

**ДОСЛІДЖЕННЯ АДЕКВАТНОСТІ ІНТЕРВАЛЬНИХ  
НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ ТИПУ 2 В ЗАДАЧАХ  
ІДЕНТИФІКАЦІЇ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ**

**Н.Р. КОНДРАТЕНКО, О.О. СНИГУР**

**Анотація.** Запропоновано метод побудови множини нечітких моделей типу 2 з інтервальними функціями належності, який має властивість узагальнювати кінцеві результати і адекватний експериментальним даним. Запропоновано також процедуру узагальнення інтервальних виходів нечітких моделей з отриманої множини. Окрім усіх переваг побудови нечітких моделей з експериментальних даних, запропонований підхід дає змогу врахувати думку кількох експертів і на її основі скоригувати вхідний вектор даних. Кінцевий результат має вигляд інтервалу, за шириною якого можна зробити висновок про адекватність відображення моделлю предметної галузі. Шляхом експериментальних досліджень, пов'язаних із прикладною задачею оцінювання артезіанської свердловини з точки зору перспективності її подальшої експлуатації, показано, що за допомогою отриманого інтервалу, який узагальнює результати роботи всіх моделей, можна знайти рішення, придатне для розв'язання поставленої задачі.

**Ключові слова:** нечітка модель типу 2, інтервальна функція належності, інформаційна міра ідентичності.

**ВСТУП**

Як відомо [1], ідентифікація складних об'єктів, що слабо формалізуються, передбачає побудову певної сукупності логічних висловлень «якщо–то», які пов'язують лінгвістичні оцінки вхідних та вихідних параметрів об'єкта. Моделюючи такі об'єкти, розробники спрямовують зусилля на підвищення адекватності опису моделювання об'єктів, ураховуючи численні фактори, які, на думку експерта, можуть вплинути на процеси прийняття рішень. Використання емпіричних знань для побудови нечіткої моделі означає, що адекватність нечітких моделей відносно реальних даних експерименту істотно залежатиме від кваліфікації експертів. У крайньому випадку, коли експерти не володіють у повному обсязі знаннями, необхідними для побудови нечіткої моделі, виникають питання з визначення міри їх участі в процесі моделювання та міри використання експериментальних даних. Тоді, як правило, генерація нечіткої моделі відбувається з доступних експериментальних даних. Перетворення експериментальних даних у нечіткі бази знань використовують у нечіткому моделюванні [2]. Поширеним використанням експери-

ментальних даних є побудова нечітких моделей у випадку недовизначеності вхідних даних, наприклад, для моделювання складних природних систем, коли про характер роботи системи можна судити лише за вибіркою експериментальних даних.

Проте недостатньо дослідженими є методи побудови нечітких моделей з інтервальними функціями належності, що здатні в умовах невизначеності зберігати адекватність експериментальним даним, на основі яких відбувається генерація нечіткої моделі.

Резюмуючи наведене, актуальним постає питання аналізу нечітких систем, що генеруються з експериментальних даних, щодо їх властивості якісного відображення предметної галузі в задачах ідентифікації складних об'єктів.

### АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасний підхід до розв'язання задач ідентифікації складних об'єктів, що слабо формалізуються, пов'язують з нечітким моделюванням. Залежно від ступеня нечіткості нечітких множин, що враховується під час побудови нечіткої моделі, розрізняють нечіткі моделі типу 1, загальні моделі типу 2 та інтервальні моделі типу 2 [3].

У праці [4] для розв'язання задачі медичної діагностики використовуються нечіткі моделі типу 1. Побудова нечіткої логічної системи, яка буде адекватною предметній галузі, здійснюється шляхом налаштування параметрів нечіткої логічної системи за методом найменших квадратів. З метою забезпечення адекватності в цій роботі пропонується використовувати потужні оптимізаційні методи на основі випадкового пошуку.

Побудова нечіткої логічної системи типу 2 з інтервальними функціями належності для забезпечення придатних результатів на виході системи теж допускає процедури налаштування параметрів функцій належності. У праці [5] для налаштування параметрів інтервальних функцій належності нечіткої моделі типу 2 з багатьма входами та багатьма виходами також використовується генетичний алгоритм.

