

УЗАГАЛЬНЮВАЛЬНА ІНТЕРВАЛЬНА НЕЧІТКА МОДЕЛЬ ТИПУ-2 ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНІВ СКЛАДНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКСПЕРТНИХ ЗНАНЬ

Н.Р. КОНДРАТЕНКО, О.О. СНІГУР, Р.М. КОНДРАТЕНКО

Анотація. Запропоновано інтервальну узагальнювальну нечітку модель типу-2 в завданнях моніторингу станів складних систем з урахуванням експертних знань. Для узагальнення виходів нечітких моделей типу-2 з інтервальними функціями належності впроваджено теоретико-множинний підхід. Подано дослідження відповідності експертних оцінок вихідному значенню узагальнювальної нечіткої моделі протягом інтервалу спостережень. Наведено приклади використання узагальнювальної нечіткої моделі типу-2 в моніторингу станів артезіанської свердловини. Показано, що для підвищення якості прийняття рішень експерту необхідно звертати увагу на величину інтервального виходу узагальнювальної нечіткої моделі типу-2. Надано рекомендації експертам щодо поліпшення прийняття рішень стосовно оцінки вихідного інтервалу узагальнювальної моделі.

Ключові слова: нечітка модель типу-2, інтервальна функція належності, теоретико-множинний підхід, експертні знання.

ВСТУП

Відомо, що моделі ідентифікації складних систем, що будуються в умовах неповної вихідної інформації, успішно використовують апарат теорії нечітких множин [1]. Нечіткі множини типу-1 і типу-2 є достатньо потужним інструментом для розв'язання слабкоструктурованих проблем в умовах невизначеностей [2]. Неповнота вихідних даних є проблемою, що характерна для моделювання багатьох систем. Такими можна вважати соціальні, економічні, технічні системи різного характеру, але найбільш складними є завдання ідентифікації для екологічних та природничих систем, про характер роботи яких у багатьох випадках можна судити лише за вибіркою експериментальних даних.

Із слабкоструктурованих проблем актуальним є завдання моніторингу станів складних систем за умови неповноти вхідних даних. Упевнено можна вказати на необхідність моніторингу станів природничих систем, оскільки такі системи пов'язані з важкодоступними об'єктами; наприклад, це об'єкти геологічної розвідки. Для останніх характерними факторами є неточність вимірювань і часто неможливість вести безпосереднє спостереження об'єкта.

Особливість багатьох таких систем полягає в тому, що для отримання вхідних даних для подальшої експлуатації необхідно провести моніторинг станів системи зі спостереженнями протягом певного часу. Отримані дані можуть бути неоднорідними та суперечливими. Отже, для прийняття рішення розробники часто мають неповну інформацію про числові значення характеристик системи або є тільки інтервали можливих значень.

Використання інтервальних нечітких моделей як інструменту подання даних дозволяє виявити зв'язок між вхідними даними та виходом системи, стани якої досліджуються. Але досі залишається актуальною проблема дослідження функціонування інтервальних нечітких моделей в моніторингу станів складних систем в умовах неповної вхідної інформації з використанням знань експертів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Натепер обсяги даних, які нагромаджуються в різних галузях, різко збільшуються, що зумовлює пошук новітніх технологій. Це безумовно нечітке моделювання з використанням нечітких множин вищих порядків. Сучасний підхід до розв'язання завдань моніторингу станів складних систем за участю експертів реалізується за допомогою нечіткого моделювання. Нечіткі моделі використовують для свого функціонування основні поняття теорії нечітких множин, нечіткі правила та нечітке логічне виведення. Залежно від ступеня нечіткості нечітких множин, що враховується в побудові нечіткої моделі, розрізняють нечіткі моделі типу-1, загальні моделі типу-2 та інтервальні типу-2. Нечіткі моделі типу-1 будуються на основі нечітких множин з чіткими значеннями степенів належності, але такі нечіткі моделі дають на виході лише чітке значення. Інтервальні нечіткі моделі типу-2 будуються на основі нечітких множин з інтервальними значеннями степенів належності. Останні моделі дають на виході точкові та інтервальні значення. Звідси перед розробниками виникає задача вибору типу нечітких множин, за допомогою яких можна було б достатньо просто обробляти різні види невизначеностей. У праці [3] розглядаються питання, пов'язані з розвитком теорії нечітких множин типу-1 і типу-2 та наводиться мотивація адекватно подавати невизначеності, які існують в предметній області, за допомогою множин типу-2.

