

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ФУНКЦІЙ ПРИНАЛЕЖНОСТІ
ТРИВИМІРНОГО ІНТЕРВАЛЬНОГО НЕЧІТКОГО КОНТРОЛЕРА
ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОЧИЩЕННЯ**

Мета. Визначити оптимальні значення для параметрів функцій приналежності тривимірного нечіткого інтервального контролера для підвищення енергоефективності процесу ультразвукового очищення.

Методи дослідження. Моделювання за допомогою наявних програмних засобів імітації розповсюдження високоінтенсивних ультразвукових хвиль.

Наукова новизна. На основі аналізу даних результатів моделювання процесу ультразвукового очищення отримано оптимальні значення для параметрів функцій приналежностей тривимірного нечіткого інтервального контролера, що керує процесом ультразвукового очищення.

Практична значимість. Встановлено залежності між параметрами функцій приналежностей тривимірного нечіткого інтервального контролера та коефіцієнтами інтенсивностей випромінювачів і сумарним значенням максимального тиску у забрудненій ділянці.

Результати. Було досліджено вплив параметрів верхньої та нижньої функцій приналежностей, які задані як експоненційні залежності із максимальним значенням при мінімальній відстані між випромінювачем та датчиком. Під час аналізу отриманих даних виявлено наступні закономірності: на перших етапах очищення спостерігаються максимальне та мінімальне значення вихідних коефіцієнтів інтенсивностей для одних і тих же випромінювачів (для найближчого випромінювача – 1, для найдалшого – 0), але спостерігаються незначні коливання для інших. Але за рахунок цих коливань є ефект накопичування різниці і на останньому етапі очищення основний випромінювач для різних значень параметрів функцій приналежностей не завжди співпадає. За основний критерій ефективності ультразвукового очищення було прийнято сумарне значення максимального тиску у забрудненій області. Оптимальним виявилися значення для параметрів функцій приналежностей $\sigma_1 = 0.1$ та $\sigma_2 = 4$. Зменшення σ_1 спотворювало роботу алгоритму взагалі, бо відбувалося ділення на число близьке до 0. Розширення інтервалу шляхом збільшення σ_2 призвело до зменшення прийнято сумарне значення максимального тиску у забрудненій області. Таким чином, параметри σ_1 та σ_2 знаходяться на значному інтервалі, при цьому σ_1 досить близько до 0, а значення σ_2 треба визначати в залежності від співвідношення кількості випромінювачів та датчиків, бо збільшення різниці між σ_1 та σ_2 після певного значення ефекту не має.

Ключові слова: тривимірний нечіткий інтервальний контролер, функція приналежності, моделювання, ультразвукове очищення.

doi:10.31721/2306-5451-2022-1-54-173-178

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами. Ефективне очищення одна із заповорок тривалої експлуатації обладнання та можливості проведення поточних ремонтів. Це особливо важливо у таких забруднених галузях виробництва, як видобувна та збагачувальна промисловість. Вартість ультразвукового очищення, насамперед, залежить від кількості енергії, що витрачається в процесі. Для її зниження проводяться дослідження як відносно покращення фізико-хімічних умов очищення [1, 2], так і удосконалення керування цим процесом. У ряді робіт [3, 4] було запропоновано для підвищення його енергоефективності шляхом обробки лише тих ділянок, які цього потребують, використовувати тривимірний інтервальний нечіткий контролер, вхідними даними є зміна ультразвукових відгуків у декількох заданих позиціях. Функції приналежності цього контролера залежать від відстані між основним випромінювачем та датчиком і від просторових параметрів, що описує співвідношення кількості випромінювачів та датчиків. Для збільшення енергоефективності процесу ультразвукового очищення було проведено дослідження щодо оптимізації цих параметрів.