У праці [6] для підвищення точності прогнозування часових послідовностей пропонується будувати декілька моделей. Практична користь розроблених моделей та методів щодо підвищення адекватності відображення предметної галузі досліджується за допомогою критеріїв максимального відхилення ( $MAE$ ), середнього відхилення ( $MSE$ ) та середньоквадратичного відхилення ( $RMSE$ ), за якими визначається близькість розрахункових ( $\tilde{y}_i$ ) та експериментальних ( $y_i$ ) даних:

$$MAE = \max_i |y_i - \tilde{y}_i|;$$
$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \tilde{y}_i)^2;$$
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \tilde{y}_i)^2},$$

де  $N$  — кількість спостережень.

Проблема забезпечення точності в задачі прогнозування часових послідовностей розглядається також у праці [7]. Обґрунтовується доцільність використання інтервальної нечіткої логічної системи типу 2 для прогнозування послідовностей, що мають значну зашумленість. Для порівняння результатів прогнозування використано критерій *RMSE*. У праці [8] пропонується підхід для оцінювання якості виготовлення промислової продукції декількома моделями, які будуються на основі інтелектуальних технологій, у тому числі і з використанням інтервальних нечітких моделей типу 2. Зазначено, що для оцінювання якості результатів, які отримують за допомогою кожної із запропонованих моделей, рішення приймає експерт. Указано на переваги використання саме інтервальної нечіткої моделі, яка дає змогу побудувати більш згладжену поверхню для отримання вихідного значення.

Інтервальному прогнозуванню часових послідовностей за умов невизначеності присвячено працю [9], у якій також використано декілька моделей, але на відміну від попередніх для прогнозування пропонуються лише інтервальні нечіткі моделі. На базі множини інтервальних нечітких моделей побудовано узагальнювальну модель, що складається з множини часткових різновходових моделей та блока агрегації  $\cap/\cup$ , який виконує обчислення результуючого інтервального прогнозу.

Інтервальні нечіткі множини використано для моделювання складних систем в умовах недовизначеності вхідних даних у праці [10]. З урахуванням неточності вимірювань, відсутності можливостей для безпосереднього спостереження об'єкта, неповноти та неоднозначності знань про предметну галузь було побудовано агреговану інтервальну нечітку модель типу 2, яка складалася з множини інтервальних нечітких моделей.

У праці [11] розглядаються переваги інтервальних нечітких моделей типу 2 щодо адекватності відображення предметної галузі. Для обґрунтування переваг пропонується відомий підхід теорії ідентифікації до оцінювання ступеня ідентичності між об'єктом та моделлю на основі інформаційної міри невизначеності:

$$H(Y) = I(X, Y) + H(Y/X), \quad (1)$$

де  $H(Y)$  — ентропія вихідної величини, що дорівнює сумі кількості інформації про  $Y$ , яка міститься у вхідній величині  $X$ , та середньої умовної ентропії  $Y$  відносно  $X$ . Тобто за класичною теорією інформації безумовна ентропія величини  $Y$  складається з двох частин: перша — це міра кількості інформації про величину  $Y$ , яку можна отримати на основі вхідної величини  $X$ , а друга — міра апіорної невизначеності, що зумовлюється впливом інших величин, крім  $X$ .

Таким чином, у випадку побудови нечіткої моделі з урахуванням виразу (1) збільшення кількості інформації про  $Y$ , що міститься у вхідній величині  $X$ , забезпечуватиметься підвищенням адекватності відображення предметної галузі. Виконати цю умову можна, збільшивши ентропію вхідів  $H(X)$ , як видно з такого виразу, отриманого завдяки властивості симетрії з виразу (1):

$$I(X, Y) = H(X) - H(X/Y).$$

Зменшенню впливу  $H(X/Y)$  буде сприяти також процес оптимізації параметрів нечіткої моделі. Тобто виникає задача параметричної ідентифі-

кації, що зводиться до знаходження таких оцінок параметрів математичної моделі, які забезпечують найкращу, відповідно до обраного критерію, близькість розрахункових і експериментальних даних.