Множини типу-1 і типу-2 використовуються в методиках з подання знань експертів. У працях [4–6] розглядаються напрями, де в умовах неповноти вхідних даних експерту надається право визначати ту підмножину вхідних даних, яка, на його думку, є важливою. Також робиться висновок про доцільність використання нечітких моделей, побудованих на нечітких множинах типу-2 з інтервальними функціями належності.

Приклади практичного використання інтервальних нечітких моделей наведено у праці [7], де ставиться завдання зменшення помилок квантування інформації для нелінійних об'єктів. За рахунок використання інтервальних нечітких моделей вдається контролювати невизначеності, які виникають у нелінійних системах і надалі більш ефективно їх обробляти.

Як приклад успішного застосування інтервальних нечітких моделей, де експерти беруть участь у формуванні вхідного вектора параметрів, можна навести працю [8]. У ній показано особливості інтервального нечіткого моделювання на прикладі оцінювання стану артезіанської свердловини в довільний момент часу в межах від початку гідрогеологічної розвідки до її повного завершення.

Множину інтервальних нечітких моделей запропоновано для підвищення точності інтервального прогнозування часових послідовностей у праці [9]. Особливість цієї роботи полягає у викладеній методиці побудови

множини різновходових нечітких моделей типу-2. Кожна з таких моделей є звичайною інтервальною нечіткою моделлю типу-2, яка містить базу правил, процедуру зведення до нечіткості, процедуру нечіткого логічного виведення та процедуру пониження типу.

У праці [10] запропоновано метод побудови нечітких баз знань типу-2 з інтервальними функціями належності, що буде використовуватись у медичній діагностиці та прогнозуванні станів захворювання. Показано, що побудована модель є адекватною медичній галузі і здатна в умовах якісного характеру вхідних даних враховувати як знання фахівця з медичної практики, так і дослідні медико-біологічні дані. У праці [11] пропонується метод побудови інтервальних нечітких логічних систем типу-2 у медичній галузі на основі експериментальних даних, що мають пропуски.

У праці [12] пропонується підхід для оцінювання якості виготовлення промислової продукції декількома моделями, у тому числі і моделями, які будуються на основі інтелектуальних технологій, а саме з використанням інтервальних нечітких моделей типу-2. Зазначено, що для оцінювання якості результатів, які отримують за допомогою кожної із запропонованих моделей, кінцеве рішення належить експерту.

Виходячи з наведеного, доцільно провести дослідження і з'ясувати, як для розв'язання завдання моніторингу станів складної системи в умовах невизначеності вхідних даних можна проаналізувати правильність рішень, що приймаються експертами, які надають вагому інформацію. Проте недостатньо досліджені інтервальні нечіткі моделі, що будуються з урахуванням знань експертів, та методи, які дозволяють на основі процедур агрегації виходів інтервальних нечітких моделей будувати нечіткі моделі, що є адекватними предметній області.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

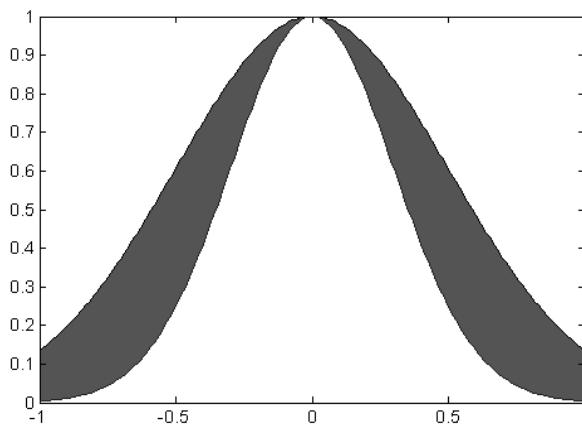


Рис. 1. Інтервальна функція належності

Вирішення поставленого завдання подамо в декілька етапів:

Етап 1. Ретельна робота з експертами. Для побудови нечітких моделей експертам пропонується працювати з нечіткими множинами типу-2 і будувати нечітку модель з інтервальними функціями належності. Тип функції належності задається. Це модифікована гаусова функція [1, 4]; типовий вигляд графіка функції зображено на рис. 1.

Для інтервальної нечіткої моделі експерти будують свій вхідний вектор, тобто можуть відкидати певні ознаки повного вхідного вектора, який пропонується розробником для досліджуваної системи.