Аналіз досліджень та публікацій. Для ультразвукового очищення, як і для багатьох інших фізичних процесів, характерна наявність сильних просторових варіацій. Це пов'язано з зональністю основної рушійної сили такого виду очищення – кавітації та із нерівномірністю забруднення, а, відповідно і відшаровування бруду, очищувального тіла. Такі системи називаються системами із розподіленими параметрами (СРП). Існують різні підходи до керування подібними системами. Один з найбільш популярних – приведення до системи із розподіленими параметрами шляхом дискретизації загального об'єкта управління на етапі проектування управління – так зване «раннє зосередження параметрів». У такому випадку керування систем можна будувати, спираючись на традиційні методи, але втрачаються основні теоретичні властивості управління – керованість, спостережливість та стабільність [5, 6]. Це приводить до розробки

контролерів, які складно реалізувати [5]. Інший підхід «пізнє зосередження» передбачає, що спрощення відбувається на етапі реалізації контролера. Це дозволяє уникнути втрати розподіленої природи СРП та повністю використати їх природні властивості. Однак безпосереднє поводження з СРП викликає труднощі, бо математичні моделі таких систем є досить складним та мають в своїй основі диференціальні рівняння у частинних похідних, інтегральні рівняння, інтегродиференціальні рівняння або системи рівнянь різної природи.

Окрім класичних підходів до СРП успішним виявився геометричний контроль [57, 58]. Розробка закону управління на основі геометричної теорії управління дає перевагу в тому, що модель PDE може бути використана в конструкції управління без наближення. Це дозволяє зберегти основні теоретичні властивості управління з урахуванням розподіленої природи системи [5, 6]. Крім того, управління на основі геометричного управління не вимагає складних розрахунків [7]. Але все це модельні методи, тобто основна їхня вимога – це наявність точної математичної моделі. Значна кількість систем реального світу, в тому числі і ультразвукове очищення, мають невідомі параметри або дуже складні та нелінійні характеристики. Точні моделі для таких систем важко отримати або вони призводять до дуже складних контролерів, які викликають труднощі у застосуванні. Ультразвукове очищення не має чіткої математичної моделі, оскільки основне фізичне явище, що його продукує – кавітація досі аналітично не описано. Тому для таких випадків доцільно використовувати більш сучасні методи управління за допомогою нечіткої логіки або нейромереж. Методика керування із використанням технології навчання згорткових нейромереж уже розроблена для ультразвукового очищення трубопроводів [8, 9]. Навчання таких мереж відбувається за основним принципом незворотності процесу очищування, тобто будь-які зміни у показниках датчиків є свідченням, що відбувалося очищення об'єкту. При цьому геометрична форма очищувального об'єкту лишалась постійною. Такий підхід продемонстрував ефективність у випадку очищення трубопроводів, але у загальному випадку при роботі з різним обладнанням є недоцільним, оскільки вимагає охоплювати навчання для всіх конфігурацій очищувальних тіл. Нечітка логіка вільна від цих недоліків, до того ж демонструє ефективність застосування у різних галузях промисловості.

Для багатьох систем реального світу, які є дуже складними і за своєю суттю нелінійними, традиційні підходи моделювання часто не застосовуються, тоді як нечіткий підхід може бути єдиним життєздатним варіантом. З моменту розробки методології використання нечіткої логіки Заде [10] постійно розширюється, як її застосування, так і сама методологія. Для більш складних нелінійних систем в умовах непевної експертної оцінки параметрів Заде [11] запропонував розширення функції приналежності до лінгвістичної змінної із власними ймовірностями. Такий підхід виявився досить складним для практичного використання та у реальних застосунках відбулося спрощено до інтервальних множин типу 2 [12], контролери на основі яких стали розповсюдженими не лише у системах прийняття рішень [13], попередній обробці даних [14], оцінці якості послуг [15], але й у промисловості та господарстві. Але для врахування особливої природи систем із розподіленими параметрами нечітка логіка вимагала їхньої дискретизації та спрощення, що значно обмежувало її ефективність. Рішенням цієї проблеми стало просторове розширення нечіткої множини до тривимірної у серії робіт [16, 17] для врахування природніх особливостей систем із просторово розподіленими параметрами.

Ультразвукове очищення характеризується не лише просторовою розподіленістю, але й ускладнюється непевністю експертної оцінки вхідних параметрів. Тому було запропоновано [3, 4] для керування цим процесом використовувати тривимірний нечіткий контролер, нижня та верхня функції приналежностей на етапі фазифікації виглядають наступним [4]

$$\begin{aligned}\underline{\mu}(x_i, z) &= \exp \left(- \frac{\left((x_i - a)^2 + \left(2|z - z_0| - 1 - 1 \right)^2 \right)}{\sigma_1} \right), \\ \overline{\mu}(x_i, z) &= \exp \left(- \frac{\left((x_i - a)^2 + \left(2|z - z_0| - 1 - 1 \right)^2 \right)}{\sigma_2} \right), \\ i &= 1, 2, z = (z_1, z_2, \dots, z_p)\end{aligned}\tag{1}$$