Для реалізації згаданого підходу пропонуємо будувати множину нечітких моделей з інтервальними функціями належності та інтервальним виходом. Нечіткі моделі цієї множини будуються з експериментальних даних. Кожна з таких моделей генеруватиметься з однієї й тієї самої експериментальної вибірки, але з урахуванням думки незалежних експертів на вектор вхідних змінних, що допоможе врахувати вплив шумів та недовизначеність, наявну у вхідних даних. Для отримання кінцевого результату введемо процедуру узагальнення виходів моделей, що генеруються. Оскільки кінцевий результат буде мати вигляд інтервалу, то за шириною інтервалу можна зробити висновок про адекватність відображення моделлю предметної галузі. Шляхом експериментальних досліджень, пов'язаних із прикладною задачею оцінювання артезіанської свердловини з точки зору перспективності її подальшої експлуатації, покажемо, що за допомогою отриманого інтервалу, який буде узагальнювати результати роботи всіх моделей, можна знайти рішення, придатне для розв'язання поставленої задачі.

Виходячи з розглянутих праць і теоретичних передумов, є підстави вважати, що проблема забезпечення адекватності інтервальних нечітких моделей, пристосованих для розв'язання задач ідентифікації складних об'єктів, є актуальною.

## **МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Метою дослідження є підвищення адекватності нечітких моделей предметній галузі шляхом побудови множини інтервальних нечітких моделей з подальшим узагальненням кінцевих результатів.

Для досягнення поставленої мети потрібно:

- побудувати множину інтервальних нечітких моделей типу 2 з інтервальними функціями належності;
- запропонувати процедуру узагальнення виходів інтервальних нечітких моделей залежно від характеру інтервальних виходів кожної з моделей з урахуванням думки експерта;
- дослідити адекватність побудованих нечітких моделей типу 2 для задач ідентифікації складних об'єктів.

## **ГЕНЕРАЦІЯ НЕЧІТКОЇ МОДЕЛІ З ІНТЕРВАЛЬНИМИ ФУНКЦІЯМИ НАЛЕЖНОСТІ З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ**

Нечітка модель будується на основі експериментальних даних, які визначають центри нечітких множин антецедентів і консеквентів правил.

Генерування нечіткої моделі з інтервальними функціями належності на базі експериментальних даних виконується за алгоритмом із праці [12]. На основі цього алгоритму буде одночасно зменшуватися вибірка та генеруватися нечітка модель з інтервальними функціями належності. Центри інтервальних функцій належності визначаються за відповідними експериментальними даними. Цей алгоритм є алгоритмом контрольованого розтягу одного з параметрів функцій належності вхідних змінних з одночасним збе-

реженням адекватності прийняття рішень нечіткою системою. Алгоритм дозволяє побудувати інтервальні функції належності типу 2 для вхідних змінних та забезпечує функціонування інтервальної нечіткої моделі як такої, що є максимально адекватною предметній галузі.

Структуру нечіткої моделі з інтервальними функціями належності зображено на рис. 1 [3].

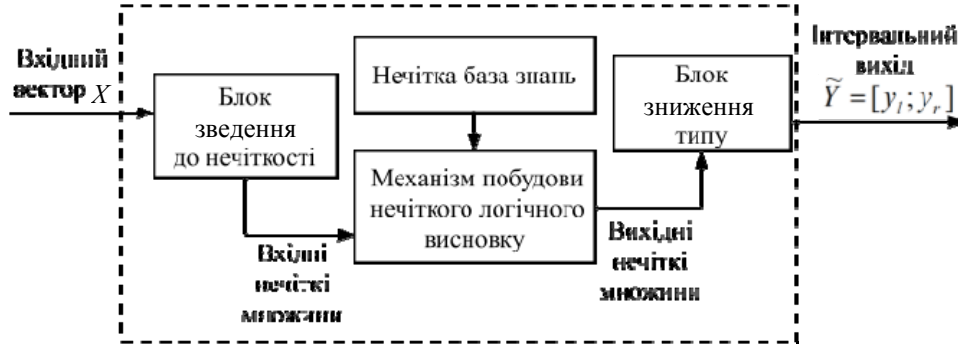


Рис. 1. Структура інтервальної нечіткої моделі типу 2

Модель відображає чіткі входи ( $x_1, \dots, x_p$ ) в інтервальні та чіткі виходи:  $\tilde{Y} = [y_l; y_r]$ . Для опису нечітких термів лінгвістичних змінних використаємо інтервальні нечіткі множини типу 2. Тоді математична модель буде являти собою інтервальну нечітку модель типу 2, що включає базу правил (нечітку базу знань), процедуру зведення до нечіткості, процедуру нечіткого логічного виведення, процедуру зниження типу та процедуру зведення до чіткості (рис. 2).

