabilistic Neural Network.

Implementation of modern multichannel monitoring systems for determination the technical state of spatial objects requires researching of changes of a stress-strain state construction elements which function under the operation pressure and possible impact its structural integrity. Such researching are needed for prevention of cracks or damage determining and future prediction of object's technical state.

In the paper the tasks of a multi-class recognition of a state of multi-site damage the welded joint tank are determined. In the research was created the model of the object with probable location places cracks. One of them is a vertical crack and two are horizontal. Directions of their propagation are given. Cracks have the same value. The first researching included when cracks turn up one by one. The next one related with multi-focal defects when cracks were arised and they evolve in parallel and independently. The data of strain in the structural of the welded joint tank where sensors were attached is given.

The research of the possibility of the error-free recognition was conducted by the developed classifier based on the stress-strain state of the geometric model of the tank structural elements with multi-site damage, where sensors are located. The development of the classifier was done by using Probabilistic Neural Network, which provides the best results of a multi-class recognition for determination technical state of spatial object with multidimensional vectors of diagnostic features. As a result, the probability of recognition from the network influence parameter, which shows the effectiveness of the neural network classifier for localization of single damage and localization of multiple cracks, was established.

**Keywords:** multichannel recognition; diagnostic features vector; neural network's classifier; Probabilistic Neural Network; localization of damage; influence parameter.

Надійшла до редакції  
03 жовтня 2019 року

Рецензовано  
11 жовтня 2019 року

УДК 620.1: 54.03

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДО ВИВЧЕННЯ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ

<sup>1)</sup>Штофель О. О., <sup>2)</sup>Рабкина М. Д.

<sup>1)</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

<sup>2)</sup>Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ, Україна

E-mail: [o.shtof@gmail.com](mailto:o.shtof@gmail.com)

В роботі описується застосування методу фрактального аналізу на прикладі структури високоякісної конструкційної вуглецевої сталі марки 20К (вміст вуглецю 0.16-0.24 %), яка використовувалась для виготовлення обичайок ректифікаційних колон. Всі експерименти проводились при температурі від -50 °С до +50 °С. За марочником сталі властивості зразка змінюються не суттєво, а отже і похибка експерименту зводиться до мінімальної.