де $\underline{\mu}(x, z)$ та $\overline{\mu}(x, z)$ - верхнє та нижнє значення функції приналежності, x - чіткий вхід, z - радіальна координата входу, a - значення лінгвістичної мітки, при якій функція приналежності набуває максимального значення: для значного (L) - $a = 1$, середнього (M) - $a = 0.5$ та для малого (S) - $a = 0$, z_0 - значення просторової радіальної координати виходу, σ_1 та σ_2 - параметри, що визначаються за фізичними особливостями ємності для очищування та кількість датчиків та виході та належать інтервалу $[0, 1]$, i - кількість змінних. Графічна ілюстрація для лінгвістичної мітки середнє (M) та для виходу $z_0 = 0.2$ та для мітки мале (S) та для виходу $z_0 = 0.5$ наведено на рис. 1, при цьому $\sigma_1 = 0.1$ та $\sigma_2 = 0.2$.

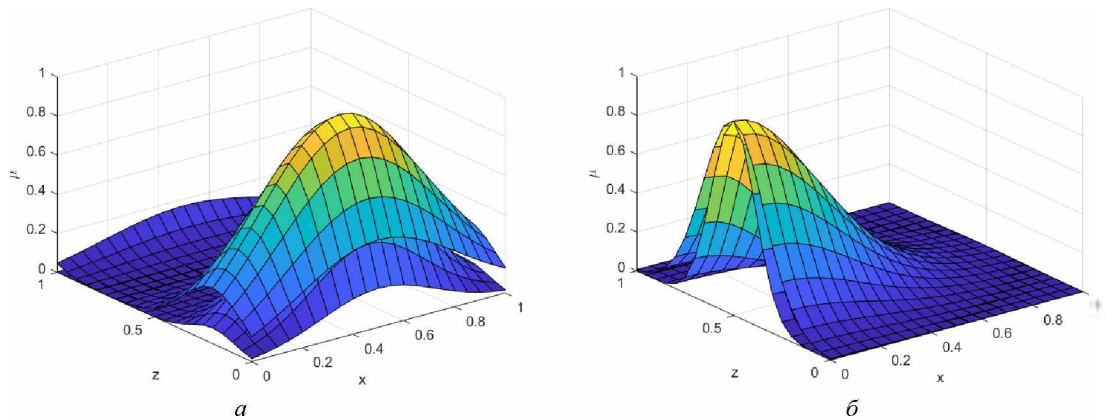


Рис. 1. Графіки верхньої та нижньої функції приналежностей: а - для мітки середнє (M) для виходу $z_0 = 0.2$; б - для мітки мале (S) для виходу $z_0 = 0.5$

Тобто функції визначені як залежність із максимальним значенням впливу при мінімальній відстані між випромінювачем та сенсором, що характерно для складного фізичного процесу розповсюдження ультразвукових хвиль і підтверджується результатами моделювання [18, 19].

Постановка задачі. Для підвищення енергоефективності процесу ультразвукового очищення із використанням тривимірному нечіткого інтервального контролера необхідно дослідити залежність між значенням просторових коефіцієнтів функції приналежностей та значенням вихідних даних інтенсивностей випромінювачів. Ефективність процесу буде визначатися за сумарним значенням максимального тиску у забрудненій області.

Викладення матеріалу та результати. Розглянемо, як змінюється вигляд верхньої та нижньої функції приналежності при змінні значення параметрів $\sigma_1 = 0.1$ та $\sigma_2 = 0.2$ (рис. 2).

З наведених графіків на рис. 2 чітко простежується пряма залежність між параметрами σ_1 та σ_2 та розмірами області, на якій функція прийматиме високе значення. А це у нашому випадку вплив даних, що отримані з поточного сенсора на значення інтенсивності, що буде розраховано для визначеного випромінювача. Фізично формування цього співвідношення визначається кількістю сенсорів, тобто чим більше датчиків, тим дужче збільшується вплив на результат відстані між датчиком та сенсором. Якщо ж датчиків менше, то, за рахунок параметрів просторової функції приналежності, відбувається розширення області впливу показників датчику на інтенсивність випромінювача. Отже, вибір значень для σ_1 та σ_2 повинен визначатися геометричними особливостями конструкції ультразвукової ванни та співвідношенням кількості сенсорів та випромінювачів.