Етап 2. Генерування множини інтервальних нечітких моделей. Наводиться генерація множини нечітких моделей з інтервальними функціями

належності із заданої експериментальної вибірки. Для побудови кожної моделі використовується метод генерації нечіткої моделі з експериментальних даних; ця процедура виконується кожним з експертів. Крім того, експерту надається право коригування вхідного вектора, де експерт залишає ті вхідні ознаки, які він вважає найважливішими. Оскільки експерту надається право коригувати вхідний вектор, то, як наслідок, у результаті такого коригування можлива поява малоінформативних вхідних даних. У такому випадку для моделі, що генерується, здійснюється перетворення експериментальної вибірки за допомогою алгоритму, який враховує неповноту експериментальних даних і забезпечує контрольоване розтягнення одного з параметрів функцій належності вхідних змінних з одночасним збереженням адекватності прийняття рішень нечіткою системою; це виконується за допомогою алгоритма, наведеного у праці [11].

Загальна частина роботи кожного експерта реалізується таким чином.

Задається вибірка експериментальних даних \mathbf{X} :

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

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.

На основі вибірки відбувається генерація множини нечітких моделей, кожна з яких є інтервальною нечіткою моделлю. Структуру нечіткої моделі з інтервальними функціями належності, яка входить до множини, зображено на рис. 2.

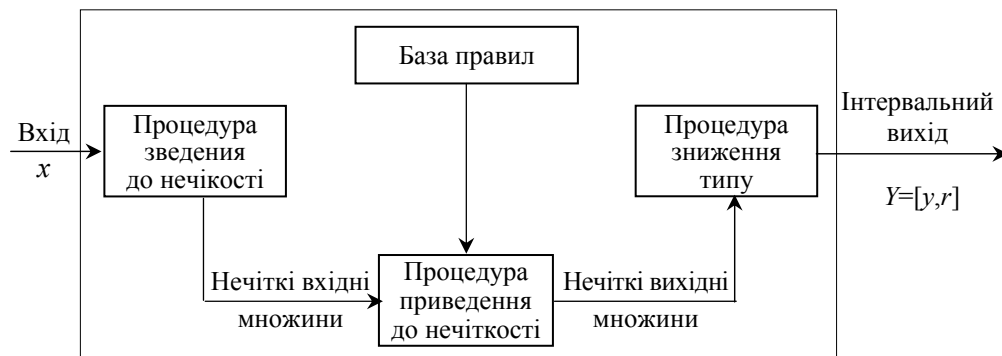


Рис. 2. Структура нечіткої моделі з інтервальними функціями належності

Модель відображає чіткі входи (x_1, x_2, \dots, x_n) в інтервальні та чіткі виходи: $\tilde{Y} = [y_l, y_r]$. Для опису нечітких термів лінгвістичних змінних будемо використовувати 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 пониження типу та процедуру зведення до чіткості.

Для обчислення крайніх точок вихідного значення інтервальної нечіткої моделі типу-2 y_l і y_r використовуємо алгоритм Карніка–Менделя [1].

Таким чином, кожен експерт генерує свій набір ознак і, як наслідок, окрему модель. Для отримання кінцевого результату створюється узагальнювальна модель, яка може агрегувати виходи інтервальних типу-2 нечітких моделей $(IT2FM1, IT2FM2, \dots, IT2FMN)$. Структуру узагальнювальної інтервальної нечіткої моделі зображено на рис. 3.

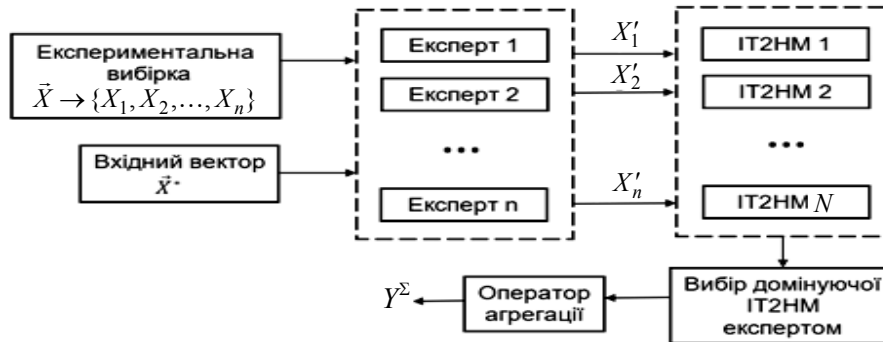


Рис. 3. Структура узагальнюючої інтервальної нечіткої моделі

Етап 3. Обчислення інтервального виходу Y нечіткої моделі, що є узагальнювальною. Y є результатом здійснення операцій теоретико множинного підходу. Реалізація агрегації та отримання кінцевого значення Y здійснюється на основі теоретико-множинного підходу (операції об'єднання \cup та перетину \cap теорії множин) таким чином. Спочатку виконується операція об'єднання окремих інтервальних виходів нечітких моделей, а потім відбувається перетин з інтервальним виходом моделі, яка є домінуючою або є моделлю за повним вектором, або вибирається експерт за певними рекомендаціями. Остання дія експерта є заключною.