У загальному випадку для  $n \geq 1$  виходів базу правил нечіткої моделі визначимо таким чином:

$$R^1 : \text{якщо } x_1 = \tilde{F}_1^1 \text{ I } \dots \text{ I } x_p = \tilde{F}_p^1, \text{ то } y_1 = G_1^1, \dots, y_n = G_n^1;$$

$$R^l : \text{якщо } x_1 = \tilde{F}_1^l \text{ I } \dots \text{ I } x_p = \tilde{F}_p^l, \text{ то } y_1 = G_1^l, \dots, y_n = G_n^l;$$

$$R^M : \text{якщо } x_1 = \tilde{F}_1^M \text{ I } \dots \text{ I } x_p = \tilde{F}_p^M, \text{ то } y_1 = G_1^M, \dots, y_n = G_n^M,$$

де  $\tilde{F}_k^l$ ,  $k=1, \dots, p$ ,  $l=1, \dots, m$  — інтервальна нечітка множина типу 2  $k$ -го антецедента  $l$ -го правила;  $G_k^l$ ,  $k=1, \dots, n$ ,  $l=1, \dots, M$ , — інтервальна множина типу 1  $k$ -го консеквента  $l$ -го правила, яка визначається крайньою лівою  $y_{kl}^{G^l}$  та крайньою правою  $y_{kr}^{G^l}$  точками:  $G_k^l = [y_{kl}^{G^l}; y_{kr}^{G^l}]$ ;  $M$  — число правил.

Для опису інтервальних нечітких множин типу 2 термів лінгвістичних змінних використаємо гаусові первинні функції належності зі сталим центром та невизначеним відхиленням.

Гаусова первинна функція належності зі сталим центром і невизначеним відхиленням  $\sigma \in [\sigma_1; \sigma_u]$  задається як

$$\mu_A(x) = e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-m}{[\sigma_1, \sigma_2]} \right)^2} \quad (2)$$

Графік гаусової первинної функції належності зі сталим центром і невизначеним відхиленням (2) зображено на рис. 2.

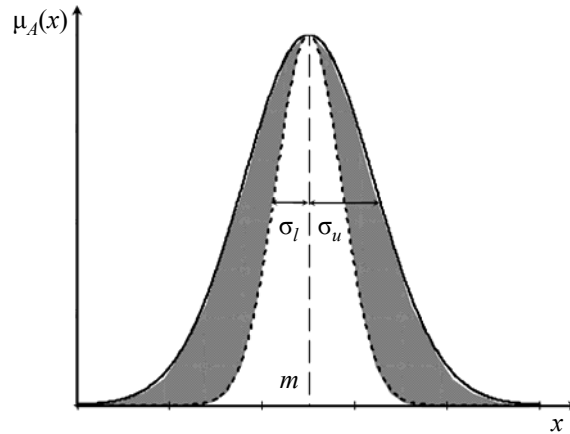


Рис. 2. Гаусова первинна функція належності зі сталим центром і невизначеним відхиленням

Для обчислення вихідних нечітких множин правил використаємо  $t$ -норму мінімуму. Тоді вихідна множина правила  $R^l$  визначиться за формулою

$$\mu_{\tilde{B}^l}(y_k) = \int_{b^l} 1/b^l,$$

$$b^l \in [\underline{f}^l * \mu_{G^l}(y_k), \bar{f}^l * \mu_{G^l}(y_k)],$$

де  $*$  — оператор  $t$ -норми;  $\underline{f}^l$  і  $\bar{f}^l$  — нижня і верхня границі інтервалу активізації  $[\underline{f}^l, \bar{f}^l]$ , які визначаються такими формулами:

$$\underline{f}^l = \frac{p}{T} \mu_{\tilde{F}_k^l}(x_k); \quad \bar{f}^l = \frac{p}{T} \bar{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k),$$

де  $\mu_{\tilde{F}_k^l}(x_k)$  і  $\bar{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k)$  — нижній та верхній ступені належності  $\mu_{\tilde{F}_k^l}(x_k)$ .