Для визначення впливу параметрів функцій приналежності було проведено моделювання процесу очищення за допомогою програмного засобу k-wave [20]. У якості очищувального виробу обрано астрійду, що має забруднення на одній із сторін (рис. 3). Визначено 4 випромінювачі та 4 сенсори (рис. 3а, в). Відшаровування забруднення фіксується у випадку наявності максимального амплітудного тиску вище 50% від максимального. Було зафіксовано значення вихідних потужностей на кожному етапі очищення для всіх випромінювачів (табл.1).

За отриманими результатами можна зробити висновок, що на першому етапі відбувається незначне коливання інтенсивностей для кожного з випромінювачів. Так, маємо однаковий максимальний коефіцієнт для випромінювача 3 та 0 для випромінювача 1. На другому кроці знову значення відрізняються не дуже суттєво, максимальне значення у коефіцієнта для 3 випромі-

нювача зберігається майже для всіх значень σ_1 та σ_2 , а вже на третьому кроці враховуючи різниця накопичується і стає більше суттєвою (табл. 1).

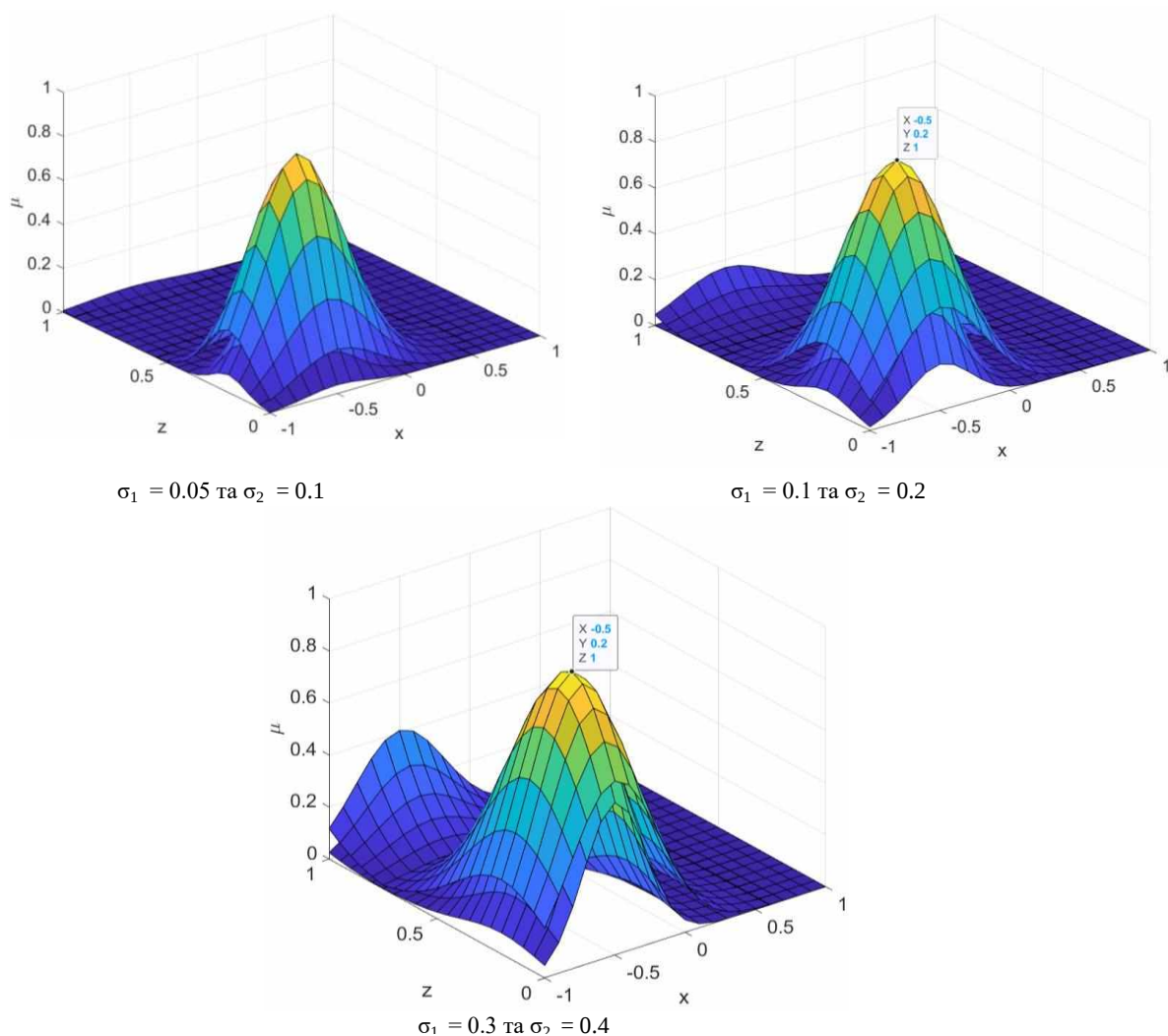


Рис.2. Вигляд верхньої та нижньої функції приналежності при різних значеннях σ_1 та σ_2

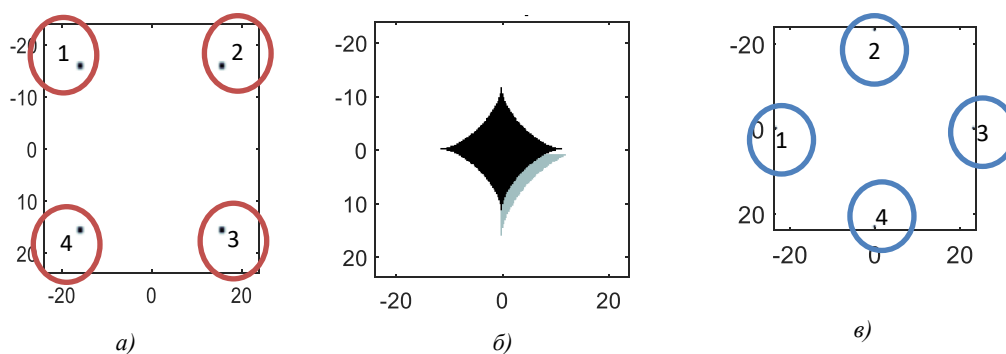


Рис. 3. Початкові умови експерименту: а – розташування випромінювачів; б – вигляд очищувального тіла, в – розташування датчиків

Для визначення найбільш ефективних значень для коефіцієнтів функцій приналежності також було зафіксовано та проаналізовано сумарне значення максимального тиску у забрудненій області (табл.2).