Таким чином, кінцевий вихід узагальнювальної моделі створюється в результаті реалізації оператора агрегації у вигляді комбінації операцій теорії множин, а саме: \cup/\cap .

Можливий і інший підхід до отримання кінцевого результату. У крайньому випадку, коли під час побудови узагальнювальної нечіткої моделі, експерт не може прийняти рішення у виборі домінуючої моделі, використовується інша комбінація операцій об'єднання \cup та перетину \cap . Тоді узагальнювальна модель створюється автоматично з урахуванням розташування інтервальних виходів окремих моделей. У випадку наявності спільної частини інтервальних виходів нечітких моделей діє операція їх перетину, інакше — об'єднання. Тоді комбінація операцій така — \cap/\cup .

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ МОНІТОРИНГУ

Розглянемо результати моніторингу станів складної системи за допомогою узагальнювальної моделі. За предметну область візьмемо артезіанську свердловину як складну гідрогеологічну систему. Задача моніторингу такої системи характеризується трудомісткістю отримання вихідних даних, що зумовлено важкодоступністю проведення експериментальних досліджень та є довготривалим періодом геологорозвідувальних робіт (ГРР) (від 6 місяців до декількох років) і має три етапи — від одного до трьох років. Система має багато вхідних параметрів, але беремо до уваги 24 вхідні змінні та одну вихідну величину; її назвемо «перспективність свердловини» і опишемо за допомогою лінгвістичної змінної (позначимо LV) зі шкалою від 0 до 10 [8]. Шкала розбивається на лінгвістичні терми: «недостатня перспективність» — від 1 до 5 балів; «достатня» — від 6 до 7 балів та «висока» — від 8 до 10 балів. Вихід моделі є інтервальним (позначимо через I), кінцеву оцінку для стану свердловини виставляє експерт. Результати роботи узагальнювальної нечіткої моделі родовища наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Результати роботи узагальнювальної нечіткої моделі родо-вища (тестова вибірка)

№ експ.	Етапи	Експерт 1	Експерт 2	Вихід домінуючої моделі	Вихід моделі після U/∩.	Оцінка експерта
1	1	[0,03; 0,39]	[0,11; 0,24]	[0; 0,88]	[0,03; 0,39] Н	1 / недостатня
	2	[0,14; 0,92]	[0,3; 0,53]	[0,53; 4,11]	[0,53; 0,92] Н	
	3	[0; 0,02]	[0; 0]	[0; 2,64]	[0; 0,02] Н	
2	1	[0,04; 0,53]	[1,69; 3,12]	[0,01; 1,2]	[0,04; 1,2] Н	1 / недостатня
	2	[0,18; 1,09]	[1,51; 2,01]	[0,05; 2,36]	[0,18; 2,01] Н	
	3	[2,42; 3,44]	[3,11; 3,76]	[0,08; 2,81]	[1,68; 2,81] Н	
3	1	[7,21; 7,38]	[7,81; 7,82]	[0,63; 5,84]	[1,3; 5,48] Н, Д	2 / недостатня
	2	[6,95; 7,08]	[6,88; 6,88]	[0,63; 5,8]	[1,38; 5,48] Н, Д	
	3	[6,72; 6,99]	[6,8; 6,82]	[0,46; 5,81]	[1,25; 5,45] Н, Д	
4	1	[6,33; 6,66]	[6,66; 6,72]	[6,41; 6,96]	[6,41; 6,72] Д	5 / достатня
	2	[6,44; 6,93]	[7,59; 7,66]	[5,55; 7,48]	[5,82; 7,48] Д, В	
	3	[6,82; 7,3]	[7,75; 7,85]	[5,08; 7,82]	[6,62; 7,82] Д, В	
	2	[4,14; 4,2]	[3,84; 3,86]	[5,55; 6,53]	[5,71; 6,56] В	
	3	[5,56; 5,6]	[5,61; 5,62]	[4,91; 6,48]	[5,56; 5,62] Д	
6	1	[4,3; 5,98]	[6,35; 6,51]	[7,31; 7,62]	[7,32; 7,7] Д, В	6 / достатня
	2	[3,4; 4,45]	[4,39; 4,57]	[5,37; 6,15]	[5,37; 6,15] Д	
	3	[5,11; 5,42]	[4,78; 5,22]	[3,9; 5,71]	[4,78; 5,71] Д	
7	1	[7,64; 7,73]	[7,87; 7,87]	[9,03; 9,71]	[9,03; 9,71] В	8 / висока
	2	[8,27; 8,32]	[8,19; 8,2]	[9,87; 9,99]	[9,88; 10] В	
	3	[7,93; 8,12]	[8,17; 8,24]	[9,92; 10]	[9,92; 9,99] В	
8	1	[7,37; 7,42]	[7,92; 7,94]	[8,53; 8,75]	[8,54; 8,76] В	9 / висока
	2	[8,16; 8,21]	[7,5; 7,57]	[9,94; 9,99]	[9,95; 10] В	
	3	[7,94; 8,07]	[8,36; 8,39]	[9,89; 9,94]	[9,91; 10] В	
9	1	[7,89; 8,05]	[7,82; 7,82]	[8,61; 8,74]	[8,62; 8,74] В	9 / висока
	2	[8,9; 9,25]	[8,12; 8,12]	[9,64; 9,84]	[9,64; 9,77] В	
	3	[9,1; 9,54]	[9,21; 9,29]	[9,89; 9,98]	[9,9; 9,99] В	