Вихідні нечіткі множини правил  $\tilde{B}^l$  без об'єднання в єдину множину будемо відразу подавати на блок зниження типу нечіткої моделі.

Зниження типу вихідних інтервальних нечітких множин типу 2 до інтервальних типу 1 виконуватимемо методом центра множин, що виражається формулою

$$Y_k(x) = [y_{kl}, y_{kr}] =$$

$$= \frac{\int_{y_{kl}^{G^1}, y_{kr}^{G^1}} \dots \int_{y_{kl}^{G^M}, y_{kr}^{G^M}} \int_{\underline{f}^1, \bar{f}^1} \dots \int_{\underline{f}^M, \bar{f}^M} 1}{\sum_{l=1}^M f^l y_k^l} / \sum_{l=1}^M f^l,$$

де  $Y_k(x)$ ,  $k=1, \dots, n$ , — інтервальна множина, що визначається крайніми точками  $y_{kl}$  і  $y_{kr}$ .

Для обчислення крайніх точок  $y_{ki}$  і  $y_{kr}$  використовуємо алгоритм Карніка–Менделя [4] (інтервальний вихід).

## МЕТОД ПОБУДОВИ МНОЖИНИ НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ ТИПУ 2 З ІНТЕРВАЛЬНИМИ ФУНКЦІЯМИ НАЛЕЖНОСТІ, ЯКІ МАЮТЬ МОЖЛИВІСТЬ УЗАГАЛЬНЕННЯ І АДЕКВАТНІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМ ДАНИМ

**Теоретичні передумови.** Для реалізації методу задається вибірка експериментальних даних. Наступним кроком є пряме генерування нечітких моделей типу 2 з інтервальними функціями належності з експериментальних даних. Наведемо його основні етапи.

Нехай є експериментальна вибірка  $X$ :

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\},$$

де  $X_i = (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}, y_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ ;  $n$  — кількість експериментальних прикладів;  $k$  — кількість вхідних змінних;  $y$  — вихідна величина.

Виконуємо генерування звичайної нечіткої моделі на основі експериментальної вибірки  $X$ . Для цього використовуємо підхід до побудови нечітких моделей, коли нечітка модель будується на основі експериментальних даних, що визначають центри нечітких множин антецедентів та консеквентів правил. У ролі функції належності для вхідних змінних обираємо модифіковану гаусову функцію належності, більш детальний опис якої подано вище.

**Генерація множини нечітких моделей.** Кількість нечітких моделей, які генеруються, залежить від думки незалежних експертів на необхідні зміни у вихідних даних та від наявності доступних експериментальних даних. Далі буде описано дії кожного експерта з групи незалежних експертів.

За визначенням експерта коригуємо вхідний вектор та експериментальну вибірку. Перетворення вибірки здійснюється за допомогою алгоритму, який враховує неповноту експериментальних даних [12]. За цим алгоритмом процедура коригування поєднується з побудовою інтервальної нечіткої моделі. А саме, з початкової експериментальної вибірки видаляються стовпці зі значеннями змінних, які, на думку експерта, є неважливими для розв'язання задачі; на перетвореній вибірці генерується нова нечітка модель. Таким чином, відбувається генерація множини інтервальних нечітких моделей, кожна з яких відображає предметну галузь з урахуванням думки експерта.

**Перехід до процедури узагальнення інтервальних виходів нечітких моделей та визначення кінцевого виходу.** Процедура узагальнення може мати декілька варіантів отримання кінцевого результату. Найбільш бажаний — це наявність перетину у виходах інтервальних нечітких моделей. Тоді розв'язок майже очевидний і в більшості випадків становить перетин виходів часткових моделей. Розглянемо найгірший випадок — відсутність

перетину у виходах нечітких моделей. Цей випадок вказує на наявність моделі, що не є адекватною предметній галузі; його зображено на рис. 3. Виникає потреба у формуванні кінцевого інтервалу, який буде узагальнювати роботу множини інтервальних нечітких моделей.