Таким чином було визначено, що встановлення значного проміжку між значеннями нижньої та верхньої функцій приналежності дозволяє збільшити сумарне значення

максимального тиску у забрудненій ділянці ($\sigma_1 = 0.1$ та $\sigma_2 = 4$). При цьому проміжок повинен мати охоплювати проміжок близький до 0, але занадто низькі значення викликають спотворення роботи алгоритму, бо відбувається ділення на число близьке до 0. У ширших діапазонах 4 – 10, 0.1 – 6 збільшення сумарного значення максимального тиску не спостерігається, тому сенсу збільшувати різницю між параметрами немає.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів інтенсивностей в залежності від параметрів верхньої та нижньої функцій приналежності

σ_1	σ_2	Значення коефіцієнтів інтенсивностей		
		Крок 1	Крок 2	Крок 3
0.1	0.2	[0 0.7394 1.0 0.30]	[0 0.9623 1.0 0.3497]	[0.9242 1.0 0 0.1329]
0.05	0.3	[0 0.7599 1.0 0.2507]	[0 0.9980 1.0 0.3848]	[1.0 0.9804 0 0.7174]
0.2	0.3	[0 0.6729 1.0 0.2793]	[0 0.8609 1.0 0.1859]	[0.8293 1.0 0.1329 0]
1	2	[0 0.7808 1.0 0.0238]	[0 1.00 0.9996 0.1137]	[0.9803 1.0 0.0154 0]
2	4	[0 0.8692 1.0 0.0226]	[0.0062 1.0 0.9966 0]	[0.9512 1.0 0.0527 0]
4	10	[0 0.8757 1.0 0.057]	[0 1.0 0.9998 0.0070]	[0.8918 1.0 0.1121]
0.05	4	[0 0.8344 1.0 0.2284]	[0.0451 1.0 0.9524 0]	[1.0000 0.9933 0 0.2839]
0.1	3	[0 0.7364 1.0 0.2472]	[0 0.9687 1.0 0.2686]	[0 0.6346 0.8521 1.0]
0.1	4	[0 0.7341 1.0 0.2514]	[0 0.9679 1.0 0.2623]	[0 0.4224 0.9148 1.0]
0.2	4	[0 0.6574 1.0 0.2705]	[0 0.8496 1.0 0.1165]	[0.8051 1.0 0.1570 0]
0.1	6	[0 0.7312 1.0 0.2557]	[0 0.8857 1.0 0.1567]	[0.9768 1.0 0 0.3297]