Покажемо фрагмент реалізації теоретико-множинного підходу на підставі наведених даних.

Опишімо кожний експеримент та виконаємо основні обчислення. На першому етапі ГРР експертом 1 виділено 10 інформативних ознак, вихід моделі [0,03; 0,39]; експертом 2 виділено 11 ознак, вихід моделі [0,11; 0,24], модель з повним вектором 24 ознаки має інтервальний вихід — [0; 0,88].

Перший крок: реалізуємо операцію об'єднання інтервалів моделей для експертів 1 і 2:

$$[0,03; 0,39] \cup [0,11; 0,24] = [0,03; 0,39]$$

Другий крок: виконуємо операцію перетину з моделлю, що будується на повному векторі:

$$[0,03; 0,39] \cap [0; 0,88] = [0,03; 0,39].$$

Обчислення інтервального виходу узагальнювальної моделі для інших експериментів виконуються аналогічно.

У загальному випадку операція перетину може виконуватись не тільки з виходом моделі з повним вектором, але і моделі, яка, на думку незалежного експерта, є найбільш важливою, домінуючою, або базовою.

Як видно з табл. 1 для експерименту 1 значення лінгвістичної змінної «перспективність свердловини» за оцінкою експерта є недостатньою, оскільки крайні точки вихідного інтервального значення належать терму «недостатня», а ширина інтервалу, що відображає невизначеність, — значною.

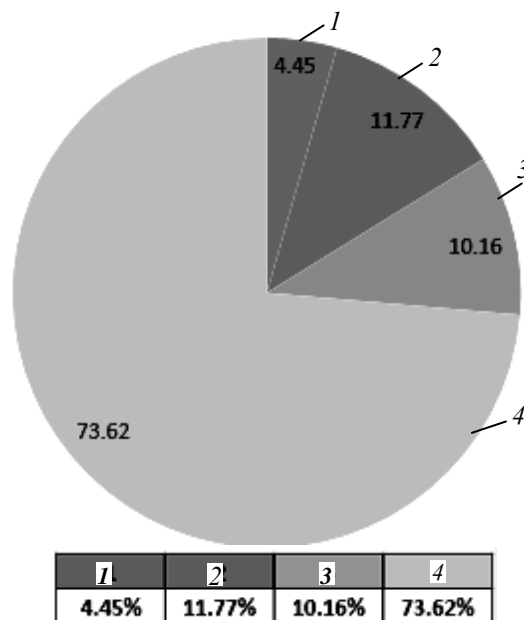
Експеримент 2 теж вказує на недостатню перспективність свердловини і має більшу невизначеність, ніж попередній.

Експеримент 3 має більшу невизначеність, ніж два попередні. Він показує, що лінгвістична змінна «перспективність свердловини», може бути як недостатньою, так і достатньою.

Експеримент 4, на відміну від попередніх, має значну невизначеність, але лінгвістична змінна «перспективність свердловини» може бути в діапазоні від терму «достатня» до терму «висока».

З експериментів 5 і 6 видно, що встановлюється значення лінгвістичної змінної «достатня», невизначеність незначна. Починаючи з експерименту 8 модель видає значення, близьке до терму «висока». Робимо висновок, що найбільш поширені ситуації є такими, коли межі інтервалу чітко вказують на належність лінгвістичної змінної певному стану, тоді експерт дуже швидко приймає рішення. Інший випадок, коли ширина вихідного інтервалу включає декілька значень лінгвістичної змінної, тоді експерту треба приймати кінцеве рішення, яке базується на його досвіді.