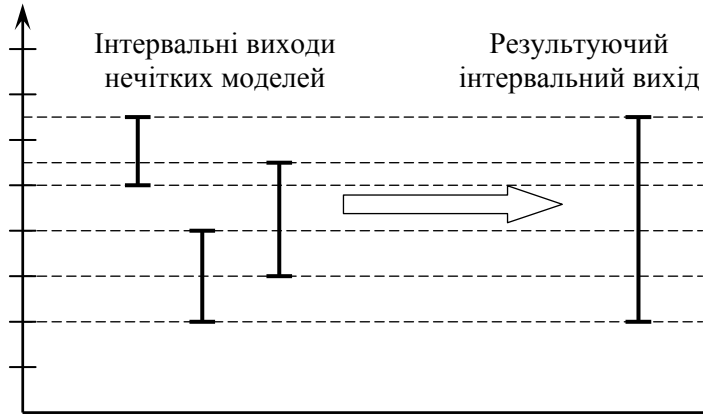


Рис. 3. Приклад обчислення результуючого інтервального виходу у випадку, коли перетину інтервальних виходів окремих моделей не існує

Запропонуємо процедуру узагальнення інтервальних виходів. Рішення про ширину результуючого інтервалу прийматиметься з урахуванням думки експерта залежно від задачі, що розв'язується за допомогою нечіткого моделювання. Уведемо відповідні позначення:

$Y^\Sigma$  — результуючий інтервальний вихід множини нечітких моделей;

$Y^\Sigma = [y_l^\Sigma, y_r^\Sigma]$  — межі результуючого інтервального виходу моделі;

$\bigcap_{i=1}^l Y^{inm}$  — перетин інтервальних виходів нечітких моделей  $Y^{inm}$ ,  
 $i = 1, \dots, t$ ;

$\bigcup_{i=1}^l Y^{inm}$  — об'єднання інтервальних виходів нечітких моделей  $Y^{inm}$ ,  
 $i = 1, \dots, t$ .

Правило узагальнення: якщо перетин інтервальних моделей існує  $\bigcap_{i=1}^l Y^{inm} \neq \emptyset$ , то результуючим інтервальним виходом є цей перетин

$Y^\Sigma = \bigcap_{i=1}^l Y^{inm}$ ; інакше результуючим інтервальним виходом є об'єднання ін-

тервальних виходів нечітких моделей:  $Y^\Sigma = \bigcup_{i=1}^l Y^{inm}$ . Цей результат може ко-

ригуватися за допомогою перетину з інтервальним виходом моделі, що є найбільш вагомою за думкою експерта або має найбільшу кількість вхідних

змінних, а саме:  $Y^\Sigma = \bigcup_{i=1}^l Y^{inm} \cap Y^{enm}$ , де  $Y^{enm}$  — інтервальний вихід нечіткої

моделі, яку вибрав експерт як більш вагому.



**ПРИКЛАД ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ**

Покажемо роботу запропонованого методу в задачі оцінювання стану артезіанської свердловини. Свердловина як складна природна система характеризується значною надлишковістю простору параметрів. На її стан та потенційні експлуатаційні характеристики безпосередньо або опосередковано впливає велика кількість природних та антропогенних чинників. Спроби врахувати та математично описати їх вплив на загальний стан досліджуваної системи і породжують надлишковість.

Відповідно до запропонованого методу множину вхідних змінних скорочено шляхом залучення декількох експертів, у результаті чого отримано такі моделі:

- $M_{E1}$  — модель, згенерована на основі набору ознак, виділеного з основного набору першим експертом (10 ознак з 24);
- $M_{E2}$  — модель, згенерована на основі набору ознак, виділеного з основного набору другим експертом (11 ознак з 24);
- $M_{E3}$  — модель, згенерована на основі набору ознак, виділеного з основного набору третім експертом (12 ознак з 24);
- $M_{\Pi}$  — модель, згенерована на основі повного набору ознак.

Результати застосування методу, отримані на тестовому наборі даних, наведено в таблиці. Виходом методу є інтервальне та лінгвістичне значення змінної «перспективність артезіанської свердловини для подальших досліджень та експлуатації», що оцінюється за шкалою від 0 до 10, а також лінгвістичними термами «Висока» (В), «Достатня» (Д), «Недостатня» (Н).