Таблиця 2

Значення сумарного максимального тиску у забрудненій області в залежності від параметрів верхньої та нижньої функцій приналежності

σ_1	σ_2	Значення тиску у забрудненій області по циклам	Сумарне значення максимального тиску у забрудненій області
0.1	0.2	495.3132 273.1203 276.6086 155.2428	1200.285
0.05	0.3	495.3132 273.4274 277.3228 171.6029	1217.666
0.2	0.3	495.3132 271.9871 275.2510 154.4850	1197.036
1	2	495.3132 273.7749 276.9128 156.2014	1202.202
2	4	495.3132 275.4046 275.4549 156.2563	1202.429
4	10	495.3132 275.5146 276.1673 156.0654	1203.0605
0.05	4	495.3132 274.7576 264.6041 157.5443	1192.219
0.1	3	495.3132 273.0258 276.6787 240.6167	1285.634
0.1	4	495.3132 272.9891 276.6567 252.0307	1296.99
0.2	4	495.3132 271.7268 274.9971 154.6622	1196.699
0.1	6	495.3132 272.9440 275.1746 158.5947	1202.027

Висновки та напрями подальших досліджень. Було проведено дослідження впливу параметрів функцій приналежності на ефективність процесу ультразвукового очищення при використанні тривимірного нечіткого інтервального контролера. На основі моделювання встановлено, що зміна значень цих параметрів на початкових етапах майже не впливає на розраховані значення коефіцієнтів інтенсивностей випромінювачів, але має властивість накопичуватися. За основний критерій ефективності було прийнято сумарне значення максимального тиску у забрудненій області. Максимальне значення цього показника отримано при встановленні значного проміжку між параметрами верхньої та нижньої функцій приналежності, при цьому нижнє значення знаходиться не нижче 0.1, бо тоді відбувається ділення на число близьке до 0 і спотворюється робота алгоритму. Збільшення параметру верхньої функції приналежності до певного значення забезпечує зростання ефективності, а потім починає спадати.

Список літератури

1. **Tangsopha W., Thongsri J.** A Novel Ultrasonic Cleaning Tank Developed by Harmonic Response Analysis and Computational Fluid Dynamics, Metals, Vol. 10(335), 1-18 (2020).
2. **Tangsopha W., Thongsri J., Busayaporn W.** Simulation of ultrasonic cleaning and ways to improve the efficiency. 5th International Electrical Engineering Congress, 8-10 (2017).
3. **Morkun V., Kravchenko O.** Adaptive control over ultrasonic cleaning of mining equipment. *Ukrainian School of Mining Engineering - 2020, E3S Web of Conferences 201*, 01005 (2020).
4. **Morkun V., Kravchenko O.** Three-Dimensional Fuzzy Control of Ultrasonic Cleaning. *Acta Mechanica et Automatica*, vol. 15, № 3, pp. 169-176 (2021).
5. **Christofides P.** Nonlinear and Robust Control of PDE Systems: Methods and Applications to Transport-Reaction Processes, Boston: Birkhuser, 2001.
6. **Ray. W. H.** Advanced process control, Boston: Butterworths, 1989.