Рис. 4. Розташування областей невизначеності для експериментів 2 і 3



Розташування областей невизначеностей (рис. 4), які для наочності розраховані як добуток значення правої межі виходу моделі на ширину відповідного інтервалу для

кожного етапу експерименту 2 та аналогічно для експерименту 3. На діаграмі видно, що для експерименту 3, де лінгвістична оцінка подвійна, зона невизначеності набагато більша.

Таким чином, величина інтервального виходу узагальнювальної моделі вказує на існуючі в початкових даних невизначеності та вимагає від експерта уважного підходу до прийняття кінцевого рішення.

Для подальшого моніторингу стану родовища по етапах ГРП складемо таблицю, яка дасть можливість проаналізувати чи є зв'язок між шириною інтервалу та часу проведених робіт, а також проведемо дослідження чи існує відповідність між оцінками експерта та величиною інтервалу для кожного етапу всіх експериментів. Результати обчислення ширини інтервального виходу узагальнювальної моделі по етапах зі значенням лінгвістичної змінної наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Результати обчислення ширини інтервального виходу узагальнювальної моделі з оцінкою експерта за лінгвістичною змінною

№	Етап 1		Етап 2		Етап 3		Оцінка експерта
	Вихід системи	Ширина інтервалу	Вихід системи	Ширина інтервалу	Вихід системи	Ширина інтервалу	
Результати роботи агрегованої моделі для оцінки 1/недостатня							
1	[0,03; 0,39]	0,36	[0, 53; 0,92]	0,39	[0,00; 0,02]	0,02	Недостатня
2	[0,04; 1,2]	1,16	[0,18; 2,01]	1,83	[1,68; 2,81]	1,13	Недостатня
Результати роботи узагальнювальної моделі для оцінки 2/недостатня							
3	[1,3; 5,48]	4,18	[1,38; 5,48]	4,1	[1,25; 5,25]	4,2	Недостатня
Результати роботи узагальнювальної моделі для оцінки 5/достатня							
4	[6,41; 6,72]	0,31	[5,82; 7,48]	1,66	[6,62; 7,82]	1,2	Достатня
Результати роботи узагальнювальної моделі для оцінки 6/достатня							
5	[5,66; 6,2]	0,54	[5,71; 6,56]	0,85	[5,56; 5,62]	0,06	Достатня
6	[7,32; 7,7]	0,38	[5,37; 6,15]	0,78	[4,78; 5,71]	0,93	Достатня
Результати роботи узагальнювальної моделі для оцінки 8/висока							
7	[9,03; 9,71]	0,68	[9,88; 10]	0,12	[9,92; 9,99]	0,07	Висока
Результати роботи узагальнювальної моделі для оцінки 9/висока							
8	[8,54; 8,76]	0,22	[9,95; 10]	0,05	[9,91; 10]	0,09	Висока
9	[8,62; 8,74]	0,12	[9,64; 9,77]	0,13	[9,9; 9,99]	0,09	Висока

Дані, що наведені в табл. 2, вказують на зміну значень вихідного інтервалу моделі залежно від терміну проведення ГРП. Отримані результати дають змогу порівняти величину інтервалу, що виникає на виході моделі,

з оцінкою, яку виставляє для кожного значення експерт. А саме, для експерименту 1 інтервальне вихідне значення на всіх етапах дуже мале, тому оцінка експертом лінгвістичної змінної «перспективність свердловини «недостатня» є очевидною. За експериментом 2 ширина інтервального виходу збільшується, але залишається стабільною на всіх етапах. Це дозволяє експерту, хоч перспективність і недостатня, все ж таки надати рекомендацію для продовження розвідувальних робіт. Для експериментів 3 і 4 тенденція стабільності ширини інтервалу зберігається. Надалі для експерименту 4 по експеримент 6 з'являється терм «достатня», ширина інтервалу починає зменшуватись і, нарешті, для експериментів 7, 8, 9 спостерігається її зменшення на всіх етапах, тобто інтервальна оцінка перетворюється в точкову. Це підтверджує факт, що зникнення невизначеності означає одночасно збільшення значення балів, які набирає лінгвістична змінна.

Розглянемо, чи впливає на оцінку експертів величина інтервального виходу моделі. Для своїх оцінок експерт, як правило, орієнтується на верхню границю інтервалу, що є поширеною практикою. Але правильність його суджень повинна підтверджуватись зменшенням або збільшенням інтервалу на виході моделі. Наведемо приклади наявності чи відсутності такої відповідності:

- оцінка «недостатня» / 1,2 бали — ширина інтервалу: від 0,36 до близько 4;
- оцінка «достатня» / — ширина інтервалу: від 0,31 до близько 1,16;
- оцінка «висока» / 8 балів — ширина інтервалу: від 0,68 до 0,07;
- оцінка «висока» / 9 балів — ширина інтервалу: від 0,22 до 0,09;
- оцінка «висока» / 9 балів — ширина інтервалу: від 0,12 до 0,09.