**Результати застосування методу**

Шкала	$M_{E1}$	$M_{E2}$	$M_{E3}$	$M_{\Pi}$	Вихід методу	Оцінка експерта
1	[0; 0,02]	[0; 0]	[0; 0,01]	[0; 2,64]	[0; 0] – Н	1 / Н
2	[2,42; 3,44]	[3,11; 3,76]	[1,17; 1,68]	[0,08; 2,81]	[1,17; 1,68] – Н	1 / Н
3	[6,72; 6,99]	[6,8; 6,82]	[6,43; 6,65]	[0,46; 5,81]	[6,43; 6,65] – Д	2 / Н
4	[5,56; 5,6]	[5,61; 5,62]	[5,53; 5,56]	[4,91; 6,48]	[5,53; 5,56] – Д	6 / Д
5	[5,11; 5,42]	[4,78; 5,22]	[5,83; 6,02]	[3,9; 5,71]	[5,83; 6,02] – Д	6 / Д
6	[6,82; 7,3]	[7,75; 7,85]	[6,25; 6,62]	[5,08; 7,82]	[6,25; 6,62] – Д	5 / Д
7	[5,84; 6,24]	[6,96; 7]	[6,04; 6,21]	[0,82; 7,61]	[6,04; 6,21] – Д	6 / Д
8	[7,93; 8,12]	[8,17; 8,24]	[9,98; 9,99]	[9,92; 10]	[9,98; 9,99] – В	8 / В
9	[7,94; 8,07]	[8,36; 8,39]	[9,7; 9,81]	[9,89; 9,94]	[9,7; 9,81] – В	9 / В
10	[9,1; 9,54]	[9,21; 9,29]	[9,66; 9,83]	[9,89; 9,98]	[9,66; 9,83] – В	9 / В

Так, для першого зразка тестової вибірки вихід методу  $Y^{\Sigma}$  визначається як  $Y^{\Sigma} = \bigcap_{i=1}^l Y^{imm} = [0; 0,02] \cap [0; 0] \cap [0; 0,01] = [0; 0] \neq \emptyset$ . Для зразка 2

перетину  $\bigcap_{i=1}^N Y^{imm}$  не існує:  $Y^{\Sigma} = \bigcap_{i=1}^l Y^{imm} = [2,42; 3,44] \cap [3,11; 3,76] \cap$

$\cap [1,17;1,68] = \emptyset$ , тому визначальну роль відіграє вихід моделі  $M_3$ :

$Y^\Sigma = \bigcup_{i=1}^l Y^{imm} \cap Y^{M_3} = Y^{M_3} = [1,17;1,68]$ . Зразок 3 являє собою особливий випадок.

Вихід методу, отриманий як перетин виходів усіх трьох моделей  $\bigcap_{i=1}^l Y^{imm}$ , не збігається з оцінкою експерта-гідрогеолога, запропонованою для цієї свердловини. Така розбіжність свідчить про недосконалість множини моделей, що беруться до розгляду. Цей результат вказує на існування змінної, що не входить до вихідного набору ознак жодної з трьох розглянутих часткових моделей. Усунути цей недолік можна, розширивши множину використовуваних моделей.

Оцінюючи адекватність отриманих результатів на тестовому наборі даних, за винятком зразка 3, дістаємо значення  $MAE = 1,99$  і  $RMSE = 0,97$ , у той час, як для моделі на основі повного набору даних вони становлять  $MAE = 1,96$ ;  $RMSE = 1,19$ . З урахуванням зразка 3 ці оцінки становлять  $MAE = 4,45$  та  $RMSE = 1,71$  для запропонованого методу та  $MAE = 1,96$ ;  $RMSE = 1,18$  для виходу моделі на основі повного набору ознак.

Якщо ж оцінювати ширину інтервалу значення, отриманого на виході, то в результаті застосування запропонованого методу інтервал зменшується в середньому на понад 90% (0,17 на виході методу проти 2,1 на виході моделі  $M_{II}$  без урахування  $x_3$ ; 0,18 проти 2,39 з урахуванням  $x_3$ ). Таким чином, за умови правильного вибору множини моделей запропонований метод дає змогу суттєво зменшити значення умовної ентропії у виразі (1). За рахунок побудови множини інтервальних нечітких моделей і введення процедури узагальнення їх виходів вдасться отримати прийнятні для цієї галузі розв'язки.

## АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Дослідження результатів роботи запропонованого методу показують, що модель, побудована на повному наборі вхідних змінних, дає досить широкий інтервал значень вихідної змінної внаслідок надлишковості множини вхідних ознак. Водночас за умови правильного вибору множини моделей запропонований метод дає змогу істотно зменшити значення умовної ентропії і таким чином скоротити ширину інтервалу отриманого значення, або ж зробити висновок про доцільність доповнення вхідного вектора.

Проведена робота є продовженням досліджень адекватності нечіткої логічної системи в працях [10, 11].

## ВИСНОВКИ

Запропоновано метод побудови множини нечітких моделей типу 2 з інтервальними функціями належності, які мають можливість узагальнення кінцевих результатів та адекватні експериментальні дані. Наведено процедуру узагальнення виходів інтервальних нечітких моделей залежно від отриманих інтервальних виходів моделей з урахуванням думки експерта.

Проведено дослідження адекватності побудованих нечітких моделей типу 2 для задач ідентифікації складних об'єктів.

Робота надає обґрунтування доцільності використання нечітких множин типу 2 в математичних моделях, що оперують недовизначеними входними даними. Обґрунтування виконано теоретично з позицій теорії інформації та підтверджено експериментально.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Liang Q.* Interval Type-2 fuzzy logic systems: theory and design / Q. Liang, J.M. Mendel // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. — 2000. — Vol. 8. — P. 535–550.
2. *Зайченко Ю.П.* Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах / Ю.П. Зайченко. — К.: Издат. дом «Слово», 2008. — 344 с.
3. *Mendel J.M.* Interval Type-2 Fuzzy logic systems made simple / J.M. Mendel, R.I. John // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. — 2006. — Vol. 14, N 6. — P. 808–821.
4. *Кондратенко Н.Р.* Генетичне настроювання нечіткої моделі в задачі діагностики гіпотиреозу / Н.Р. Кондратенко, С.М. Куземко // Вісник ВПІ. — 2003. — №6. — С.278–283.
5. *Кондратенко Н.Р.* Інтервальні нечіткі моделі типу-2 в задачах ідентифікації об'єктів з багатьма входами та виходами / Н.Р. Кондратенко, О.В. Чеборака, О.А. Ткачук // Системи обробки інформації. — 2011. — № 3(93). — С. 48–52.
6. *Saima H.* ARIMA based Interval Type-2 Model for Forecasting / H. Saima, J. Jaafar, S. Belhaouari, T.A. Jillani // International Journal of Computer Applications. — 2011. — Vol. 28, N 3. — P. 17–21.
7. *Khanesar M.A.* Extended Kalman Filter Based Learning Algorithm for Type-2 Fuzzy Logic Systems and its Experimental Evaluation / M.A. Khanesar, E. Kayacan, M. Teshnehlab, O. Kaynak // IEEE Transactions on Industrial Electronic. — 2012. — Vol. 59, N 11. — P. 4443–4455.
8. *Melin P.* An intelligence hybrid approach for industrial quality control combining neural networks, fuzzy logic and fractal theory / P. Melin, O. Castillo // Information Sciences. — 2007. — Vol. 147, N. 177. — P. 1543–1557.
9. *Кондратенко Н.Р.* Дослідження можливостей узагальнювальної інтервальної типу-2 нечіткої моделі для прогнозування часових послідовностей / Н.Р. Кондратенко, О.В. Чеборака // Вісник ВПІ. — 2008. — №6. — С. 22–27.
10. *Kondratenko N.* Interval Fuzzy Modeling of Complex Systems under Conditions of Input Data Uncertainty / N. Kondratenko, O. Snihur // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2016. — Vol. 4/4 (82). — P. 20–28.
11. *Кондратенко Н.Р.* Підвищення адекватності нечітких моделей за рахунок використання нечітких множин типу 2 / Н.Р. Кондратенко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2014. — № 6. — С. 56–61.
12. *Кондратенко Н.Р.* Нечіткі логічні системи з врахуванням пропусків в експериментальних даних / Н.Р. Кондратенко, Н.Б. Зелінська, С.М. Куземко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2004. — № 5. — С. 37–41.

Надійшла 16.10.2019