7. **Maidi A., Corriou J.-P.**, Boundary Control of Nonlinear Distributed Parameter Systems by Input-Output Linearization. *Preprints of the 18th IFAC World Congress*, Milano (Italy) (2011).
8. **Rajani C., Klami A., Salmi A., Rauhala T., Haeggström E., Myllymäki, P.** Detecting Industrial Fouling by Monotonicity during Ultrasonic Cleaning. In *2018 IEEE 28th International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP) IEEE*, 1-6 (2018).
9. **Simeone, A., Woolley, E., Escrig, J., Watson, N.J.** Intelligent Industrial Cleaning: A Multi-Sensor Approach Utilising Machine Learning-Based Regression. *Sensors* 2020, 20, 3642 (2020).
10. **Zadeh L. A.** Fuzzy sets. *Information & Control*, № 8, pp. 338-353 (1965).
11. **Zadeh, L.A.** The Concept of a Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning-1. *Information Sciences*, 8, 199-249 (1975).
12. **Mendel J., John R., Liu F.** Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol 14, № 6, pp. 808-821 (2006).
13. **Namvar H., Bamdad S.** Resilience-based efficiency measurement of process industries with type-2 fuzzy sets. *International Journal of Fuzzy Systems*, vol. 23, № 4, pp. 1122-1136 (2021).
14. **Shukla A. K., Yadav M., Kumar S., Muhuri P. K.** Veracity handling and instance reduction in big data using interval type-2 fuzzy sets. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 88, № 103315 (2020).
15. **Wang, H., Yao, J., Zhang, X.** An Area Similarity Measure for Trapezoidal Interval Type-2 Fuzzy Sets and Its Application to Service Quality Evaluation. *Int. J. Fuzzy Syst.* 23, 2252–2269 (2021).
16. **Li H., Zhang X., Li, S.** A Three-Dimensional Fuzzy Control Methodology for a Class of Distributed Parameter Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 15(3), 470-481 (2007).
17. **Xian-Xia Zhang, Zhi-Qiang Fu, Shao-Yuan Li, Tao Zou, Bing Wang.** A Time/Space Separation Based 3D Fuzzy Modeling Approach for Nonlinear Spatially Distributed Systems. *International Journal of Automation and Computing*, vol. 15, no. 1, pp. 52-65 (2018).
18. **Моркун В.С., Кравченко О.М.** Моделювання процесу очищення виробів складної конфігурації високоенергетичним ультразвуком, – *Кривий Ріг: Вісник Криворізького національного університету*. Вип. 50. С. 62-68 (2020).
19. **Моркун В.С., Кравченко О.М.** Моделювання параметрів ультразвукового поля в процесі очищення виробів складної конфігурації, – *Кривий Ріг: Гірничий вісник*. Вип. 107. С. 3-10 (2020).
20. **Treeby B.E., Cox T.** (2010), k-Wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave fields, *Journal of Biomedical Optics*, Vol. 15(2), 021314 (2010).

УДК 550.34.013

Д.В. БРОВКО, д-р техн. наук, доц., Криворізький національний університет,
 А.О. РОМАНЕНКО, канд. техн. наук, маркшейдер кар'єру по нагляду за зрушенням гірничих порід, ПРАТ «ЦГЗК»,
 В.Д. СИДОРЕНКО, д-р техн. наук, проф., Криворізький національний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ВІДСТАНІ ДО СЕЙСМІЧНОГО ЯВИЩА В МЕЖАХ КАР'ЄРНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВІ ЗВУКОМЕТРИЧНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ

Мета. Розробка способу визначення відстані до геофізичного явища з однієї віддаленої точки вимірювання, відповідно з використанням тільки одного трикоординатного сейсмозонда.

Методика дослідження базується на методах математичної статистики, системному аналітичному підході щодо розробки оптимального методу визначення відстані до сейсмічного явища на основі відомих теорій.

Методи дослідження. При проведенні досліджень використовувались методи математичної статистики та логіки, системно-структурного та порівняльного аналізу, узагальнення, систематизації та класифікації.

Наукова новизна одержаних результатів. Полягає у розробці алгоритму проведення досліджень з визначення відстані до сейсмічного явища, використовуючи лише один трохканальний зонд.

Практична значимість: Визначення та інтерпретація результатів замірів трохканальним зондом, в перспективі, дає можливість не тільки ідентифікувати явище, але й визначити відстань до нього, що дає змогу контролювати перерозподіл напружень в гірському масиві.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі отриманих даних можна характеризувати порушеність структури масиву та інтенсивність внутрішнього руйнування масиву у шахтних виробках, які знаходяться в межах кар'єрного поля. Завдяки сукупності відомих і нових суттєвих ознак стало можливим визначати відстань до геомеханічного явища з тільки однієї доступної віддаленої точки вимірювання, відповідно з використанням тільки одного трикоординатного сейсмозонда. Це дає можливість прогнозувати вплив пустоти або вихід воронки на поверхню.

Результати: використання відношення тривалості сигналу до амплітуди сигналу дозволяє компенсувати вплив енергії явища на залежності тривалості і амплітуди від відстані, що в свою чергу дозволяє забезпечити точність визначення відстані відповідну точності вимірювань протяжності і амплітуди при широкому діапазоні коливань