Характерною є оцінка «висока», коли інтервал фактично зникає і відповідно оцінка експерта повинна бути найбільшою, що і відбувається за шкалою. Це оцінка 9, яка відповідає фактично точковому значенню. Решта оцінок експерта є теж коректними, оскільки для низьких балів ширина інтервалу є найбільшою. Продемонструємо наведені судження графічно. Із рис. 5 видно як зменшується невизначеність результатів експериментів; процес відбувається послідовно з переходом від етапу 1 до етапу 3 (позначено світлими і темними відтінками).

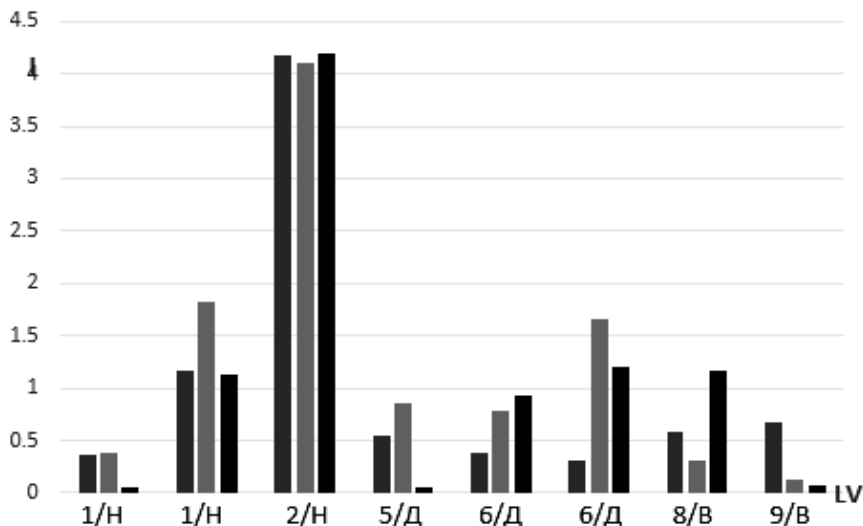


Рис. 5. Інтервальне вихідне значення моделі (I) та лінгвістичними змінними (LV); Н — недостатня; Д — достатня; В — висока

Аналіз отриманих результатів показує, що для підвищення якості прийняття рішень експерту необхідно звертати увагу на величину інтервального виходу узагальнювальної нечіткої моделі типу-2 та давати оцінку невизначеності, яка притаманна вихідному значенню. З огляду на складність проблеми розробнику варто скористатись такими практичними рекомендаціями:

- за умови рівності крайніх правих точок інтервальних значень для вихідної змінної перевагу необхідно надати тому значенню, яке має менший рівень невизначеності;
- якщо отримана в результаті роботи моделі ширина інтервалу включає декілька рівнів і не дозволяє чітко встановити єдине якісне значення з вихідної системи якісних термів, то необхідно провести додаткове експериментальне дослідження необхідних параметрів, або оновити експертні дані, з метою зменшення існуючої невизначеності;
- кожна окремо інтервальна модель, яка будується на основі знань експерта, може давати достатньо широкий діапазон лінгвістичних оцінок для стану системи. Це не означає, що рішення, отримане узагальнювальною моделлю, буде некоректним, швидше побудована модель вказує на значну невизначеність, тобто вхідних даних не вистачає для визначення вихідної величини. Це повинні враховувати фахівці, в обов'язки яких входять завдання моніторингу станів складних систем.

Отримані результати показують, що побудована узагальнювальна модель може виконувати функції помічника експерта з питань моніторингу станів складних систем в умовах неповноти даних. Результати дослідження ефективно можуть бути застосовані в довготривалих дослідженнях природних процесів задля скорочення терміну прийняття рішення та заощадження необхідних для цього ресурсів.

ВИСНОВОК

Запропоновано теоретико-множинний підхід до узагальнення виходів нечітких моделей типу-2 з інтервальними функціями належності, які входять до узагальнювальної моделі в завданні моніторингу станів складних систем. Наведено приклади використання узагальнювальної нечіткої моделі типу-2 в завданні моніторингу станів артезіанської свердловини в природному середовищі. Проведено дослідження відповідності інтервального виходу узагальнювальної моделі з лінгвістичними оцінками експертів та показано адекватність рішень, прийнятих експертом. Надано рекомендації експертам щодо покращення прийняття рішень стосовно оцінки вихідного інтервалу узагальнювальної моделі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Q. Liang and J.M. Mendel, "Interval Type-2 fuzzy logic systems: theory and design," *IEEE Trans. on Fuzzy Syst.*, vol. 8, pp. 535–550, 2000.
2. Y.P. Zaychenko, *Fuzzy models and methods in intelligent systems*, (in Russian). Kyiv: Slovo, 2008.
3. Arnab Kumar De, Debjani Chakraborty, and Animesh Biswas, "Literatura review on type-2 fuzzy set theory," *Soft Computing*, 26 (18), pp. 9049–9068, 2022. doi: 10.1007/s00500-22-07304-4.
4. N.R. Kondratenko and O.O. Snihur, "Investigating adequacy of interval type-2 fuzzy models in complex objects identification problems," *System Research and Information Technologies*, no. 4, pp. 94–104, 2019.

5. N.R. Kondratenko, "Improving Adequacy of Type-2 Fuzzy Models by Using Type-2 Fuzzy Sets," *Naukovi visti NTUU KPI*, no. 6, pp. 56–61, 2014.
6. Xiaoming Tang, Li Deng, Jimin Yu, and Hongchun Qu, "Output Feedback Predictive Control of Interval Type-2 T-S Fuzzy Systems With Markovian Packet Loss," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 26, no. 4, August 2018.
7. N.R. Kondratenko, O.V. Cheboraka, and O.A. Tkachuk, "Interval Type-2 Fuzzy Models Concerning Identification Problems of Multiple-input Multiple output Objects," *Information Processing Systems*, no. 3(93), pp. 48–52, 2011.
8. N. Kondratenko and O. Snihur, "Interval Fuzzy Modeling of Complex Systems under Conditions of Input Data Uncertainty," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4/4 (82), pp. 20–28, 2016.
9. N.R. Kondratenko, O.V. Cheboraka, and S.M. Kuzemko, "Study of Aggregating Interval Type-2 Fuzzy Models Capabilities for Forecasting of Time Series," *Visnyk VPI*, no. 4, pp. 22–27, 2010.
10. N.R. Kondratenko, "Vykorystannya nechitkykh baz znanj z funktsiyamy nalezhnosti typu-2 u medychnyi diahnozytsi [Use of fuzzy knowledge bases with type-2 membership functions in medical diagnostics]," *Materials of the articles of the International scientific and practical conference "Actual problems of medical, biological physics and informatics"*, Vinnytsia, 2022. Available: <https://drive.google.com/file/d/1icajVT7OKyVxlfXZd1czwhS13EhtmUj8/view?usp=sharing>
11. N.R. Kondratenko, N.B. Zelinsjka, and S.M. Kuzemko, "Fuzzy Logic Systems with Allowance for the Blank in Experimental Data Taken," *Naukovi visti NTUU KPI*, no. 5, pp. 37–41, 2004.
12. P. Melin and O. Castillo, "An Intelleigent hybrid approach for industrial quality control combining neural networks, fuzzy logic and fractal theory," *Information Sciences*, vol. 147, no. 177, pp. 1543–1557, 2007.

Received 13.09.2022

INFORMATION ON THE ARTICLE

Nataliia R. Kondratenko, ORCID: 0000-0002-4450-1603, Vinnytsia National Technical University, Ukraine, e-mail: kondrn2014@gmail.com

Olga O. Snihur, ORCID: 0000-0002-9268-6876, PhD, private entrepreneur, Ukraine, e-mail: olha.snihur@gmail.com

Roman M. Kondratenko, ORCID: 0000-0002-7982-0786, BelISA, Belarus, e-mail: rkondratenko.niei@gmail.com

INTERVAL TYPE-2 GENERALIZING FUZZY MODEL FOR MONITORING THE STATES OF COMPLEX SYSTEMS USING EXPERT KNOWLEDGE / N.R. Kondratenko, O.O. Snihur, R.M. Kondratenko

Abstract. A type-2 interval generalizing fuzzy model is proposed for monitoring complex systems' states. A set-theoretic approach is proposed to generalize the results of type-2 fuzzy models with interval membership functions. The study of the correspondence of expert assessments to the output value of the generalizing fuzzy model over the observation interval is presented. Examples of the use of generalizing fuzzy model type-2 in the task of monitoring the conditions of an artesian well are given. It is shown that in order to improve the quality of decisions made, the expert needs to pay attention to the value of the interval output of the generalizing type-2 fuzzy model. Recommendations are presented to experts to improve decision-making regarding the estimation of the output interval of the generalizing model.

Keywords: type-2 fuzzy model, interval membership function, set-theoretic approach, expert knowledge.